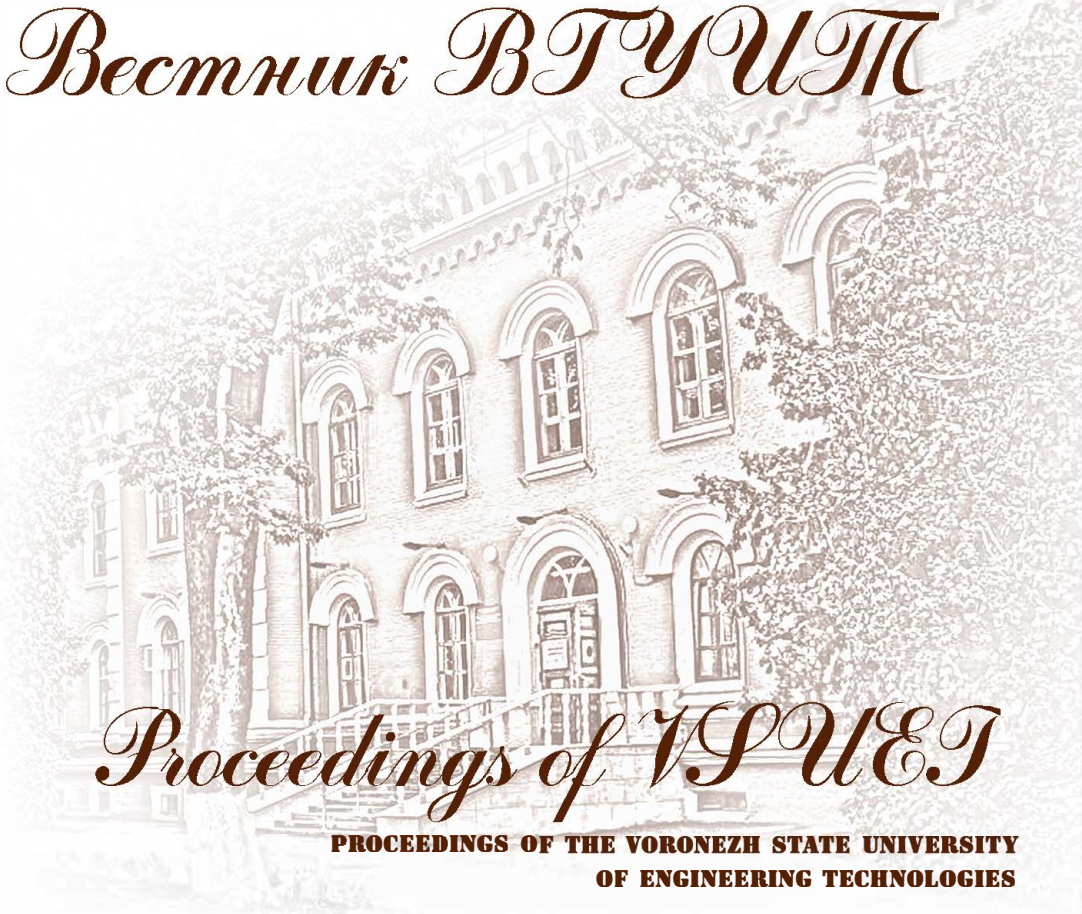
ISSN 2226-910X
E-ISSN 2310-1202

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Вестник ВГУИТ



Proceedings of VSUET

PROCEEDINGS OF THE VORONEZH STATE UNIVERSITY OF ENGINEERING TECHNOLOGIES

2026 № 1

16+

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

16+

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ВЕСТНИК ВГУИТ

2026, Том. 88, № 1

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1938 ГОДУ
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

Воронеж
2026

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education

«VORONEZH STATE UNIVERSITY
OF ENGINEERING TECHNOLOGIES»

PROCEEDINGS OF THE VORONEZH STATE UNIVERSITY OF ENGINEERING TECHNOLOGIES

Proceedings of VSUET

2025, Vol. 88, No. 1

SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL

FOUNDED IN 1938
COMES 4 TIMES PER YEAR

Voronezh
2026

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для опубликования диссертационных исследований

Письмо о Перечне рецензируемых научных изданий от 28.12.2018 г. (https://goo-gl.ru/4XHR)

Материалы журнала размещаются в
БД РИНЦ, **БД AGRIS**– выборочно, **ЭБС Лань**, **ЭБС IPRbooks, ЭБ КиберЛенинка**, **БД ВИНИТИ РАН, НИС Соционет, БД Directory of Open Access Journals (DOAJ), БД Open Access scholarly Resources (ROAD), The European Library (TEL), БД AcademicKeys**, **Research Bible**, **БД EBSCO Publishing, Academic Keys**

Соответствие рубрик/разделов журнала Вестник ВГУИТ Номенклатуре научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

1. Пищевые системы

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
4.3.3. Пищевые системы (технические науки)
4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

2. Химическая технология

2.6.7. Технология неорганических веществ (технические науки)
2.6.7. Технология неорганических веществ (химические науки)
2.6.10. Технология органических веществ (химические науки)
2.6.10. Технология органических веществ (технические науки)
2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (химические науки)
2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ (технические науки)
2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (физикоматематические науки)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель (Главный редактор):

КОРНЕЕВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА доктор биологических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, и.о. проректора по научной и инновационной деятельности, зав. кафедрой биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия) ORCID: 0000-0002-2863-0771

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ РУБРИК

Пищевые системы

ОСТРИКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ (гл. ред.) доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

АГАФОНОВ ГЕННАДИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ доктор технических наук, профессор кафедры технологии бродильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

АКСЕНОВА ЛАРИСА МИХАЙЛОВНА доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник ВНИИ кондитерской промышленности (Москва, Россия)

АЛЕКСЕЕВ ГЕННАДИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор факультета биотехнологий, научный руководитель образовательной программы «Процессы и аппараты пищевых производств», Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО (г. Санкт-Петербург, Россия) ORCID- 0000-0002-2867-108X

АМИРОВА ЭЛЛИ доктор наук, основатель и генеральный директор Succurro Inc. (Ла-Меса, США) ORCID: 0000-0002-9377-3875

АНТИПОВ СЕРГЕЙ ТИХОНОВИЧ доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия) ORCID: 0000-0002-8932-5922

АНТИПОВА ЛЮДМИЛА ВАСИЛЬЕВНА (гл. ред.) доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия) ORCID: 0000-0002-1416-0297

АХМЕДОВ МАГОМЕД ЭМИНОВИЧ доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой товароведения и экспертизы, Дагестанский государственный технический университет (Махачкала, Россия)

БРЕДИХИН СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ доктор технических наук, профессор, кафедра процессы и аппараты перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

БРЕНЧ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ кандидат технических наук, доцент, декан инженерно-технологического факультета учреждения образования, Белорусский государственного аграрный технический университет (Минск, Беларусь) ORCID: 0000-0001-6604-9366

ВАЙБХАВКУМАР ГАВАЛИ доктор наук, постдокторант, фармакология, отделение внутренней медицины, Медицинский колледж (Цинциннати, США) ORCID: 0000-0002-7917-4913

ВАСИЛЕНКО ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ доктор технических наук, профессор, и.о. проректора по учебной работе, зав. кафедрой машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия) ORCID: 0000-0002-1547-9814

ВИКТОРОВА ЕЛЕНА ПАВЛОВНА доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной и инновационной деятельности, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки сельскохозяйственной продукции (Краснодар, Россия)

ВИНЧЕНЦО СТОРНЕЛЛИ профессор, профессор кафедры электроники, Университет Л'Акуила (Аквила, Италия)

ДОНЧЕНКО ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА доктор технических наук, профессор, профессор ВАК, профессор кафедры технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (Краснодар, Россия)

ДРАННИКОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств, декан инженерно-технического факультета, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ИЗТАЕВ АУЕЛБЕК доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хлебопродуктов и перерабатывающих производств, директор НИИ пищевых технологий, Алматинский Технологический Университет (Алматы, Казахстан)

ЙОРДАНОВ ДИНКО ГЕОРГИЕВ доктор наук, доцент кафедры мясные и рыбные технологии, Университет пищевых технологий (Пловдив, Болгария) ORCID: 0000-0002-9300-6588

КАЧАНОВА МИРОСЛАВА доктор наук, профессор кафедры плодоводства, виноградарства и экологии, Словацкий сельскохозяйственный университет (Нитра, Словакия), отдел биоэнергетики и пищевых технологий, Жешувский университет (Жешув, Польша) ORCID: 0000-0002-4460-0222

КУЛЬНЕВА НАДЕЖДА ГРИГОРЬЕВНА доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии бродильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ЛИСИЦЫН АНДРЕЙ БОРИСОВИЧ доктор технических наук, профессор, академик РАН, лауреат Государственной премии РФ, директор ФГБНУ "ВНИИМП им. В.М. Горбатова" (Москва, Россия)

МАГОМЕДОВ ГАЗИБЕГ ОМАРОВИЧ доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, зав. кафедрой технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

МАКСИМЕНКО ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и инновациям, заведующий кафедры технологические машины и оборудование, Астраханский государственный технический университет (Астрахань, Россия)

МАСЛОВ АЛЕКСАНДР доктор медицинских наук, доцент кафедры генетики, Медицинский колледж Альберта Эйнштейна (Нью-Йорк, США) ORCID: 0000- 0001-5402-8891

МБАРГА МАНГА ДЖОЗЕФ АРСЕН магистр агрономии, научный сотрудник кафедры микробиологии и вирусологии, Российский университет дружбы народов (Москва, Россия) ORCID: 0000-0001-9626-9247

МИРОНЕСКУ МОНИКА доктор наук, доцент, факультет сельскохозяйственных наук, пищевой промышленности и охраны окружающей среды, Университет «Лучиан Блага» (Сибиу, Румыния) ORCID: 0000-0002-0515-475X

ОСПАНОВ АБДЫМАНАП АБУБАКИРОВИЧ академик КазНАЕН, доктор технических наук, профессор, руководитель учебного научно-производственного Центра «Технология перерабатывающих производств», Казахский национальный аграрный университет (Алматы, Казахстан) ORCID: 0000-0002-3813-603X

ПАНДА ВАНДАНА доктор наук, доцент кафедры фармакологии, Ведущий фармацевтический колледж им. К. М. Кунднани (Мумбай, Индия) ORCID: 0000-0002-7016-7813

ПАНФИЛОВ ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ доктор технических наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

ПЕТРОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ доктор технических наук, профессор, академик РАН, директор ФГБНУ ВНИИ Технологии консервирования (Видное, Московская обл., Россия)

ПРЕЙС ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологические системы пищевых, полиграфических и упаковочных производств Тульский государственный университет, Политехнический институт, (Тула, Россия)

РОДИОНОВА НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сервиса и ресторанного бизнеса, декан факультета экономики и управления, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия) ORCID: 0000-0002-6940-7998

СУНДАРРАДЖАН ПРИЯ магистр наук, доктор наук, доцент кафедры естественных наук и биохимии, колледж Святого Ксавьера, Университет Мумбаи (Мумбаи, Индия)

ХАТКО ЗУРЕТ НУРБИЕВНА доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Майкопский государственный технологический университе, (Майкоп, Россия)

ЧЕРТОВ ЕВГЕНИЙ ДМИТРИЕВИЧ доктор технических наук, профессор, советник при ректорате, зав. кафедрой технической механики, почетный работник высшего профессионального образования РФ, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ШЕВЦОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (Воронеж, Россия)

ЭСРА КАПАНОГЛУ доктор наук, доцент кафедры пищевой инженерии, Стамбульский технический университет (Стамбул, Турция) ORCID: 0000-0003-0335-9433

Химическая технология

КАРМАНОВА ОЛЬГА ВИКТОРОВНА (гл. ред.) доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

БИТЮКОВ ВИТАЛИЙ КСЕНОФОНТОВИЧ доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, советник при ректорате, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ВАНИЕВ МАРАТ АБДУРАХМАНОВИЧ доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой химия и технология переработки эластомеров, Волгоградский государственный технический университет, кафедра химия и технология переработки эластомеров (Волгоград, Россия)

ДОРМЕКШИН ОЛЕГ БОРИСОВИЧ доктор технических наук, профессор, лауреат Премии Национальной академии наук Беларуси, отличник народного образования Республики Беларусь, проректор по научной работе, зав. кафедрой технологии неорганических веществ и общей химической технологии, Учреждение образования "Белорусский государ-ственный технологический университет" (Минск, Беларусь)

КУЧМЕНКО ТАТЬЯНА АНАТОЛЬЕВНА доктор химических наук, профессор, профессор РАН, зав. кафедрой физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ЛЮСОВА ЛЮДМИЛА РОМУАЛЬДОВНА доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой химии и технологии переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева, Московский технологический университет МИРЭА, Московский государственный университет тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

МОКШИНА НАДЕЖДА ЯКОВЛЕВНА доктор химических наук, доцент, профессор кафедры физики и химии, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (Воронеж, Россия) ORCID: 0000-0001-8409-024X

НИКУЛИН СЕРГЕЙ САВВОВИЧ доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии органического синтеза и высокомолекулярных соединений, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

ПРОКОПЧУК НИКОЛАЙ РОМАНОВИЧ доктор химических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, зав. кафедрой технологии нефтехимического синтеза и переработки полимеров, Учреждение образования "Белорусский государственный технологический университет" (Минск, Беларусь)

ПУГАЧЕВА ИННА НИКОЛАЕВНА доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инженерной экологии, декан факультета экологии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

СУХАНОВ ПАВЕЛ ТИХОНОВИЧ доктор химических наук, профессор, советник при ректорате по научно-методической деятельности, профессор кафедры физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия) ORCID: 0000-0002-2588-9286

ФРАНЧЕСКО ВЕЛЬО профессор, профессор кафедры теории развития химических процессов, Университет Л'Акуила (Аквила, Италия)

Официальный сайт «Вестник ВГУИТ» www.vestnik-vsuet.ru
Подписной индекс издания в агентстве "Роспечать" 70927

Ответственный секретарь: ДЕРКАНОСОВА А.А. (эл. почта: post@vestnik-vsuet.ru)

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-56830 от 29 января 2014 г.

Адрес университета, редакции, издательства и отдела полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»
394036, Воронеж, пр. Революции д.19 ауд.11
тел./факс: (473) 255-37-16
E-mail: post@vestnik-vsuet.ru

Сдано в набор 09.03.2026. Подписано в печать 25.03.2026
Выход в свет: 30.03.2026
Усл. печ. л. 42,41 Тираж 1500 экз. Заказ.
Цена – свободная.

© ФГБОУ ВО «Воронеж. гос. ун-т инж. технол.», 2026

The magazine is included in the list of publications recommended by the Higher Attestation Commission

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the publication of dissertation research

Letter of the List of Peer-reviewed Scientific Publications from 28/12/2018. (https://goo-gl.ru/4XHR)

Journal materials are placed in

RSCI DB, AGRIS DB - selectively, EB Doe, EBR IPRbooks, EB CyberLenink, DB VINITI RAS, NIS Socionet, Directory of Open Access Journals (DOAJ) database, Open Access scholarly Resources (ROAD) database, The European Library (TEL), AcademicKeys database, Research Bible, EBSCO Publishing database, Academic Keys

Correspondence of rubrics/sections of the journal Proceedings of VSUET
The nomenclature of scientific specialties for which academic degrees are awarded.

1. Food systems

4.3.1. Technologies, machines and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)
4.3.3. Food systems (engineering sciences)
4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)

2. Chemical technology

2.6.7. Technology of inorganic substances (engineering sciences)
2.6.7. Technology of inorganic substances (chemical sciences)
2.6.10. Technology of organic substances (chemical sciences)
2.6.10. Technology of organic substances (engineering sciences)
2.6.11. Technology and processing of synthetic and natural polymers and composites (chemical sciences)
2.6.11. Technology and processing of synthetic and natural polymers and composites (technical sciences)
2.6.12. Chemical technology of fuels and high-energy substances (technical sciences)
2.6.13. Processes and apparatus of chemical technologies (technical sciences)
2.6.13. Processes and apparatuses of chemical technologies (physical and mathematical sciences)

EDITORIAL COUNCIL

Chairman (Editor-in-chief):

KORNEEVA, OLGA SERGEEVNA doctor of biological sciences, professor, honored worker of higher school of Russia, acting vice-rector for research and innovation, head of the department of biochemistry and biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia) ORCID: 0000-0002-2863-0771

EDITORIAL TEAM

Food systems

OSTRIKOV, ALEKSANDR NIKOLAEVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of Russia, Head of Department Technology of fats, processes and equipment of chemical and food production, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

AGAFONOV, GENNADII VIACHESLAVOVICH Doctor of Technical Sciences, prof., Department of Technology of fermentation and sugar industries, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

AHMEDOV, MAGOMED EMINOVICH doctor of technical sciences, Professor, head. Department of Commodity Science and Expertise, Dagestan State Technical University (Makhachkala, Russia)

AKSENOVA, LARISA MIKHAILOVNA Doctor of Technical Sciences, professor, Academician-secretary of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Chief research officer at the Research Institute of Confectionery Industry (Moscow, Russia)

ALEKSEEV, GENNADY VALENTINOVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor of the Faculty of Biotechnology, Scientific Supervisor of the educational program "Processes and Apparatus for Food Production", St. Petersburg National Research University ITMO (St. Petersburg, Russia) ORCID- 0000-0002-2867-108X

AMIROVA ELLIE DAOM, PhD, Diplomate of OM, LAc), Founder and CEO of Succurro Inc. (La Mesa, USA) ORCID: 0000-0002-9377-3875

ANTIPOV, SERGEY TIKHONOVICH Doctor of Technical Sciences, professor, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, honored inventor of the Russian Federation, Professor of the Department of Machines and Apparatuses of Food Production, Voronezh state university of engineering technologies (Voronezh, Russia) ORCID: 0000-0002-8932-5922

ANTIPOVA, LIUDMILA VASILEVNA Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of the Department of technology of animal origin products, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

BREDIKHIN, SERGEY ALEKSEEVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Processes and Apparatuses of Processing Industries, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after them. K.A. Timiryazev (Moscow, Russia)

BRENCH, ANDREY ALEXANDROVICH Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology of the Educational Institution, Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Belarus) ORCID: 0000-0001-6604-9366

CHERTOV, EVGENY DMITRIEVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor to the administration, Head of the Department of Technical Mechanics, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Voronezh state university of engineering technologies (Voronezh, Russia)

DONCHENKO, LYUDMILA VLADIMIROVNA Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of VAK, Professor of the Department of Technology of Storage and Processing of Plant Production, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina (Krasnodar, Russia)

DRANNIKOV, ALEKSEJ VIKTOROVICH Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Machines and Apparatuses of Food Production, Dean of the Faculty of Food Machines and Automata, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

ESRA CAPANOGLU Ph.D., Associate Professor, Istanbul Technical University, Food Engineering Department (Istanbul, Turkey) ORCID: 0000-0003-0335-9433

IZTAEV AUELBEK Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology of bakeries and processing industries, director of the Research Institute of Food Technologies, Almaty Technological University (Almaty, Kazakhstan)

KACANIOVA MIROSLAVA PhD., Department of Fruit sciences, Viticulture and Enology, Faculty of Horticulture and Landscape Engineering, Slovak University of Agriculture (Nitra, Slovakia), full professor, Department of Bioenergy and Food Technology, Faculty of Biology and Agriculture, University of Rzeszow (Rzeszow, Poland) ORCID: 0000-0002-4460-0222

KHATKO, ZURET NURBIEVNA Doctor of Technical Sciences, associate professor, Head of the department of manufacturing technology and processing of agricultural products, Maikop State Technological University (Maikop, Russia)

KULNEVA, NADEZHDA GRIGOREVNA Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology of fermentation and sugar industries, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

LISITSYN, ANDREI BORISOVICH Doctor Of Technical Sciences, Professor, Academician Of The Russian Academy Of Sciences, Laureate Of The State Prize Of The Russian Federation, Director Of The All-Russian Research Institute Of Meat Industry Named After V. M. Gorbatov. (Moscow, Russia)

MAGOMEDOV, GAZIBEG OMAROVICH doctor of Technical Sciences, prof., Honored Worker of Higher Professional Education of the Russia, Head of the Department of Technology of bakery, confectionery, pasta and grain-processing industries, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

MAKSIMENKO, YURI ALEKSANDROVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Head of the Department of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University (Astrakhan, Russia)

MASLOV ALEXANDER MD/PhD, Research Assistant Professor, Department of Genetics, Albert Einstein College of Medicine (New York, USA) ORCID 0000- 0001-5402-8891

MBARGA MANGA JOSEPH ARSENE master of Science in Agronomy, Researcher in the Department of Microbiology and Virology, People's Friendship University of Russia (Mocow, Russia) ORCID: 0000-0001-9626-9247

MIRONESCU MONICA PhD, Associate Professor, Faculty of Agricultural Sciences, Food Industry and Environmental Protection, Lucian Blaga University of Sibiu (Sibiu, Romania) ORCID: 0000-0002-0515-475X

OSPANOV, ABDYMANAP ABUBAKIROVICH Academician KazNAEN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Educational Research and Production Center "Technology of Processing Industries", Kazakh National Agrarian University (Almaty, Kazakhstan) ORCID: 0000-0002-3813-603X

PANDA, SANJEEV VANDANA Ph.D., Associate Professor, Pharmacology, Prin. K. M. Kundnani College of Pharmacy (Mumbai, India) ORCID: 0000-0002-7016-7813

PANFILOV, VIKTOR ALEKSANDROVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAS, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honored Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor of the Department Processes and Apparatuses of Processing Industries, Russian State Agrarian University -Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev (Moscow, Russia)

PETROV, ANREJ NIKOLAEVICH Doctor of Technical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the All-Russian Scientific Research Institute of Preserving Technology (Vidnoe, Moscow Region, Russia)

PRICE, VLADIMIR VIKTOROVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technological Systems of Food, Printing and Packaging Production Tula State University, Polytechnic Institute, (Tula, Russia)

RODIONOVA, NATALIA SERGEEVNA Doctor of Technical Science, Prof., Professor of the Department of service and restaurant business, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

SHEVTCOV, ALEKSANDR ANATOLEVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Professor of General Professional Disciplines, Air Force Academy named after Prof. N. E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia)

SUNDARRAJAN PRIYA M.Sc, Ph.D., Associate Professor, Department of Life Science and Biochemistry, St. Xavier's College, India affiliated to University of Mumbai. (Mumbai, India)

VAIBHAVKUMAR, SHANTARAM GAWALI, M.Pharm., Ph.D., Postdoctoral Fellow, Pharmacology, Department of Internal Medicine, College of Medicine, India affiliated to University of Cincinnati. (Cincinnati, USA) ORCID: 0000-0002-7917-4913

VASILENKO, VITALII NIKOLAEVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs. Head of the Department of Machines and Apparatuses of Food Production, the Dean of the Technology Faculty, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia) ORCID: 0000-0002-1547-9814

VICTOROVA, ELENA PAVLOVNA Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific and Innovation Activities North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture and Wine, Krasnodar Research Institute of Storage and Processing of Agricultural Products (Krasnodar, Russia)

VINCENZO STORNELLI Professor, Professor of the Department of Electronics, University of L'Aquila (L'Aquila, Italy)

YORDANOV DINKO GEORGIEV PhD., Associate Professor, meat and fish technology, University of Food Technologies (Plovdiv, Bulgaria) ORCID: 0000-0002-9300-6588

Chemical Technology

KARMANOVA, OLGA VIKTOROVNA doctor of Technical Sciences, prof., Head of the Department of Chemistry and Chemical Technology of organic compounds and Polymers processing, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

BITIUKOV, VITALII KSENOFONTOVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of Russia, Advisor to the administration, Professor of the Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

VANIEV, MARAT ABDURAKHMANOVICH Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head. Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing, Volgograd State Technical University, Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing (Volgograd, Russia)

DORMEKSHIN, OLEG BORISOVICH Doctor of Technical Sciences, Professor, Laureate of the National Academy of Sciences of Belarus, Excellence in Public Education of the Republic of Belarus, Vice Rector for Research, head of the department of technology of inorganic substances and general chemical technology, Educational Establishment "Belarusian State Technological University" (Minsk, Belarus)

KUCHMENKO, TATIANA ANATOLEVNA doctor of Chemical Sciences, Prof., Head of the Department of Physical and Analytical Chemistry, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

LYUSOVA, LYUDMILA ROMUALDOVNA Doctor of Technical Sciences, Professor, Head. Department of Chemistry and Technology of Elastomers Processing named after F.F. Kosheleva, Moscow Technological University MIREA, Moscow State University of Fine Chemical Technologies. M.V. Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

MOKSHINA, NADEZHDA IAKOVLEVNA doctor of Chemical Sciences, associate professor, professor of the Department of Physics and Chemistry, Air Force Academy named after Prof. N. E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia) ORCID: 0000-0001-8409-024X

NIKULIN, SERGEI SAVVOVICH doctor of Technical Sciences, prof., Professor of the Department of Technology of Organic Synthesis and macromolecular compounds, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

PROKOPCHUK, NIKOLAI ROMANOVICH Doctor of Chemical Sciences, Professor corresponding member of National Academy of Sciences of Belarus, Head of the department of Technology of petrochemical synthesis and polymers processing, Educational Establishment "Belarusian State Technological University" (Minsk, Belarus)

PUGACHEVA, INNA NIKOLAEVNA doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Engineering, Dean of the Faculty of Ecology and Chemical Technology, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

SUKHANOV, PAVEL TIKHONOVICH doctor of Chemical Sciences, Professor, Vice Rector for Research and Innovation. Professor of the Department of Physical and Analytical Chemistry, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

FRANCESCO VEGLIO Professor, Professor of the Department of Theory of Chemical Processes development, University of L'Aquila, (L'Aquila, Italy)

Official site: www.vestnik-vsuet.ru
Subscription index of the publication in the Rospechat agency 70927

Executive Secretary: DERKANOSOVA A.A. (email post office: post@vestnik-vsuet.ru)

Founder: Voronezh State University of Engineering Technologies

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications: Certificate of Registration ПИ № ФС77-56830 January 29, 2014

Address of the university, editorial office, publishing house and printing department of FSBEI HE "VGUIT"
394036, Voronezh, pr. Revolution 19, room 11
tel / fax: (473) 255-37-16
E-mail: post@vestnik-vsuet.ru

Put in set 09.03.2026. Signed to print 25.03.2026
The publication:30.03.2026
Conditional Print l. 42,41 Circulation 1500 copies.
Price - Free.

© FSBEI HE
"Voronezh State University
of Engineering
Technologies ", 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Васильева С.И., Бондарь М.С., Пожидаева Е.А., Попов Е.С., Дымовских Я.А., Дурова Ю.В. Исследование физико-химических свойств сублимированной метабиотической пищевой системы **13**

Терёхина А.В., Капустина В.С. Исследование качественных характеристик масла из орехов ши **19**

Каплан Д.О., Гаврилова Н.Б., Коновалов С.А., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Влияние алкалоида берберина на развитие пробиотических микроорганизмов в ферментированных молочных продуктах **26**

Родина З.Ю., Перфилова О.В., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Разработка поликомпонентных чипсов путем рационального использования растительного сырья **32**

Родичева Н.В., Болтенко Ю.А., Мячикова Н.И., Зиновьева И.Г., Фролова Л.Н., Дерканосова А.А. Влияние порошка столовой свеклы на реологические свойства ржаного теста и качественные показатели хлебобулочных изделий **40**

Мишинев К.В., Остриков А.Н. Разработка рецептур псевдокапсулированных рыбных комбикормов **47**

Плотников В.Е., Образцова С.В., Скосарь Д.Е., Курганская В.В., Плотникова И.В., Полянский К.К. Оценка эффективности инактивации фитатов в чечевице и продуктах ее переработки **54**

Васюкова А.Т., Кривошонок К.В., Эдварс А.Р., Портнов Н.М., Беленков А.И., Карпов В.И. Влияние пряно-ароматических растений на качество пищевых продуктов **67**

Быков А.В., Лабутина Н.В., Герасимова Э.О., Быкова Н.С. Влияние процесса прогрева при выпечке пшенично-тритикалевых полуфабрикатов высокой степени готовности на качество хлеба **77**

Хузина Н.А., Полянский К.К., Дерканосова А.А., Хузина А.И. К вопросу о правовых аспектах пищевых нанотехнологий **85**

Долматова О.И., Макарова Д.И. Совершенствование технологии кисломолочного продукта «Питьевой творог» **91**

Ткешелашвили М.Е., Бобожонова Г.А., Магомедов Г.О. Разработка обогащенных кремовых масс с модификацией углеводного профиля **97**

Дранников А.В., Домбровская Я.П., Сухоруков Е.М., Кулигин Д.Р. Исследование процесса сушки термолабильных продуктов с использованием теплонасосных технологий **107**

Тугашова Л.Г. Управление сушильной установкой на основе эксергетического критерия и регрессионных методов **114**

Кох Ж.А, Кох Д.А., Еременко О.Н. Разработка технологии ягодных морсов, обогащенных биологически активными веществами **123**

Зайцева Л.В., Сотченко Д.Ю., Игнатов А.Ю., Печникова Ю.Ю., Балуян Х.А., Мартиросян В.В. Исследование цветовых характеристик хлебобулочных изделий из пшеничной муки при различной продолжительности выпечки **133**

Гизатов А.Я., Гизатова Н.В. Применение растительных компонентов, улучшающих структуру, вкус и пищевые качества мясных продуктов **142**

Мячикова Н.И., Болтенко Ю.А., Зиновьева И.Г., Сластникова Я.А., Фролова Л.Н., Родичева Н.В. Разработка рецептуры и изучение влияния муки из мякоти тыквы на качество блинов **151**

Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Кудактина Т.В., Скалатский С.В., Белоусов В.В., Воронькова С.П. Нут: функциональные свойства и технологии переработки **159**

Баязитов К.Р., Яковченко Н.В., Анцыперова М.А. Оптимизация параметров экстракции биологически активных веществ из корня солодки методом планирования эксперимента по Боксу-Бенкену **169**

Иванов М.С., Яковченко Н.В., Кравцова Е.В., Ширяев В.А. Оптимизация ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений из ягод облепихи (*Hippophae rhamnoides L.*) методом Бокса-Бенкена **176**

Черных Н.А., Гаврилова Н.Б., Коновалов С.А., Полянский К.К., Дерканосова А.А., Торшина А.А. Разработка и исследование технологии творожного десерта **184**

Петрушов Ю.А., Калачев С.Л. Потребительские предпочтения на рынке полуфабрикатов на основе грибов **192**

Копылова А.В., Глебова А.А. Подходы консервирования заварных полуфабрикатов **200**

Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А., Евдокимова О.В., Черемушкина И.В. Разработка рецептуры и технологии ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника **207**

Манжесов В.И., Чурикова С.Ю., Айрапетян А.А., Яковлева С.Ф. Биотехнологическая платформа для производства белкового концентрата из фасоли **213**
Безотосова О.К., Беляева М.А. Формирование математической модели процесса сушки яблок **219**
Айрапетян А.А., Чурикова С.Ю., Манжесов В.И., Ковалева Т.С. Разработка и комплексная оценка качества комбинированных мясорастительных рубленых полуфабрикатов функционального назначения **226**

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Черепанова В.А., Широкова Е.С., Фомин С.В. Динамически вулканизованные термоэластопласты на основе ПВДФ и БНКС-40 АМН **233**
Погиба А.Ю., Верещагин В.Ю., Кондратов А.П. Ступенчатые сенсорные композиты для индикации силы сжатия при герметизации стыков **243**
Толстов А.М., Наумова Ю.А., Поповских Е.Г., Трусов А.С. Рецептурно-технологические решения по управлению морфологической структурой вспененных эластомерных материалов на основе СКЭПТ **250**
Никулина Н.С., Никулин С.С., Власова Л.А., Мисин В.М. Получение древесно-полимерного композита с применением этенилнафталина **267**
Долгин Д.С., Веткин Ю.А., Гуданов И.С., Лебедев А.Е., Ватагин А.Е., Холодкова А.И. Проектирование узлов опирания привода на крышку аппарата с механическим перемешивающим устройством **273**
Филимонова А.А., Власова А.Ю., Майоров Е.С., Камалиева Р.Ф., Филимонов А.А., Чичирова Н.Д. Разработка лабораторного кондуктометра на основе аддитивных технологий и исследование характеристик ионоселективных электродов из различных электропроводящих компонентов **281**
Янов В.В., Гатауллина Л.И., Носова Л.В., Зенитова Л.А. Масло семян каучукового дерева и натуральный каучук в качестве биодеградирующих добавок для полипропиленовых композиций с укороченным циклом жизни **291**
Гарсия Балдерас И., Долгоносов В.Ю., Жалыбина А.Ю., Род В.А., Утехин А.Н., Конюхов В.Ю. Методика синтеза люминофора – оксикарбида кремния **299**
Глебская С.А., Грибиниченко Т.Н., Давлетшина М.С., Доронина А.Д., Успенская М.В., Олехнович Р.О. Получение и свойства двухслойных полиэлектролитных пленок на основе хитозана и гиалуроната натрия **306**

CONTENTS

FOOD SYSTEMS

Vasilyeva S.I., Bondar M.S., Pozhidaeva E.A., Popov E.S., Dymovskikh Y.A., Durova Yu.V. Study of physicochemical properties of sublimated metabiotic food system **13**

Teryokhina A.V., Kapustina V.S. Investigation of the qualitative characteristics of shea butter **19**

Kaplan D.O., Gavrilova N.B., Konovalov S.A., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. The effect of berberine alkaloid on the development of probiotic microorganisms in fermented dairy products **26**

Rodina Z.Y., Perfilova O.V., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. Development of multi-component chips through the rational use of plant-based raw materials **32**

Rodicheva N.V., Boltenko Yu.A., Myachikova N.I., Zinov'eva I.G., Frolova L.N., Derkanosova A.A. Influence of beetroot powder on the rheological properties of rye dough and the quality indicators of bakery products **40**

Mishinev K.V., Ostrikov A.N. Development of recipes for pseudoencapsulated fish feed **47**

Plotnikov V.E., Obraztsova S.V., Skosar D.E., Kurganskaia V.V., Plotnikova I.V., Polyanskii K.K. Evaluation of the effectiveness of phytate inactivation in lentils and it's processed products **54**

Vasyukova A.T., Krivoshonok K.V., Edwards A.R., Portnov N.M., Belenkov A.I., Karpov V.I. The influence of aromatic plants on the quality of food products **67**

Bykov A.V., Labutina N.V., Gerasimova E.O., Bykova N.S. The effect of the heating process on the quality of high-grade wheat-triticale semifinished products during baking **77**

Khuzina N.A., Polyansky K.K., Derkanosova A.A., Khuzina A.I. On the legal aspects of food nanotechnology **85**

Dolmatova O.I., Makarova D.I. Improving the technology of the fermented milk product "Drinking cottage cheese" **91**

Tkeshelashvili M.E., Bobozhonova G.A., Magomedov G.O. Development of enriched cream masses with modified carbohydrate profiles **97**

Drannikov A.V., Dombrovskaya Y.P., Sukhorukov E.M., Kuligin D.R. Investigation of the drying process of thermolabile products using heat pump technologies **107**

Tugashova L.G. Drying plant management based on exergy criterion and regression methods **114**

Koch Zh.A., Koch D.A., Yeremenko O.N. Development of technology for berry fruit drinks enriched with biologically active substances **123**

Zaytseva L.V., Sotchenko D.Yu., Ignatov A.Yu., Pechnikova Yu.Yu., Baluyan Kh.A., Martirosyan V.V. Study of color characteristics of bakery products made from wheat flour at different baking times **133**

Gizatov A.Y., Gizatova N.V. Application of plant components to improve the structure, flavor and nutritional quality of meat products **142**

Myachikova N.I., Boltenko Yu.A., Zinoveva I.G., Slastnikova YA.A., Frolova L.N., Rodicheva N.V. The development of a formulation and the study of the impact of pumpkin pulp flour on the quality of pancakes **151**

Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Kudaktina T.V., Skalatsky S.V., Belousov V.V., Voron'kova S.P. Chickpea: Functional properties and processing technologies **159**

Bayazitov K.R., Iakovchenko N.V., Antsyperova M.A. Optimization of extraction parameters of biologically active substances from licorice root using the Box-Behnken experimental design method **169**

Ivanov M.S., Iakovchenko N.V., Kravtcova E.V., Shiriaev V.A. Optimization of ultrasound aqueous extraction of phenolic compounds from sea buckthorn berries (*Hippophae rhamnoides L.*) using Box-Behnken design **176**

Chernykh N.A., Gavrilova N.B., Konovalov S.A., Polyansky K.K., Derkanosova A.A., Torshina A.A. Development and research of cottage cheese dessert technology **184**

Petrushov Y.A., Kalatchev S.L. Consumer preferences in the mushroom-based semi-finished products market **192**

Kopylova A.V., Glebova A.A. Approaches to preserving semi-finished custard products **200**

Kovaleva A.E., Pyanikova E.A., Evdokimova O.V., Cheremushkina I.V. Development of the formulation and technology of the Royal cheesecake using oatmeal talkan and rosehip fruit powder **207**

Manzhesov V.I., Churikova S.Y., Hayrapetyan A.A., Yakovleva S.F. Biotech platform for the production of protein concentrate from beans **213**

Bezotosova O.K., Belyaeva M.A. Formation of a mathematical model of the apple drying process **219**
Hayrapetyan A.A., Churikova S.Yu., Manzhesov V.I., Kovaleva T.S. Development and comprehensive quality assessment of combined meatand-vegetable chopped semi-finished functional products **226**

CHEMICAL TECHNOLOGY

Cherepanova V.A., Shirokova E.S., Fomin S.V. Dynamically vulcanized thermoplastic elastomers based on PVDF and BNKS-40 AMN **233**
Pogiba A.Y., Vereshchagin V.Yu., Kondratov A.P. Step-by-step sensor composites for indicating the compression force during joint sealing **243**
Tolstov A.M., Naumova Y.A., Popovskikh E.G., Trusov A.S. Formulation and technological approaches for controlling the morphological structure of foamed elastomeric materials based on EPDM **250**
Nikulina N.S., Nikulin S.S., Vlasova L.A., Misin V.M. Wood modification using ethenylnaphthalene **267**
Dolgin D.S., Vetkin Yu.A., Gudanov I.S., Lebedev A.E., Vatagin A.E., Kholodkova A.I. Designing the drive support units on the cover of the machine with a mechanical mixing device **273**
Filimonova A.A., Vlasova A. Yu., Mayorov E.S., Kamalieva R.F., Filimonov A.A., Chichirova N.D. Development of a laboratory conductometer based on additive technologies and study of the characteristics of ion-selective electrodes made of various electrically conductive components **281**
Yanov V.V., Gataullina L.I., Nosova L.V., Zenitova L.A. Rubber tree seed oil and natural rubber as biodegradable additives in polypropylenebase compositions with a shortened life cycle **291**
Garcia Balderas I., Dolgonosov V.Yu., Zhalybina A.Yu., Rod V.A., Utehin A.N., Konyukhov V.Yu. Method for synthesizing phosphor – silicon oxycarbide **299**
Glebskaya S.A., Gribinichenko T.N., Davletshina M.S., Doronina A.D., Uspenskaya M.V., Olekhnovich R.O. Obtaining and properties of bilayer polyelectrolyte films based on chitosan and sodium hyaluronate **306**

Пищевые системы

Food systems

DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-13-18 Оригинальная статья/Research article

УДК 637.1 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование физико-химических свойств сублимированной метабиотической пищевой системы

Светлана И. Васильева [1] provotorova-svetlana@mail.ru 0009-0006-4734-7361
Маргарита С. Бондарь [1]
Екатерина А. Пожидаева [1] katerina 77707@mail.ru 0000-0001-6763-8875
Евгений С. Попов [1] e_s_popov@mail.ru 0000-0003-3303-3434
Яна А. Дымовских [1] dymovskih.yana@ya.ru 0000-0002-0498-7522
Юлия В. Дурова [1] durova525@mail.ru 0009-0002-1484-3351

1 Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Метабиотические пищевые системы представляют собой комплекс из не жизнеспособных пробиотических микроорганизмов и продуктов их прижизненного метаболизма, которые сохраняют стабильность в широком диапазоне значений pH и температуры. При этом сублимированные метабиотические субстанции имеют неоптимальные физико-химические характеристики, связанные с высокой гигроскопичностью, неудовлетворительной сыпучестью, что затрудняет промышленное применение данных систем. С целью обоснования применения сублимированной метабиотической субстанции в технологии твердых форм и для дальнейшего ее использования в области разработки и производства новой обогащенной биологически активными веществами, специализированной, в том числе диетической, пищевой продукции были изучены физико-химические и технологические характеристики. Анализ показателей сыпучести и угла естественного откоса показал неоптимальные значения для исследуемой метабиотической пищевой формы, численные значения исследуемых параметров составили 2,6 г/с и 35 и 57,5 град, влагосодержание соответствовало величине 14,99%. На основе данных ситового анализа установлено, что исследуема лиофилизированная метабиотическая субстанция является неоднородной, степень измельченности варирует от среднемелкого до очень мелкого, что подтверждается показателями низкой сыпучести. Расчетные значения коэффициентов Хауснера и Карра для метабиотической субстанции составили 2,35 и 57,45, что свидетельствует о недостаточной способности притяжения и сцепления под давлением. В результате экспериментальных испытаний установлено, что исследуемая субстанция имеет неоптимальные технологические свойства, что определяет целесообразность применения технологии влажной грануляции для разработки рациональных форм и последующего применения в пищевой промышленности.

Ключевые слова: метабиотики, технологические свойства, фракционный состав, насыпная плотность, сыпучесть, угол естественного откоса, влагосодержание, твердые формы.

Study of physicochemical properties of sublimated metabiotic food system

Svetlana I. Vasilyeva [1] provotorova-svetlana@mail.ru 0009-0006-4734-7361
Margarita S. Bondar [1]
Ekaterina A. Pozhidaeva [1] katerina 77707@mail.ru 0000-0001-6763-8875
Evgeny S. Popov [1] e_s_popov@mail.ru 0000-0003-3303-3434
Yana A. Dymovskikh [1] dymovskih.yana@ya.ru 0000-0002-0498-7522
Yulia V. Durova [1] durova525@mail.ru 0009-0002-1484-3351

1 Voronezh State University, University Square, 1 Voronezh, 394018, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Metabiotic food systems are a complex of non-viable probiotic microorganisms and products of their lifetime metabolism, which maintain stability in a wide range of pH and temperature values. At the same time, sublimated metabiotic substances have suboptimal physicochemical characteristics associated with high hygroscopicity, unsatisfactory flowability, which complicates the industrial use of these systems. In order to justify the use of sublimated metabiotic substance in the technology of solid forms and for its further use in the development and production of new biologically active substances, specialized, including dietary, food products, physicochemical and technological characteristics were studied. Analysis of the flow and angle of repose parameters showed suboptimal values for the studied metabiotic food form, the numerical values of the studied parameters were 2,6 g/s and 35 and 57,5 degrees, the moisture content corresponded to 14,99%. Based on the sieve analysis data, it was established that the lyophilized metabiotic substance under study is heterogeneous, the degree of grinding varies from medium to very small, which is confirmed by low flowability indicators. The calculated Hausner and Carr coefficients for the metabiotic substance were 2,35 and 57,45, indicating insufficient attraction and adhesion under pressure. As a result of experimental tests, it was established that the substance under study has suboptimal technological properties, which determines the feasibility of using wet granulation technology for the development of rational forms and subsequent use in the food industry.

Keywords: metabiotics, technological properties, fractional composition, bulk density, flowability, angle of repose, moisture content, solid forms.

Для цитирования
Васильева С.И., Бондарь М.С., Пожидаева Е.А., Попов Е.С., Дымовских Я.А., Дурова Ю.В. Исследование физико-химических свойств сублимированной метабиотической пищевой системы // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 13–18. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-13-18

For citation
Vasilyeva S.I., Bondar M.S., Pozhidaeva E.A., Popov E.S., Dymovskikh Y.A., Durova Yu.V. . Study of physicochemical properties of sublimated metabiotic food system. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 13–18. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-13-18

© 2026, Васильева С.И. и др. / Vasilyeva S.I. et al.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Пробиотические пищевые системы, несмотря на высокую терапевтическую эффективность, характеризуются рядом ограничений к применению. Введение живых микроорганизмов сопряжено с определенными рисками, особенно для лиц, имеющих нарушенный состав микрофлоры, слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта. Введение живых бактерий также не рекомендовано для проходящих хирургические вмешательства, а также для детей с дисбактериозом кишечника и дефицитом полезных пробиотических микроорганизмов. В связи с этим актуальным направлением развития пищевых технологий является получение метабиотических комплексов с прогнозируемым физиологическим эффектом на организм человека. Метабиотики представляют собой комплекс из не жизнеспособных пробиотических микроорганизмов и продуктов их прижизненного метаболизма, биологически активных соединений, к которым относятся короткоцепочечные жирные кислоты, экзополисахариды и другие метаболиты. Помимо вышеуказанного, метабиотики могут включать метаболические и секреторные продукты, которые образуются в процессе культивирования и непосредственно перед фазой инактивации. Эти биологически активные продукты включают в себя различные соединения, такие как: витамины, необходимые для ряда метаболических функций, тейхоевую кислоту, которая способствует сохранению целостности клеточных стенок бактерий, бактериоцины, обладающие антимикробными свойствами, ферменты и пептиды, которые жизненно важны для многочисленных биохимических процессов в организме [1–3].

Биологически активные соединения, вырабатываемые пробиотическими микроорганизмами, играют решающую роль в модуляции В-клеточных иммунных ответов. В частности, по результатам ряда исследований подтверждены иммуномодулирующие функции короткоцепочечных жирных кислот. Помимо вышеуказанного, данные кислоты способны стимулировать дифференцирование плазмы В-клеток, модулируя экспрессию генов для выработки антител, таких как IgG и IgA. Дополнительный механизм проявления иммуномодулирующих функций, связан с регулированием активности В-клеток и соотносится с метаболитами триптофана – группой значимых постбиотиков [4, 5].

По ряду исследований подтверждается эффективность метабиотиков в профилактике и лечении различных заболеваний полости рта, таких как кариес зубов, вызванный, в частности, патогеном *Streptococcus mutans*. Помимо вышеуказанного, метабиотики обладают преимуществами перед пробиотиками с точки зрения производства и применения, поскольку метабиотики практически не взаимодействуют с компонентами пищевого матрикса при хранении, что гарантированно пролонгирует срок годности пищевой системы. Метабиотические субстанции сохраняют стабильность в широком диапазоне значений pH и температуры, что позволяет добавлять их в пищевые системы перед тепловой обработкой, а также в продукты с высокой кислотностью. Применение метабиотиков устраняет необходимость в хранении и транспортировке в регулируемых температурных условиях, что снижает себестоимость конечного продукта [6–8].

Метабиотическая терапия основана на введении в пищевые системы одного или нескольких микробиологических метаболитов (короткоцепочечных жирных кислот, метаболитов фенольного происхождения, ферментов, экзополисахаридов, витаминов, ароматических аминокислот, бактериальных лизатов, а также бесклеточных супернатантов, которые содержат секретируемые микробные метаболиты). В частности, противовоспалительное и антиоксидантное действие на эпителиальные клетки кишечника оказывали супернатанты Lactobacillus casei (снижение секреции TNF-α и увеличения секреции IL-10). Научно подтверждена эффективность бутирата – короткоцепочечной жирной кислоты, увеличивающей экспрессию иммуносупрессивных цитокинов и подавляющей некоторые цитокины и провоспалительные рецепторы [9–11].

Безопасность использования, высокая биологическая (в т. ч. антимикробная) активность, уникальная и сложная химическая структура экзополисахаридов наделяют их ценным и значимым потенциалом. В настоящее время экзополисахариды применяют в качестве противоопухолевых, иммуностимулирующих, иммуномодулирующих и антиоксиданстных агентов в фармацевтической промышленности, а также в качестве функциональных компонентов в пищевой промышленности, способствующихулучшению реологических и структурно-механических свойств пищевых систем.

Гидрофильная природа экзополисахаридов позволяет снизить поглощение масла в продукте, что приобретает особенную актуальность для потребителей с повышенным весом, избыточным холестерином, страдающих жировой дистрофией печени и т. д. Экзополисахариды, синтезируемые молочно-кислыми бактериями, оказывают противомикробное и антиоксидантное действие, что увеличивает потенциал

их применения в пищевой промышленности (консервирование, упаковка). В частности, отмечена антибактериальная активность экзополисахаридов, экстрагированных от пробиотических штаммов *Bifidobacterium bifidum* и *Lactiplantibacillus plantarum* в отношении широкого ряда патогенов, включающих *C. sakazakii, E. coli, L. monocytogenes, S. aureus, C. albicans, B. cereus, S. typhimurium, S. sonnei*.

Потенциал промышленного применения экзоплисахаридов основан на использовании последних в качестве загустителей, разрыхлителей, эмульгаторов, стабилизаторов, водосвязывающих, влагоудерживающих, желирующих и придающих вязкость агентов. Применение лабораторно полученных экзополисахаридов в пищевых продуктах может способствовать сокращению использования технологических добавок с сопутствующей оптимизацией производства и удовлетворением запросов потребителей, заинтересованных в здоровом питании [12–15].

Улучшение с помощью экзополисахаридов текстурных и сенсорных характеристик приобретает особенное значение при производстве молочных продуктов с пониженным содержанием жира, а также продуктов с заместительными ингредиентами (молоко растительного происхождения и т. п.) вследствие возможности негативного восприятия данных продуктов потребителем с позиции качества.

Установлено, что синтез влагосвязывающих метаболитов пробиотиками изменяется (активируется) при неблагоприятных условиях окружающей среды, в частности при использовании термической инактивации.

Таким образом, целью работы является изучение физико-химических и технологических свойств сублимированных метабиотических субстанций, для оценки возможности оптимизации свойств и прогнозирования последующего включения в состав различных пищевых форм.

Методы и материалы

В качестве объекта исследования принят консорциум лакто – и бифидобактерий *Str. thermophiles (B-8328), B. bifidum (AC-1579), B. longum (AC-1257), B. adolescentis (AC-1245), L. acidophilus (B-5097), L. plantarum (B-3962), L. fermentum (B-2875)*, предоставленных биоресурсным центром – «Всероссийская коллекция промышленных микроорганизмов» (БРЦ ВКПМ), НИЦ «Курчатовский институт». Культивирование биомассы проводили на обезжиренном молоке в диапазоне температур 38–40 °С до достижения значений титруемой и активной кислотности в диапазоне 86–88°Т и 4,60–4,64 ед. соответственно, нормативное время ферментации составляло 6–8 часов. Концентрация активных клеток в биомассе составляла не менее 10^9 КОЕ/мл. Инактивирование полученной биомассы проводили при температуре 75±2° С с последующей выдержкой в течении 50 мин и охлаждением до 4±2 °С. Вакуум-сублимационную сушку полученной метабиотической субстанции проводили с помощью лиофильной сушилки BK-FD10S.

С целью теоретического обоснования оптимизации свойств метабиотической субстанции для дальнейшего ее использования в разработке рациональной формы ее применения были изучены физико-химические и технологические свойства (содержание влаги, сыпучесть, насыпная масса, плотность, форма и размер частиц, угол естественного откоса, гранулометрический состав) и рассчитаны величины индексов Карра и Хауснера.

Содержание влаги в метабиотической субстанции проводилось в соответствии с требованиями ОФС.1.2.1.0010.15 «Потеря в массе при высушивании» и фармакопеи ЕАЭС 2010220031–2019 «Потеря в массе при высушивании»; определение гранулометрического состава проводилось в соответствии с ОФС.1.4.2.0032 «Ситовой анализ» и фармакопеи ЕАЭС 201100008–2022 «Оценка распределения частиц по размеру методом аналитического просеивания», 201100009–2022 «Измельченность порошков» с помощью стандартных набор сит, соответствующих требования ISO 3310–1, методом механического просеивания; согласно ОФС.1.4.2.0024 «Насыпная плотность и плотность после уплотнения» и фармакопеи ЕАЭС 201100003–2022 «Насыпная плотность и плотность после уплотнения» определяли насыпную плотность методом измерения в градуированном цилиндре; по ОФС.1.4.2.0016 «Сыпучесть порошков» и фармакопеи ЕАЭС 201100001–2022 «Сыпучесть» определяли сыпучесть и угол естественного откоса; форму и размер частиц определяли в соответствие с ОФС.1.2.1.0009 «Оптическая микроскопия» с помощью микроскопа «Биомед».

Результаты и обсуждение

Результаты определения технологических характеристик лиофилизированной метабиотической субстанции, полученные в результате измерений 6 образцов, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Технологические и физико-химические свойства лиофилизированной метабиотической субстанции

Table 1.

Technological and physicochemical properties of lyophilized metabiotic substance

Характеристика | Indicator			Значение | Value
Форма частиц | Particle shape			Равносторонние, пластинчатые Equilateral, lamellar
Поверхность частиц | Particle Surface			Преобладает шероховатая поверхность, но имеются также частицы с гладкой поверхностью без налипаний Rough surface predominates, but there are also particles with a smooth surface without adhesion
Размеры частиц, мм* | Particle sizes, mm*			0,52 x 0,43
Сыпучесть, г/с* | Flowability, g/s*			2,63
Насыпная плотность, г/мл Bulk density, g/ml	Количество соскоков при уплотнении Number of jumps during compaction	0	0,20
		10	0,24
		500	0,34
		1250	0,36
		2500	0,47
Фракционный состав, % Fractional composition, %	Размер частиц, мм Particle size, mm	> 3	0,90
		2–3	0,50
		1–2	6,62
		0,5–1	18,72
		0,2–0,5	39,14
		<0,2	33,90
Угол естественного откоса, град | Slope angle, deg			57,5
Влагосодержание, % | Moisture content, %			14,99
Внутренняя пористость | Internal porosity			2,87
Коэффициент Хауснера | Hausner coefficient			2,35
Коэффициент Карра | Carr coefficient			57,45

** Увеличение микроскопа 10х; * Диаметр воронки – 10 мм*

** Microscope magnification 10x; * Funnel diameter – 10 mm*

Анализируя результаты технологических и физико-химических свойств метабиотической системы можно сделать вывод о низких технологических свойствах субстанции. Сыпучесть составила 2,6 г/сек, при этом не весь порошок самотеком высыпался из воронки прибора, часть его зависала, что соответствует низкой сыпучести. Показатель угла естественного откоса имеет значение 57,5 градусов, что также подтверждает соответствие низкой сыпучести. Результаты ситового анализа отражают, что порошок неоднородный, степень измельченности варьирует от среднемелкого до очень мелкого, что подтверждается показателями низкой сыпучести. Основываясь на определениях насыпной плотности, рассчитаны коэффициенты Карра и Хауснера, по величинам которых оценен показатель прессуемости, как очень плохой. Данные значения информируют о недостаточной способности притяжения и сцепления под давлением за счет слабых молекулярных, адсорбционных, электростатических и механических сил.

На основании полученных результатов исследования установлено, что при дозировании субстанции в любую потребительскую форму (капсулы, таблетки) и движении материала по трубопроводу, как в матричное отверстие таблеточной машины, так и для дозирования в капсулы не представляется возможным без других веществ или изменения технологических характеристик исходного материала.

Заключение

Изучены технологические и физико-химические свойства сублимированной метабиотической субстанции – технологические характеристики оценены как неудовлетворительные, что определяет целесообразность использования метода влажной грануляции для разработки рациональной формы сцелью последующей реализации продукта в виде биологически активных добавок, лечебного питания и других видов продукции.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-26-00369, https://rscf.ru/project/25-26-00369/.

Литература

1 Salminen S., Collado M.C., Endo A. et al. The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics // Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology. 2021. V. 18. № 9. P. 649–667.

2 Sabahi S., Homayouni Rad A., Aghebati-Maleki L. et al. Postbiotics as the new frontier in food and pharmaceutical research // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. V. 63. № 26. P. 8375–8402.

3 Rad A.H., Aghebati-Maleki L., Kafil H.S. et al. Potential pharmaceutical and food applications of postbiotics: A review // Current Pharmaceutical Biotechnology. 2020. V. 21. № 15. P. 1576–1587. doi: 10.2174/1389201021666200516154833

4 Zhao X., Zhang F., Chen Z. et al. Unlocking the power of postbiotics: A revolutionary approach to nutrition for humans and animals // Cell Metabolism. 2024. V. 36. № 4. P. 725–744.

5 Maftei N.M., Bujor A.I., Cojocaru D. et al. The potential impact of probiotics on human health: an update on their health-promoting properties // Microorganisms. 2024. V. 12. № 2. P. 234. doi: 10.3390/microorganisms12020234

6 Fuochi V., Furneri P.M. Applications of probiotics and their potential health benefits // International Journal of Molecular Sciences. 2023. V. 24. № 21. P. 15915. doi: 10.3390/ijms242115915

7 Hijova E. Postbiotics as metabolites and their biotherapeutic potential // International Journal of Molecular Sciences. 2024. V. 25. № 10. P. 5441. doi: 10.3390/ijms25105441

8 Zhou P., Yang D., Zhang B. et al. Recent advances and potentiality of postbiotics in the food industry: Composition, inactivation methods, current applications in metabolic syndrome, and future trends // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. V. 64. № 17. P. 5768–5792. doi: 10.1080/10408398.2022.2158174

9 Shakoor R., Wang T., Zhang Y. et al. Novel strategies for extraction, purification, processing, and stability improvement of bioactive molecules // Journal of Basic Microbiology. 2023. V. 63. № 3-4. P. 276–291. doi: 10.1002/jobm.202200401

10 Prajapati N., Kathad U., Sheth N. et al. Postbiotic production: Harnessing the power of microbial metabolites for health applications // Frontiers in Microbiology. 2023. V. 14. P. 1306192. doi: 10.3389/fmicb.2023.1306192

11 Mishra B., Kumar R., Sahu A.R. et al. Postbiotics: The new horizons of microbial functional bioactive compounds in food preservation and security // Food Production, Processing and Nutrition. 2024. V. 6. P. 56. doi: 10.1186/s43014-023-00200-w

12 Liu C., Liu Z., He Y. et al. From probiotics to postbiotics: Concepts and applications // Animal Research and One Health. 2023. V. 1. № 1. P. 92–114. doi: 10.1002/aro2.7

13 Liang B., Xing D. The current and future perspectives of postbiotics // Probiotics and Antimicrobial Proteins. 2023. V. 15. № 6. P. 1626–1643. doi: 10.1007/s12602-023-10045-x

14 Liu H., Chen W., Zhang W. et al. Progress on Research and Application of Postbiotics // Food Science. 2024. V. 45. № 1. P. 326–333. doi: 10.7506/spkx1002-6630-20221229-272

15 Meena K.K., Sharma S., Sharma M. et al. Comprehensive insights into postbiotics: Bridging the gap to real-world application // Food & Nutrition. 2025. V. 1. № 2. P. 100024. doi: 10.1016/j.fnutr.2025.100024

16 Сорокин О.В., Ильина А.В., Смирнов В.В. Биологическая активность и терапевтический потенциал метабиотиков // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2025. Т. 11. № 2. С. 224–236.

17 Еселевич Р.В., Суров Д.А., Герасимов Д.Г. и др. Сравнительная оценка составов метабиотиков и их показаний к применению у пациентов в острых и хронических критических состояниях // Политравма. 2024. № 4. С. 75–84.

18 Ткаченко Е.И., Дадали В.А. Метабиотики — новое направление эффективной профилактики и лечения заболеваний // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2023. № 12 (220). С. 4–18.

19 Speckmann B., Vulevic J., Klinder A. et al. Exploring substrate–microbe interactions: a metabiotic approach toward developing targeted synbiotic compositions // Gut Microbes. 2024. V. 16. № 1. P. 2305716.

20 Aragón-Rojas S., Quintanilla-Carvajal M.X., Hernández-Sánchez H. Sublimation conditions as critical factors during freeze-dried probiotic powder production // Drying Technology. 2020. V. 38. № 3. P. 333–349.

21 Fan L., Wang Y., Xu X. et al. Effects of different drying methods on the physicochemical properties, antioxidant activity and gut microbiota fermentation behaviours of polysaccharides from Schizophyllum commune // Food Research International. 2025. V. 200. P. 118000.

References

1 Salminen S., Collado M.C., Endo A. et al. The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology. 2021. vol. 18. no. 9. pp. 649–667.

2 Sabahi S., Homayouni Rad A., Aghebati-Maleki L. et al. Postbiotics as the new frontier in food and pharmaceutical research. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. vol. 63. no. 26. pp. 8375–8402.

3 Rad A.H., Aghebati-Maleki L., Kafil H.S. et al. Potential pharmaceutical and food applications of postbiotics: A review. Current Pharmaceutical Biotechnology. 2020. vol. 21. no. 15. pp. 1576–1587. doi: 10.2174/1389201021666200516154833

4 Zhao X., Zhang F., Chen Z. et al. Unlocking the power of postbiotics: A revolutionary approach to nutrition for humans and animals. Cell Metabolism. 2024. vol. 36. no. 4. pp. 725–744.

5 Maftei N.M., Bujor A.I., Cojocaru D. et al. The potential impact of probiotics on human health: an update on their health-promoting properties. Microorganisms. 2024. vol. 12. no. 2. p. 234. doi: 10.3390/microorganisms12020234

6 Fuochi V., Furneri P.M. Applications of probiotics and their potential health benefits. International Journal of Molecular Sciences. 2023. vol. 24. no. 21. p. 15915. doi: 10.3390/ijms242115915

7 Hijova E. Postbiotics as metabolites and their biotherapeutic potential. International Journal of Molecular Sciences. 2024. vol. 25. no. 10. p. 5441. doi: 10.3390/ijms25105441

8 Zhou P., Yang D., Zhang B. et al. Recent advances and potentiality of postbiotics in the food industry: Composition, inactivation methods, current applications in metabolic syndrome, and future trends. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. vol. 64. no. 17. pp. 5768–5792. doi: 10.1080/10408398.2022.2158174

9 Shakoor R., Wang T., Zhang Y. et al. Novel strategies for extraction, purification, processing, and stability improvement of bioactive molecules. Journal of Basic Microbiology. 2023. vol. 63. no. 3-4. pp. 276–291. doi: 10.1002/jobm.202200401

10 Prajapati N., Kathad U., Sheth N. et al. Postbiotic production: Harnessing the power of microbial metabolites for health applications. Frontiers in Microbiology. 2023. vol. 14. p. 1306192. doi: 10.3389/fmicb.2023.1306192

11 Mishra B., Kumar R., Sahu A.R. et al. Postbiotics: The new horizons of microbial functional bioactive compounds in food preservation and security. Food Production, Processing and Nutrition. 2024. vol. 6. p. 56. doi: 10.1186/s43014-023-00200-w

12 Liu C., Liu Z., He Y. et al. From probiotics to postbiotics: Concepts and applications. Animal Research and One Health. 2023. vol. 1. no. 1. pp. 92–114. doi: 10.1002/aro2.7

13 Liang B., Xing D. The current and future perspectives of postbiotics. Probiotics and Antimicrobial Proteins. 2023. vol. 15. no. 6. pp. 1626–1643. doi: 10.1007/s12602-023-10045-x

14 Liu H., Chen W., Zhang W. et al. Progress on Research and Application of Postbiotics. Food Science. 2024. vol. 45. no. 1. pp. 326–333. doi: 10.7506/spkx1002-6630-20221229-272

15 Meena K.K., Sharma S., Sharma M. et al. Comprehensive insights into postbiotics: Bridging the gap to real-world application. Food & Nutrition. 2025. vol. 1. no. 2. p. 100024. doi: 10.1016/j.fnutr.2025.100024

16 Sorokin O.V., Ilyina A.V., Smirnov V.V. Biological activity and therapeutic potential of metabiotics. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. 2025. vol. 11. no. 2. pp. 224–236. (in Russian)

17 Eselevich R.V., Surov D.A., Gerasimov D.G. et al. Comparative assessment of metabiotic compositions and their indications for use in patients in acute and chronic critical conditions. Polytrauma. 2024. no. 4. pp. 75–84. (in Russian)

18 Tkachenko E.I., Dadali V.A. Metabiotics — a new direction for effective prevention and treatment of diseases. Experimental and Clinical Gastroenterology. 2023. no. 12 (220). pp. 4–18. (in Russian)

19 Speckmann B., Vulevic J., Klinder A. et al. Exploring substrate–microbe interactions: a metabiotic approach toward developing targeted synbiotic compositions. Gut Microbes. 2024. vol. 16. no. 1. p. 2305716.

20 Aragón-Rojas S., Quintanilla-Carvajal M.X., Hernández-Sánchez H. Sublimation conditions as critical factors during freeze-dried probiotic powder production. Drying Technology. 2020. vol. 38. no. 3. pp. 333–349.

21 Fan L., Wang Y., Xu X. et al. Effects of different drying methods on the physicochemical properties, antioxidant activity and gut microbiota fermentation behaviours of polysaccharides from Schizophyllum commune. Food Research International. 2025. vol. 200. p. 118000.

Сведения об авторах

Светлана И. Васильева к.фарм.н., доцент, кафедра фармацевтической технологии, Воронежский государственный университет, Университетская площадь, д. 1, г. Воронеж, 394018, Россия, provotorova-svetlana@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-4734-7361

Маргарита С. Бондарь асистент, кафедра фармацевтической технологии, Воронежский государственный университет, Университетская площадь, д. 1, г. Воронеж, 394018, Россия

Екатерина А. Пожидаева к.т.н., доцент, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, katerina 77707@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6763-8875

Евгений С. Попов д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, e_s_popov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3303-3434

Яна А. Дымовских аспирант, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, dymovskih.yana@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-0498-7522

Юлия В. Дурова студент, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, durova525@mail.ru
https://orcid.org/0009-0002-1484-3351

Information about authors

Svetlana I. Vasilyeva Cand. Sci. (Ph.), assistant professor, department of pharmaceutical technology, Voronezh State University, University Square, 1 Voronezh, 394018, Russia, provotorova-svetlana@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-4734-7361

Margarita S. Bondar assistant, department of pharmaceutical technology, Voronezh State University, University Square, 1 Voronezh, 394018, Russia

Ekaterina A. Pozhidaeva Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, department of animal products technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, katerina 77707@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6763-8875

Evgeny S. Popov Dr. Sci. (Engin.), professor, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, e_s_popov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3303-3434

Yana A. Dymovskikh graduate student, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, dymovskih.yana@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-0498-7522

Yulia V. Durova student, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, durova525@mail.ru
https://orcid.org/0009-0002-1484-3351

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 08/12/2025	**После редакции** 25/12/2025	**Принята в печать** 13/01/2026
Received 08/12/2025	**Accepted in revised** 25/12/2025	**Accepted** 13/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-19-25 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.3 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование качественных характеристик масла из орехов ши

Анастасия В. Терёхина [1] gorbatova.nastia@ya.ru 0000-0003-4433-9615
Виктория С. Капустина [1] viktoriyakc@gmail.com 0009-0007-5054-1218

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В данной работе проведено комплексное исследование физико-химических свойств и качества масла из орехов ши с применением стандартизированных лабораторных методов. Эксперимент включал определение показателей окислительной стабильности и свежести, а также анализ жирнокислотного профиля с использованием современных инструментальных методик. Проведённый лабораторный анализ показал, что масло из орехов ши обладает высоким качеством и хорошей сохранностью. Об этом свидетельствует комплекс взаимосвязанных показателей, характеризующих его свежесть и стабильность. Важным показателем свежести сырья является низкое кислотное число – 0,06 мг KOH/г, которое указывает на отсутствие значимого гидролиза жиров и прогорклости. Этот результат согласуется с минимальным содержанием влаги в образце (0,04%), поскольку именно вода обычно выступает катализатором гидролитической порчи и развития микроорганизмов. Выявленные характеристики напрямую связаны с природным жирнокислотным составом, на который указывает йодное число (47,23 г I_2/100 г). Это значение, типичное для масла ши, отражает баланс мононенасыщенных и насыщенных кислот. Такой состав обеспечивает не только твёрдую консистенцию, но и естественную устойчивость к окислению по сравнению с более ненасыщенными маслами. Установленные характеристики подтверждают потенциал масла как функционального сырья для различных отраслей промышленности. В пищевой промышленности, особенно в кондитерской, масло ши может заменить искусственно обработанные жиры в глазурях и начинках, делая продукты натуральнее. Однако его естественный лёгкий ореховый аромат подойдёт не для всех изделий, и иногда его нужно удалять, что удорожает процесс. На основе полученных данных масло ши может быть рекомендовано в качестве натурального ингредиента для косметической, пищевой и фармацевтической продукции, где требуются устойчивость к окислению и улучшенные текстурные свойства.

Ключевые слова: масло ши, физико-химические свойства, окислительная стабильность, жирнокислотный состав, ИК-спектроскопия, газовая хроматография, кислотное число, перекисное число, качественный анализ, химия жиров, растительные масла.

Investigation of the qualitative characteristics of shea butter

Anastasia Terekhina [1] gorbatova.nastia@ya.ru 0000-0003-4433-9615
Victoria S. Kapustina [1] viktoriyakc@gmail.com 0009-0007-5054-1218

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This study presents a comprehensive investigation of the physicochemical properties and quality of shea butter using standardized laboratory methods. The experiment included determining oxidative stability and freshness parameters, as well as analyzing the fatty acid profile using modern instrumental techniques. Laboratory analysis demonstrated that shea butter is of high quality and has a good shelf life. This is evidenced by a set of interrelated parameters characterizing its freshness and stability. A key indicator of raw material freshness is its low acid value (0.06 mg KOH/g), indicating the absence of significant fat hydrolysis and rancidity. This result is consistent with the minimal moisture content in the sample (0.04%), since water typically acts as a catalyst for hydrolytic spoilage and microbial growth. The identified characteristics are directly related to the natural fatty acid composition, as indicated by the iodine value (47.23 g I_2/100 g). This value, typical of shea butter, reflects the balance of monounsaturated and saturated acids. This composition ensures not only a firm consistency but also natural oxidation stability compared to more unsaturated oils. The established characteristics confirm the oil's potential as a functional raw material for various industries. In the food industry, particularly confectionery, shea butter can replace artificially processed fats in glazes and fillings, creating a more natural flavor. However, its naturally light nutty aroma is not suitable for all products, and it sometimes needs to be removed, which increases the cost of the process. Based on these data, shea butter can be recommended as a natural ingredient for cosmetic, food, and pharmaceutical products where oxidation stability and improved textural properties are required.

Keywords: shea butter, physical and chemical properties, oxidative stability, fatty acid composition, IR spectroscopy, gas chromatography, acid number, peroxide number, qualitative analysis, fat chemistry, vegetable oils.

Для цитирования
Терёхина А.В., Капустина В.С. Исследование качественных характеристик масла из орехов ши // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 19–25. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-19-25

For citation
Teryokhina A.V., Kapustina V.S. Investigation of the qualitative characteristics of shea butter. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 19–25. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-19-25

© 2026, Терёхина А.В. и др. / Teryokhina A.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Масло ши, получаемое из орехов африканского дерева *Vitellaria paradoxa*, представляет собой сложную многокомпонентную систему, имеющую стратегическое значение для современной пищевой, косметической и фармацевтической промышленности. Уникальность этого растителжира обусловлена не только его особыми физико-химическими свойствами, но и спецификой сырьевой базы. Дерево ши, произрастающее в саваннах Западной Африки, характеризуется медленным развитием – первое плодоношение наступает только через 12–15 лет, а полной продуктивности дерево достигает к 30–50 годам, при этом продолжая плодоносить в течение 200 лет [4]. Эти ботанические особенности определяют эксклюзивность и высокую стоимость сырья.

Химический состав масла ши отличается сложностью и включает несколько ключевых групп соединений. Основу составляют триглицериды типа SOS (стеаро-олео-стеарин), структурно аналогичные какао-маслу, что обусловливает их совместимость и взаимозаменяемость в кондитерских производствах [1, 7]. Согласно исследованиям [1], содержание твердых триглицеридов демонстрирует выраженную температурную зависимость – от 52,0% при 10 °C до 0,1% при 35 °C, что объясняет уникальные реологические свойства продукта и эффект "тает во рту, а не в руках".

Важной особенностью масла ши является высокое содержание неомыляемых веществ, достигающее 17% в натуральном продукте [2]. Вторичные продукты переработки, согласно исследованиям Барановой З.А. и соавторов [5], могут содержать до 40% неомыляемой фракции, включающей α-токоферол (66%), фитостерины (5,7%) и углеводы (3,5%). Этот комплекс биологически активных веществ определяет антиоксидантные и регенерирующие свойства масла, востребованные в косметологии.

Современная аналитическая база для исследования физико-химических характеристик масла ши включает комплекс традиционных и инструментальных методов. Классические методы анализа, такие как определение кислотного числа по ГОСТ 31933–2012 и перекисного числа по СТБ ГОСТ Р 51487–2001 [2], позволяют оценить базовые показатели качества и стабильности продукта. Эти методики являются обязательными для сертификации и контроля соответствия техническим регламентам.

Инструментальные методы анализа обеспечивают более глубокое понимание состава и свойств масла ши. Газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектированием (GC-MS), применяемая Ашером Адедэджи Санди и коллегами [6], позволяет точно идентифицировать жирнокислотный состав, устанавливая содержание олеиновой (43,2%), стеариновой (24,5%) и линолевой (8,4%) кислот. Метод ядерно-магнитного резонанса, дает возможность изучать кинетику кристаллизации и плавления триглицеридов [1].

Для оценки структурно-механических свойств применяют реологические методы. Томашевич С.Е. и Пчельникова А.В. [2] использовали анализатор текстуры "Brookfield CT3" для измерения твердости жировых начинок, что позволило оптимизировать рецептуры кондитерских изделий. Импедансная спектроскопия, применяемая в дерматологических исследованиях [6], обеспечивает оценку барьерных свойств кожи после нанесения косметических средств на основе масла ши.

Особое значение имеют исследования влияния происхождения и способов переработки на качество конечного продукта. Сравнительный анализ Бава Бабы Муса и соавторов [3] выявил существенные различия между органическим и неорганическим маслом: содержание свободных жирных кислот составило 0,84% против 3,76%, перекисное число – 15,06 против 16,47 ммоль/кг, а содержание неомыляемых веществ – 12,65% против 30,55%. Эти данные подтверждают важность контроля сырьевой базы и технологических параметров.

В кондитерской промышленности масло ши находит разнообразное применение благодаря способности формировать устойчивые жировые системы. Исследования Павловой И.В. и Коблинской М.Б. [7] продемонстрировали возможность создания жировых композиций с ускоренной кристаллизацией – оптимальные образцы содержали 42% POP, 18% StOSt и 6% POSt, что позволяло сократить продолжительность застывания на 60% по сравнению со средней фракцией пальмового масла.

Косметическая промышленность активно использует масло ши благодаря его дерматологическим свойствам. Клинические исследования [6] подтвердили способность масла снижать трансэпидермальную потерю воды на 37,8% и увеличивать гидратацию кожи на 58% в течение 24 часов. Эти эффекты связаны с содержанием фитостеринов и тритерпеновых спиртов, укрепляющих липидный барьер эпидермиса.

Перспективным направлением является разработка импортозамещающих технологий. Барановой З.А. и соавторами [5, 8] предложены методы получения липидных композиций с ланолиноподобными свойствами из вторичных продуктов переработки масла ши, а также созданы аналоги средней фракции пальмового масла на основе промежуточных олеиновых фракций.

Таким образом, комплексное изучение физико-химических характеристик масла ши с применением современных аналитических методов представляет значительный научный и практический интерес. Полученные данные позволяют не только совершенствовать существующие технологии переработки, но и разрабатывать новые направления использования этого ценного растительного сырья в различных отраслях промышленности, обеспечивая его рациональное и эффективное применение.

Материалы и методы

Проведён анализ масла ши, по таким показателям как: кислотное число, влага, анизидиновое число, перекисное число, йодное число, жирно-кислотный состав.

Для определения кислотного числа (опыт № 1) по ГОСТ 31933–2012, были взяты две конические колбы:

– колба № 1 – 16,72 г. масла ши;

– колба № 2 – 50 см^3 изопропилового спирта, 0,5 см^3 фенолфталеина. Для нейтрализации смеси был добавлен раствор NaOH – 0,1 моль/дм^3 до слабовыраженной розовой окраски.

После подготовки к опыту содержимое колб смешивалось и титровалось раствором гидроокиси натрия до слабо-розовой окраски.

Кислотное число рассчитывалось по формуле:

$$X = \frac{5,611VK}{m} \quad (1)$$

В свою очередь, влагу, анизидиновое, перекисное и йодное числа (опыт № 2) определялись на приборе ИК-анализатор MATRIX-I (OPUS/LAB Quant).

Опыт № 3 заключался в анализе жирно-кислотного состава масла из орехов ши. В ходе анализа была выполнена пробоподготовка, включающая превращение триглицеридов в метиловые эфиры жирных кислот.

Навеску масла растворили в гексане, добавили раствор этилата натрия в этаноле, перемешали, отстояли и отфильтровали. Полученный раствор метиловых эфиров использовали для хроматографирования. Перед анализом на газовом хроматографе Agilent 8890 проверили давление газов, включили газо-носители и детектор, установили капиллярную колонку, выполнили проверку на герметичность соединений.

Параметры работы настроили через сенсорный интерфейс: установлен испаритель в режиме без деления потока, программируемый нагрев термостата колонки от низкой стартовой температуры до 250 °C, использован пламенно-ионизационный детектор с поддержанием температуры 300 °C. После стабилизации системы ввели пробу объемом 1 мкл и запустили хроматографирование. Полученные данные обрабатываются с использованием программного обеспечения Agilent, идентифицирование и количественное определение жирных кислот проводилось по временам удерживания и калибровочным графикам.



Рисунок 1. Газовый хроматограф Agilent 8890

Figure 1. Agilent 8890 Gas Chromatograph

Результаты и обсуждение

На основании двух первых опытов была построена таблица с результатами исследования (таблица 1).

Таблица 1.

Результаты проводимых исследований

Table 1.

Results of the conducted research

Опыт	Показатель Indicator	Результат
1	Кислотное число, мг KOH/г Acid value, mg KOH/g	0,06
2	Влага, % | Moisture, %	0,04
	Анизидиновое число Anisidine value	0,8
	Перекисное число, мэкв O_2/кг Peroxide value, meq O_2/kg	2,4
	Йодное число, г I_2/100 г жира Iodine value, g I_2/100 g fat	47,23

Проведённый лабораторный анализ показал, что масло из орехов ши обладает высоким качеством и хорошей сохранностью. Об этом свидетельствует комплекс взаимосвязанных показателей, характеризующих его свежесть и стабильность.

Важным показателем свежести сырья является низкое кислотное число – 0,06 мг KOH/г, которое указывает на отсутствие значимого гидролиза жиров и прогорклости. Этот результат согласуется с минимальным содержанием влаги в образце (0,04%), поскольку именно вода обычно выступает катализатором гидролитической порчи и развития микроорганизмов.

Окислительная стабильность масла, критически важная для его срока годности, также оценивается положительно. Умеренное перекисное число (2,4 ммоль/кг) говорит о начальной, контролируемой стадии окисления. При этом низкое анизидиновое число (0,8) подтверждает, что первичные продукты окисления не успели превратиться во вторичные – альдегиды и кетоны, ответственные за появление неприятного запаха. Таким образом, масло сохраняет свою стабильность и исходные органолептические свойства.

Выявленные характеристики напрямую связаны с природным жирнокислотным составом, на который указывает йодное число (47,23 г I_2/100 г). Это значение, типичное для масла ши, отражает баланс мононенасыщенных и насыщенных кислот. Такой состав обеспечивает не только твёрдую консистенцию, но и естественную устойчивость к окислению по сравнению с более ненасыщенными маслами.

В результате опыта № 3 была получена хроматограмма (рисунок 3) и таблица 2 идентификации пиков.

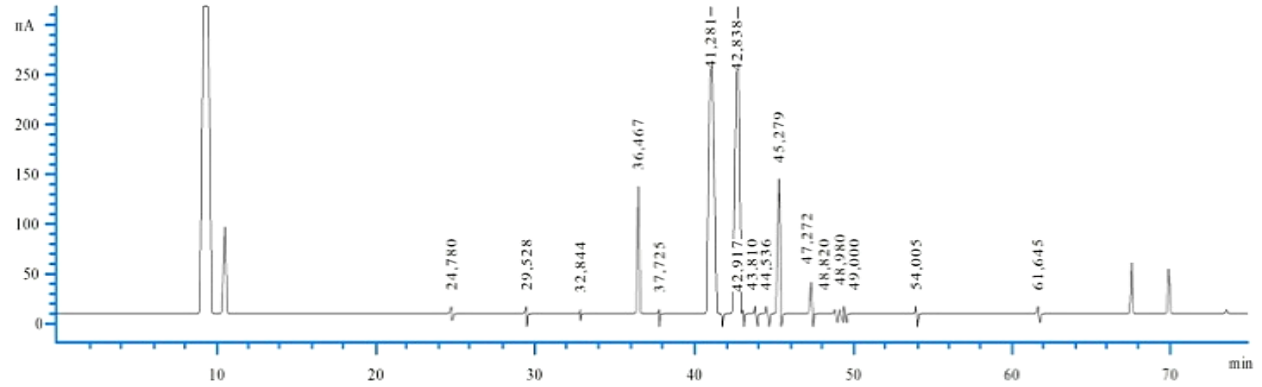


Рисунок 2. Хроматограмма масла ши

Figure 2.Chromatogram of shea butter

Таблица 2.

Идентификация пиков

Table 2.

Peak Identification

Пик	Время возврата, мин	Тип	Ширина, мин	Площадь, пА • с	Высота, пА	Область, %
Основные компоненты смеси						
6	41,281	BB	0,1888	5224,17188	338,97153	42,59304
7	42,838	BV	0,1524	5379,03711	431,67505	43,85566
Минорные компоненты						
4	36,467	BB	0,0613	479,18109	118,30661	3,90680
11	45,279	BB	0,0862	782,83679	126,41104	6,38252
12	47,272	BB	0,0819	168,88814	30,81989	1,37696

После сравнения данных таблицы со стандартными образцами было выяснено, что основными компонентами масла ши являются: 18 : 0 – стеариновая кислота (пик 6), 18: 1 – олеиновая кислота (пик 7), 16: 0 – пальмитиновая кислота (пик 4), 18: 2 – линолевая кислота (пик 11), 20: 0 – арахиновая кислота (пик 12).

Заключение

На основании проведённых опытов можно уверенно сказать, что исследованное масло ши – это качественный и стабильный продукт. Оно соответствует высоким стандартам, о чём говорят полученные цифры: низкое кислотное число показывает, что масло свежее, а небольшое перекисное и анизидиновое числа подтверждают, что оно ещё не начало серьёзно окисляться и не приобрело неприятного запаха. Это напрямую связано с его природным составом, где почти поровну твёрдой стеариновой и жидкой олеиновой кислот, что и определяет его уникальные свойства.

Такие характеристики делают масло ши очень интересным для промышленного использования, особенно там, где ценится натуральность. Например, в косметике оно идеально подходит для создания твёрдых бальзамов и кремов – благодаря своему составу оно плавится от тепла кожи, хорошо впитывается и долго не портится. Правда, как и любое природное сырьё, оно может незначительно различаться от партии к партии, поэтому производителям нужно тщательно проверять каждую поставку.

В пищевой промышленности, особенно в кондитерской, масло ши может заменить искусственно обработанные жиры в глазурях и начинках, делая продукты натуральнее.

Однако его естественный лёгкий ореховый аромат подойдёт не для всех изделий, и иногда его нужно удалять, что удорожает процесс.

Из масла ши также получается отличное твёрдое мыло с хорошей пеной, но для массового производства оно часто оказывается дороже привычных аналогов, например, пальмового масла.

Кроме того, благодаря безопасности и стабильности, подтверждённой в исследовании, это масло перспективно и для фармацевтики – как основа для мазей или свечей. Но здесь путь на рынок сложнее: нужно соблюдать очень строгие стандарты качества и проводить дополнительные испытания.

Таким образом, масло ши – это не просто пищевой или косметический продукт, а многофункциональное сырьё с большим потенциалом. Его использование в промышленности будет расти по мере увеличения спроса на натуральные и устойчивые ингредиенты. Проведённое исследование чётко показывает: такое масло заслуживает внимания производителей, стремящихся создавать современную и качественную продукцию.

Литература

1 Терёхина А.В., Капустина В.С. Исследование содержания твердых триглицеридов в масле из орехов ши // Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений: сб. науч. ст. и докл. XII Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. доц. И.В. Плотниковой. Воронеж: ВГУИТ, 2025. С. 128–131.

2 Томашевич С.Е., Пчельникова А.В. Технология производства молочного шоколада с жировой начинкой на основе масла ши и масла какао // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2024. Т. 17. № 3. С. 24–31.

3 Musah B.B., Kari A.A., Kojo Q.A. et al. Assessment of Quality of Shea Butter Sourced from Organic and Inorganic Fields // Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology. 2019. V. 7. № 12. P. 2042–2046.

4 Мустафаев С.К., Пелипенко Т.В., Кочнева Э.Э. Масло ши: сырье, технология производства, свойства и применение // Известия вузов. Пищевая технология. 2023. № 5–6. С. 6–11.

5 Баранова З.А., Ксандопуло С.Ю., Выскубова Е.Н. Разработка импортозамещающей технологии получения липидной композиции из вторичных продуктов переработки масла ши для косметической промышленности // Известия вузов. Пищевая технология. 2023. № 5–6. С. 73–76.

6 Sunday A.A., Abdullahi A.A., Olawale S.A. Investigation of the in vitro effects of shea butter on skin barrier function and hydration using analytical chemistry methodologies // Prom. J. Chem. 2025. V. 5. № 1. P. 1–7.

7 Павлова И.В., Коблинская М.Б. Изучение возможности ускорения застывания смесей фракций тропических масел на основе 2 олеодинасыщенных триацилглицеринов // Вестник ВНИИЖ. 2023. № 1–2. С. 47–49.

8 Баранова З.А., Красина И.Б., Никонович С.Н., Баранова Е.И. Исследование жировых смесей – аналогов средней фракции пальмового масла // Известия вузов. Пищевая технология. 2021. № 2–3. С. 65–68.

9 ГОСТ 32852–2014. Масла косметические. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 8 с.

10 Желтоухова Е.Ю., Томашевич С.Е., Пчельникова А.В. и др. Исследование процесса производства кондитерского жира со сбалансированным жирнокислотным составом на основе растительных культур // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 139–145.

11 Li L., Yan J.N., Lai B. et al. Rheological properties of chia seed gum extracted by high-speed shearing and its comparison with commercial polysaccharides // Food Hydrocolloids. 2023. V. 144. P. 108936. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108936

12 Garcia e Silva L.L., Alves Bastos R., Souza Lima G.V. et al. Stabilizing properties of chia seed mucilage on dispersions and emulsions at different pHs // Food Biophysics. 2022. V. 17. № 4. P. 568–574.

13 Ofoegbu-Chibuzo N.E., Chukwu U.J., Okoye I.P. Physicochemical analysis and fatty acid content of chemical and traditional extracts of shea kernel (Vitellaria paradoxa) from Kwara State Nigeria // Open Access Library Journal. 2022. V. 9. P. e8295. doi: 10.4236/oalib.1108295

14 Duodu K., Ashong G.W., Ndego A., Kwaansa-Ansah E.E. Investigation on the improvement of shea butter yield and quality through enhanced pre-treatment methods: An analytical study on physicochemical properties // Food Chemistry Advances. 2024. V. 5. P. 100840.

15 Kolawole M.T., Adams M.D., Ibrahim A.T. et al. Qualitative parameters and deterioration kinetics of palm oil, shea butter and their blend use for frying cheese // BMC Biotechnology. 2025. V. 25. № 1. P. 139.

16 Kolawole O.M., Usifo R.O. Physico-chemical characterization of shea butter from Kaima, Western Nigeria // Scientia Africana. 2023. V. 22. № 1. P. 211–218.

17 Oussou K.F., Guclu G., Sevindik O. et al. Comparative elucidation of aroma, key odorants, and fatty acid profiles of Ivorian shea butter prepared by three different extraction methods // Separations. 2022. V. 9. № 9. P. 245. doi: 10.3390/separations9090245

18 Goumbri B.W., Kouassi A.K., Djang'eing'a R.M. et al. Quality characteristics and thermal behavior diversity of traditional crude shea (Vitellaria paradoxa Gaertn) butter from Burkina Faso // Food Biophysics. 2024. V. 19. № 3. P. 609–626.

19 Abdel-Razek A.G., Abo-Elwafa G.A., Al-Amrousi E.F. et al. Effect of refining and fractionation processes on minor components, fatty acids, antioxidant and antimicrobial activities of shea butter // Foods. 2023. V. 12. № 8. P. 1626. doi: 10.3390/foods12081626

20 Goumbri B.W., da Silva T.L.T., Marini R.D. et al. African shea butter properties related to common extraction technologies: a review // Food and Bioprocess Technology. 2022. V. 15. № 2. P. 231–248.

21 Ashiagbor K., Jayan H., Gao S. et al. Recent advances in photoelectric methods application for cooking oil quality and safety evaluation: a review // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2025. V. 105. № 13. P. 6895–6907.

22 Flores M., Avendaño V., Bravo J. et al. Edible oil parameters during deterioration processes // International Journal of Food Science. 2021. V. 2021. № 1. P. 7105170. doi: 10.1155/2021/7105170

References

1 Teryokhina A.V., Kapustina V.S. Study of the Content of Solid Triglycerides in Shea Butter. In: New in the Technology and Technique of Functional Food Products Based on Biomedical Views: Collection of Scientific Articles and Reports of the XII International Scientific and Technical Conference / ed. by Assoc. Prof. I.V. Plotnikova. Voronezh: VSUET, 2025. pp. 128–131. (in Russian).

2 Tomashevich S.E., Pchelnikova A.V. Technology for the Production of Milk Chocolate with a Fat Filling Based on Shea Butter and Cocoa Butter. Food Industry: Science and Technology. 2024. vol. 17. no. 3. pp. 24–31. (in Russian).

3 Musah B.B., Kari A.A., Kojo Q.A. et al. Assessment of Quality of Shea Butter Sourced from Organic and Inorganic Fields. Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology. 2019. vol. 7. no. 12. pp. 2042–2046.

4 Mustafaev S.K., Pelipenko T.V., Kochneva E.E. Shea Butter: Raw Materials, Production Technology, Properties and Application. News of Universities. Food Technology. 2023. no. 5–6. pp. 6–11. (in Russian).

5 Baranova Z.A., Ksandopulo S.Yu., Vyskubova E.N. Development of an Import-Substituting Technology for Obtaining a Lipid Composition from Secondary Products of Shea Butter Processing for the Cosmetic Industry. News of Universities. Food Technology. 2023. no. 5–6. pp. 73–76. (in Russian).

6 Sunday A.A., Abdullahi A.A., Olawale S.A. Investigation of the in vitro effects of shea butter on skin barrier function and hydration using analytical chemistry methodologies. Prom. J. Chem. 2025. vol. 5. no. 1. pp. 1–7.

7 Pavlova I.V., Koblinkskaya M.B. Study of the Possibility of Accelerating the Solidification of Mixtures of Fractions of Tropical Oils Based on 2-Oleodisaturated Triacylglycerols. Bulletin of VNIIZH. 2023. no. 1–2. pp. 47–49. (in Russian).

8 Baranova Z.A., Krasina I.B., Nikonovich S.N., Baranova E.I. Study of Fat Mixtures – Analogues of the Middle Fraction of Palm Oil. News of Universities. Food Technology. 2021. no. 2–3. pp. 65–68. (in Russian).

9 GOST 32852–2014. Cosmetic Oils. General Specifications. Moscow: Standartinform, 2015. 8 p. (in Russian).

10 Zheltoukhova E.Yu., Tomashevich S.E., Pchelnikova A.V. et al. Study of the Production Process of Confectionery Fat with a Balanced Fatty Acid Composition Based on Plant Cultures. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 139–145. (in Russian).

11 Li L., Yan J.N., Lai B. et al. Rheological properties of chia seed gum extracted by high-speed shearing and its comparison with commercial polysaccharides. Food Hydrocolloids. 2023. vol. 144. article 108936. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108936.

12 Garcia e Silva L.L., Alves Bastos R., Souza Lima G.V. et al. Stabilizing properties of chia seed mucilage on dispersions and emulsions at different pHs. Food Biophysics. 2022. vol. 17. no. 4. pp. 568–574.

13 Ofoegbu-Chibuzo N.E., Chukwu U.J., Okoye I.P. Physicochemical analysis and fatty acid content of chemical and traditional extracts of shea kernel (Vitellaria paradoxa) from Kwara State Nigeria. Open Access Library Journal. 2022. vol. 9. article e8295. doi: 10.4236/oalib.1108295.

14 Duodu K., Ashong G.W., Ndego A., Kwaansa-Ansah E.E. Investigation on the improvement of shea butter yield and quality through enhanced pre-treatment methods: An analytical study on physicochemical properties. Food Chemistry Advances. 2024. vol. 5. article 100840.

15 Kolawole M.T., Adams M.D., Ibrahim A.T. et al. Qualitative parameters and deterioration kinetics of palm oil, shea butter and their blend use for frying cheese. BMC Biotechnology. 2025. vol. 25. no. 1. article 139.

16 Kolawole O.M., Usifo R.O. Physico-chemical characterization of shea butter from Kaima, Western Nigeria. Scientia Africana. 2023. vol. 22. no. 1. pp. 211–218.

17 Oussou K.F., Guclu G., Sevindik O. et al. Comparative elucidation of aroma, key odorants, and fatty acid profiles of Ivorian shea butter prepared by three different extraction methods. Separations. 2022. vol. 9. no. 9. article 245. doi: 10.3390/separations9090245.

18 Goumbri B.W., Kouassi A.K., Djang'eing'a R.M. et al. Quality characteristics and thermal behavior diversity of traditional crude shea (Vitellaria paradoxa Gaertn) butter from Burkina Faso. Food Biophysics. 2024. vol. 19. no. 3. pp. 609–626.

19 Abdel-Razek A.G., Abo-Elwafa G.A., Al-Amrousi E.F. et al. Effect of refining and fractionation processes on minor components, fatty acids, antioxidant and antimicrobial activities of shea butter. Foods. 2023. vol. 12. no. 8. Article 1626. doi: 10.3390/foods12081626.

20 Goumbri B.W., da Silva T.L.T., Marini R.D. et al. African shea butter properties related to common extraction technologies: a review. Food and Bioprocess Technology. 2022. vol. 15. no. 2. pp. 231–248.

21 Ashiagbor K., Jayan H., Gao S. et al. Recent advances in photoelectric methods application for cooking oil quality and safety evaluation: a review. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2025. vol. 105. no. 13. pp. 6895–6907.

22 Flores M., Avendaño V., Bravo J. et al. Edible oil parameters during deterioration processes. International Journal of Food Science. 2021. vol. 2021. no. 1. article 7105170. doi: 10.1155/2021/7105170.

Сведения об авторах

Анастасия В. Терёхина к.т.н., доцент, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, gorbatova.nastia@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-4433-9615

Виктория С. Капустина студент, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, viktoriyakc@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-5054-1218

Information about authors

Anastasia Terekhina Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Technology of fats, processes and devices of chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, gorbatova.nastia@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-4433-9615

Victoria S. Kapustina student, Technology of fats, processes and devices of chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, viktoriyakc@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-5054-1218

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 22/01/2026	**После редакции** 02/02/2026	**Принята в печать** 20/02/2026
Received 22/01/2026	**Accepted in revised** 02/02/2026	**Accepted** 20/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-26-31 Оригинальная статья/Research article
УДК 637.146:547.978.1 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Влияние алкалоида берберина на развитие пробиотических микроорганизмов в ферментированных молочных продуктах

Дмитрий О. Каплан [1] do.kaplan2124@omgau.org 0009-0003-7038-939X
Наталья Б. Гаврилова [1] nb.gavrilova@omgau.org 0000-0001-6704-0339
Сергей А. Коновалов [1] sa.konovalov@omgau.org 0000-0003-3537-8081
Анна А. Дерканосова [2] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Константин К. Полянский [2,3] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466

1 Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
3 Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67А, Россия

Аннотация. В настоящее время основной ассортимент функциональных продуктов питания представляют ферментированные молочные продукты. Целью исследования послужила оценка воздействия алкалоида берберина в нативной, а также в инкапсулированной форме на пробиотические свойства молочных продуктов. Применение алкалоида берберина расширяет ассортимент функциональных молочных продуктов питания, но есть вероятность его непредсказуемого влияния на жизнедеятельность пробиотических микроорганизмов. В качестве функционального ингредиента в исследовании использовался алкалоид берберина, который вносили в обезжиренное молоко перед процессом сквашивания. Вносимый алкалоид берберина представлен в нативной порошкообразной форме, а также инкапсулированный в полисахарид β–глюкан. При ферментации использовались следующие закваски: «БК-Углич-ЛД», «БК-Углич-№6» и «Бифилакт-Б». Для проведения оценки влияния используемых в исследовании форм берберина на пробиотические свойства ферментированного молочного продукта определяли содержание пробиотических микроорганизмов согласно стандартной методике в свежеприготовленных образцах, а также по истечению 5 суток хранения. При определении степени воздействия берберина на рост пробиотических микроорганизмов использовался метод масс-спектрометрии лазерной десорбции. Определено положительное влияние нативной порошкообразной и инкапсулированной форм берберина на развитие пробиотических микроорганизмов ферментированного молочного продукта. Результаты исследования помогли установить отсутствие негативного влияния обоих форм алкалоида берберина на развитие пробиотических микроорганизмов в ферментированном молочном продукте. По истечению 5 суток хранения в исследуемых образцах наблюдалось снижение числа пробиотических микроорганизмов, однако в образце с инкапсулированной формой берберина число пробиотиков оставалось на допустимом уровне для функциональных молочных продуктов питания.

Ключевые слова: пробиотики, функциональные молочные продукты, алкалоид, берберин, антагонизм..

The effect of berberine alkaloid on the development of probiotic microorganisms in fermented dairy products

Dmitry O. Kaplan [1] do.kaplan2124@omgau.org 0009-0003-7038-939X
Natalia B. Gavrilova [1] nb.gavrilova@omgau.org 0000-0001-6704-0339
Sergey A. Konovalov [1] sa.konovalov@omgau.org 0000-0003-3537-8081
Anna A. Derkanosova [2] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Konstantin K. Polyansky [2,3] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466

1 Omsk State Agrarian University named after. P.A. Stolypina, st. Institutskaya sq., 1, Omsk, 644008, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia
3 Voronezh Branch of the Plekhanov Russian University of Economics, Karl Marx. 67A, Voronezh, 394030, Russia

Abstract. Currently, the main range of functional food products is fermented dairy products. The aim of the study was to evaluate the effect of the berberine alkaloid in native as well as in encapsulated form on the probiotic properties of dairy products. The use of berberine alkaloid expands the range of functional dairy products, but there is a possibility of its unpredictable effect on the vital activity of probiotic microorganisms. The berberine alkaloid, which was added to skimmed milk before the fermentation process, was used as a functional ingredient in the study. The introduced berberine alkaloid is presented in its native powdered form, as well as beta–glucan encapsulated in the polysaccharide. The following starter cultures were used during fermentation: BK-Uglich-LD, BK-Uglich-No. 6 and Bifilact-B. To assess the effect of the forms of berberine used in the study on the probiotic properties of the fermented dairy product, the content of probiotic microorganisms was determined according to a standard procedure in freshly prepared samples, as well as after 5 days of storage. The method of laser desorption mass spectrometry was used to determine the degree of effect of berberine on the growth of probiotic microorganisms. The positive effect of native powdered and encapsulated forms of berberine on the development of probiotic microorganisms in fermented dairy products has been determined. The results of the study helped to establish the absence of negative effects of both forms of the berberine alkaloid on the development of probiotic microorganisms in fermented dairy products. After 5 days of storage, a decrease in the number of probiotic microorganisms was observed in the studied samples, however, in the sample with the encapsulated form of berberine, the number of probiotics remained at the acceptable level for functional dairy products.

Keywords: probiotics, functional dairy products, alkaloid, berberine, antagonism.

Для цитирования
Каплан Д.О., Гаврилова Н.Б., Коновалов С.А., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Влияние алкалоида берберина на развитие пробиотических микроорганизмов в ферментированных молочных продуктах // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 26–31. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-26-31

For citation
Kaplan D.O., Gavrilova N.B., Konovalov S.A., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. The effect of berberine alkaloid on the development of probiotic microorganisms in fermented dairy products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 26–31. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-26-31

© 2026, Каплан Д.О. и др. / Kaplan D.O. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В настоящее время наблюдается положительная тенденция роста ассортимента ферментированных молочных продуктов питания за счёт активного использования пробиотических микроорганизмов. Согласно государственным нормативным документам в сфере продовольственной безопасности пробиотики – это полезные для человеческого организма непатогенные живые микроорганизмы, обеспечивающие развитие полезной микрофлоры кишечника человека [1]. Оптимальное количество пробиотических микроорганизмов способствует созданию резистентной микробиоты, которая является антагонистом патогенных микроорганизмов.

В классификации биотиков выделяют пробиотики, пребиотики, синбиотики, метабиотики, постбиотики и психобиотики [2]. Наиболее распространённые микроорганизмы в качестве пробиотиков – это штаммы, принадлежащие к родам *Bifidobacterium, Lactobacillus, Lactococcus, Streptococcus, Bacillus и др*. Установлены также пробиотические свойства у некоторых штаммов дрожжей, в том числе *Saccharomyces boulardii*, а также *Clostridium butyricum*. По данным Института питания РАМН, наиболее распространённым источником пробиотиков являются молочные продукты. Такое предпочтение молочному сырью отдано из-за состава молока, которое является благоприятной средой для роста и активности пробиотических микроорганизмов.

Расширение ассортимента ферментированных молочных продуктов возможно за счёт обогащения алкалоидами, одним из таких является берберин. Однако, использование берберина в качестве функционального ингредиента, может непредсказуемо влиять на рост пробиотических микроорганизмов. Ряд литературных источников предоставляют данные о влиянии берберина на развитие пробиотиков. В некоторых исследованиях демонстрируется роль берберина в улучшении пробиотических свойств, также есть данные об отсутствии влияния берберина на рост пробиотических микроорганизмов [3–4].

Ряд учёных в своих научных работах указывают на эффективность технологии инкапсуляции как эффективный метод улучшения пробиотических свойств алкалоидов [5–8]. Цель данного исследования – это определение влияния алкалоида берберина в исходном и инкапсулированном виде на пробиотические свойства молочных продуктов.

Материалы и методы

При получении пробиотического молочного продукта использовалось обезжиренное пастеризованное молоко производства «ВНИМИ-Сибирь» г. Омск, Россия.

Для осуществления процесса заквашивания использовались закваски:

– «БК-Углич– № 6» в составе: *Lactococcus lactis subsp. cremoris*, *Lactococcus lactis subsp. lactis, Leuconostoc mesenteroides ssp. cremoris, Lactococcus lactis subsp. diacetylactis;*

– «Бифилакт-Б» в составе: *Bifidobacterium bifidum*, производства «Экспериментальной биофабрики ВНИИМС Россельхозакадемии», г. Углич, Россия.

При фортификации молочного продукта использовался алкалоид берберина, который вносили в обезжиренное молоко перед процессом сквашивания. В процессе исследования были использованы две формы берберина:

– порошкообразного, производства «ЮНИЭКО» г. Москва, Россия;

– берберин, инкапсулированный в β–глюкан разработанный на кафедре продуктов питания и пищевой биотехнологии Омского ГАУ.

Количество вносимой закваски в расчёте на объём обезжиренного молока в процессе получения ферментированного продукта выполнялось согласно рекомендации производителя, объём вносимого берберина определялся согласно ГОСТ 55577–2013 [3]. Процесс сквашивания молока происходил в условиях термостата (при температуре 30 °С) в течение 8 часов, с последующими технологическими операциями для получения биотворога, исходя из этого, составлен перечень объектов исследования представленных на рисунке 1.

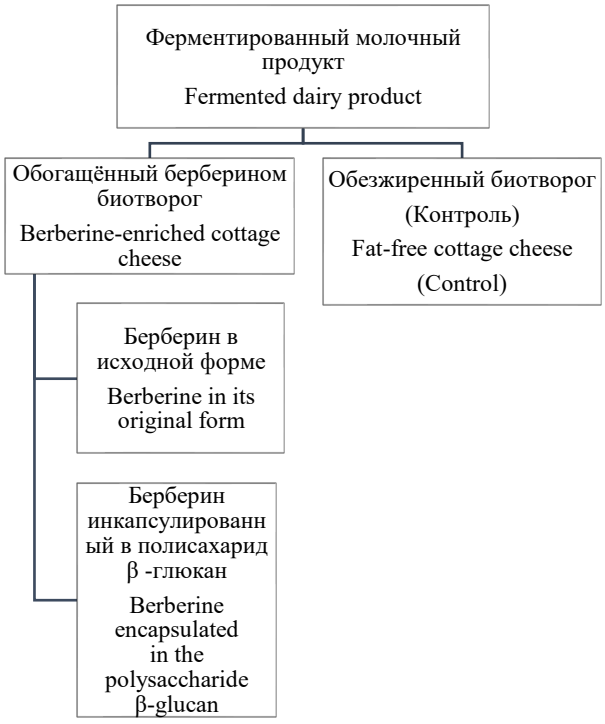


Рисунок 1. Объекты исследования

Figure 1. Objects of research

Полученные ферментированные молочные продукты биотворог и фортифицированный алкалоидом берберином биотворог исследовались следующими методами:

– оценка количественного содержания пробиотических микроорганизмов по методу наиболее вероятного числа (КОЕ/г) согласно ГОСТ Р 56139–2014[2];

– анализ степени воздействия берберина на рост пробиотических микроорганизмов производился с использованием метода масс-спектрометрии лазерной десорбции (MALDI). Данный метод позволяет проанализировать реакцию пробиотических микроорганизмов на присутствие алкалоида берберина, путём дифференциации экспрессируемых белков.

Исследуемые показатели определяли в свежеприготовленных опытных образцах и по истечению 5 суток хранения при температуре 4 ± 1 °С.

Результаты и обсуждение

В соответствии требованиям действующей нормативной технической документации содержание пробиотических микроорганизмов в функциональном молочном продукте регламентируется в количестве не менее 10^6 КОЕ/г, для бифидобактерий – не менее 5×10^8 КОЕ/г в суточном потреблении. Неотъемлемой частью технологического процесса является осуществление жизнеспособности пробиотических микроорганизмов в течение срока хранения ферментированного молочного продукта. Полученные результаты количественного содержания пробиотческих микроорганизмов в изготовленных опытных образцах представлены на рисунке 2.

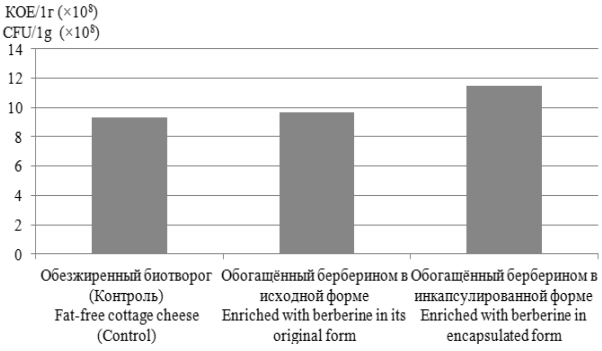


Рисунок 2. Количественное содержание пробиотических микроорганизмов в полученных опытных образцах

Figure 2. Quantitative content of probiotic microorganisms in the obtained experimental samples

Полученные результаты содержания пробиотических микроорганизмов в исследуемых образцах свидетельствуют о том, что количество пробиотиков соответствует требованиям нормативной документации. Между тем, полученные результаты помогают проанализировать минимальную степень влияния нативного порошкообразного берберина на количество пробиотических микроорганизмов, это обусловлено отсутствием необходимого субстрата для питания микробиоты, так как исходя из научных исследований эффективность берберина в купе с пробиотическими микроорганизмами связана с его способностью подавлять патогенную микрофлору человека, тем самым увеличение числа пробиотических микроорганизмов минимально [9–12]. Наиболее высокое количественное значение пробиотических микроорганизмов наблюдается в образце фортифицированном берберином инкапсулированным в β–глюкан. Применение полисахарида β–глюкана способствовало значительному росту числа пробиотических микроорганизмов, что обусловлено наличием дополнительной питательной среды.

При разработке и производстве пробиотических функциональных молочных продуктов особенную роль играет возможность сохранения пробиотических свойств в процессе срока регламентированного хранения. Для оценки количественного содержания пробиотических микроорганизмов в ферментированном молочном продукте после периода хранения в 5 суток при температуре 4 ± 1 °С, проведён повторный анализ, результаты которого представлены на рисунке 3.

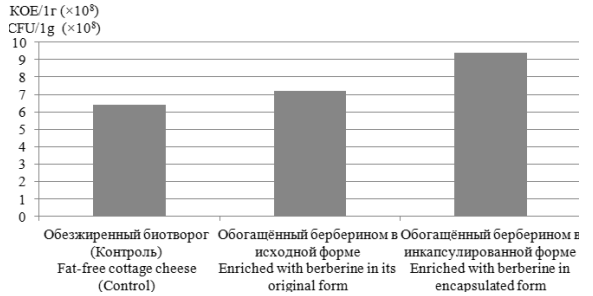


Рисунок 3. Количественное содержание пробиотических микроорганизмов в опытных образцах по истечению 5 суток хранения

Figure 3. Quantitative content of probiotic microorganisms in experimental samples after 5 days of storage

Полученные данные представленные на рисунке 3 свидетельствуют, что по истечении срока хранения число пробиотических микроорганизмов для всех опытных образцов снизилось, но осталось в допустимой норме. Так, для контрольного образца произошло снижение с $9{,}3\times10^8$ КОЕ/г до $6{,}4\times10^8$ КОЕ/г, для образца обогащённого исходной формой берберина снижение составило с $9{,}7\times10^8$ КОЕ/г до $7{,}2\times10^8$ КОЕ/г, однако само минимальное снижение наблюдается у опытного образца фортифицированного берберином в инкапсулированной форме – с $1{,}1\times10^9$ КОЕ/г до $9{,}4\times10^8$ КОЕ/г.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, о том, что, использование инкапсулированной формы берберина способствовало минимальному уменьшению числа пробиотических микроорганизмов в сравнении с другими образцами, за счёт присутствия полисахарида β–глюкана в двойной оболочке микрокапсулы, который создал благоприятную среду для развития и сохранения жизнеспособности пробиотических микроорганизмов закваски.

Неотъемлемой задачей исследования служила оценка цитотоксичности алкалоида берберина на пробиотическую микрофлору закваски. Для этого проведён анализ масс-спектрометрии лазерной десорбции «MALDI». Исследуемые образцы помещались на матрицу для определения стресс-белков выделяемых пробиотическими микроорганизмами после добавления алкалоида берберина, тем самым определялась степень влияния алкалоида на жизнедеятельность микроорганизмов закваски. Анализ проводился на масс-спектрометре «NUCMASS 2000» в диапазоне масс от 3000 до 10000 Да, результаты исследования сведены в общую диаграмму, где величина цитотоксичности выражена в процентном исчислении по соотношению исследуемых образцов к референтным спектрам белков штаммов микроорганизмов из базы данных S.A.R.A.M.I.S.^{TM}, полученные результаты представлены на рисунке 4.

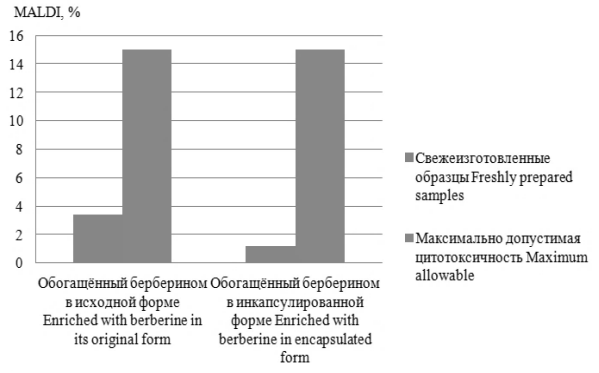


Рисунок 4. Исследование влияния алкалоида берберина на жизнедеятельность пробиотических микроорганизмов

Figure 4. Study of the effect of berberine alkaloid on the vital activity of probiotic microorganisms

Интерпретация полученных результатов указывает на минимальную цитотоксичноть берберина 3,4% для нативной формы и 1,2% для инкапсулированной формы берберина в отношении пробиотических микроорганизмов на всех этап проведения эксперимента. Цитотоксичность определяет степень воздействия алкалоида берберина на жизнедеятельность пробиотических микроорганизмов, согласно нормативным документам, данная величина не должна превышать 30% [4]. Исходя из полученных данных, можно установить, что инкапсулированная форма берберина на 2,2% менее вызывает цитотоксичность, что способствует сохранению пробиотической ценности ферментированного молочного продукта.

Заключение

Исходя из вышеперечисленной информации можно сделать вывод о том, что применение алкалоида берберина в инкапсулированной форме значительно увеличивает рост колониеобразующих пробиотических микроорганизмов за счёт использования в структуре микрокапсулы полисахарида β–глюкана. Также установлено, что использование инкапсулированной формы берберина позволяет увеличить время жизнедеятельности пробиотических микроорганизмов во время всего срока годности продукта, что способствует сохранению пробиотических свойств ферментированного молочного продукта в течение всего нормированного срока хранения. Низкая цитотоксичность берберина указывает на отсутствие отрицательного воздействия на пробиотические микроорганизмы, тем самым также сохраняется пробиотическая польза фортифицированного молочного продукта питания.

Для более подробного понимания воздействия алкалоида берберина на пробиотическую микрофлору необходимо добавить в исследование дополнительные штаммы микроорганизмов. Это позволит определить воздействие берберина на жизнедеятельность пробиотических микроорганизмов, установить наличие симбиотических или антагонистических взаимодействий с другими культурами микроорганизмов в составе заквасок.

Литература

1 Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20 (ред. от 10.03.2025). URL: http://pravo.gov.ru (дата обращения: 03.03.2026).

2 Асафов В.А., Танькова Н.Л., Искакова Е.Л., Добриян Е.И. Специализированные пищевые продукты функционального назначения // Идеи академика Владимира Дмитриевича Харитонова в наукоемких технологиях переработки молока. М.: ВНИИМП, 2021. С. 41–61.

3 Еремеева Н.Б. Методы исследования пищевых продуктов. СПб.: Университет ИТМО, 2022. 131 с.

4 О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания: ТР ТС 027/2012: принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 15 июня 2012 г. № 34. URL: https://docs.eaeunion.org (дата обращения: 03.03.2026).

5 Zhang L., Wu X., Yang R. et al. Effects of Berberine on the Gastrointestinal Microbiota // Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. 2021. V. 10. P. 588517. doi: 10.3389/fcimb.2020.588517

6 Devarajan A., Mudgil P., Aldhaheri F. et al. Camel milk-derived probiotic strains encapsulated in camel casein and gelatin complex microcapsules: stability against thermal challenge and simulated gastrointestinal digestion conditions // Journal of Dairy Science. 2022. V. 105. № 3. P. 1862–1877. doi: 10.3168/jds.2021-20847

7 Prestes A.A., Verruck S., Vargas M.O. et al. Influence of guabiroba pulp (Campomanesia xanthocarpa O. Berg) added to fermented milk on probiotic survival under in vitro simulated gastrointestinal conditions // Food Research International. 2021. V. 141. P. 110135. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110135

8 Wijesekara A., Weerasingha V., Jayarathna S., Priyashantha H. Quality parameters of natural phenolics and its impact on physicochemical, microbiological, and sensory quality attributes of probiotic stirred yogurt during the storage // Food Chemistry: X. 2022. V. 14. P. 100332. doi: 10.1016/j.fochx.2022.100332

9 Usaga J., Barahona D., Arroyo L., Esquivel P. Probiotics survival and betalains stability in purple pitaya (Hylocereus sp.) juice // NFS Journal. 2022. V. 27. P. 47–53. doi: 10.1016/j.nfs.2022.04.001

10 Silva M.P., Martelli-Tosi M., Massarioli A.P. et al. Co-encapsulation of guaraná extracts and probiotics increases probiotic survivability and simultaneously delivers bioactive compounds in simulated gastrointestinal fluids // LWT. 2022. V. 161. P. 113351. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113351

11 Yang S., Yan D., Zou Y. et al. Fermentation temperature affects yogurt quality: A metabolomics study // Food Bioscience. 2021. V. 42. P. 101104. doi: 10.1016/j.fbio.2021.101104

12 Suez J., Zmora N., Segal E. et al. The pros, cons, and many unknowns of probiotics // Nature Medicine. 2019. V. 25. № 5. P. 716–729. doi: 10.1038/s41591-019-0439-x

13 Бурак Л.Ч., Завалей А.П., Сапач А.Н. Влияние современных технологий обработки на эффективность пробиотиков и пребиотиков в пищевых продуктах // The Scientific Heritage. 2023. № 122. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-sovremennyh-tehnologiy-obrabotki-na-effektivnost-probiotikov-i-prebiotikov-v-pischevyh-produktah (дата обращения: 03.03.2026).

14 Дмитрук Е.М., Ефимова Е.В., Вырина С.И. Технологические особенности производства жидких молочных продуктов из комбинированного молочного сырья различных видов сельскохозяйственных животных // Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2021. № 15. С. 94–103. doi: 10.47612/2220-8755-2020-15-94-103

15 Ходжиева Г.У., Бурханова Г.Х. Обогащение молочных продуктов натуральными добавками и свойства фруктовых молочных напитков // Экономика и социум. 2025. № 5-2 (132). С. 1582–1585.

16 Юсупов М.М. Алкалоиды berberis XV. Изучение строения нового алкалоида // Экономика и социум. 2024. № 9 (124). С. 904–907.

17 Коновалов С.А., Рыбченко Т.В., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Повышение экономической эффективности использования растительных компонентов при производстве молочных продуктов в современных условиях производства // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 70–79. doi: 10.20914/2310-1202-2025-4-70-79

18 Макеева И.А., Стратонова Н.В., Пряничникова Н.С., Белякова З.Ю. Российские молочные продукты: эволюция идентификации // Известия вузов. Пищевая технология. 2021. № 2-3 (380-381). С. 10–13. doi: 10.26297/0579-3009.2021.2-3.2

19 Anjum V., Kadi A.M.Y., Potoroko I.Y. Berberine in emulsions: possibilities to stimulate GABA production in yogurt // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2024. Т. 12. № 3. С. 12–21.

20 Shori A.B., Al Zahrani A.J. Non-dairy plant-based milk products as alternatives to conventional dairy products for delivering probiotics // Ciência e Tecnologia de Alimentos. 2022. V. 42. P. e101321. doi: 10.1590/fst.101321

21 Kumar D., Lal M.K., Dutt S. et al. Functional Fermented Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics from Non-Dairy Products: A Perspective from Nutraceutical // Molecular Nutrition and Food Research. 2022. V. 66. № 14. P. 2270037. doi: 10.1002/mnfr.202270037

22 Ali Md.A., Kamal Md.M., Rahman Md.H. et al. Functional dairy products as a source of bioactive peptides and probiotics: current trends and future prospectives // Journal of Food Science and Technology. 2022. V. 59. № 4. P. 1263–1279. doi: 10.1007/s13197-021-05091-8

References

1 On the Approval of the Doctrine of Food Security of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation dated January 21, 2020 No. 20 (as amended on March 10, 2025). Available at: http://pravo.gov.ru (accessed: 03.03.2026) (in Russian).

2 Asafov V.A., Tankova N.L., Iskakova E.L., Dobriyan E.I. Specialized Functional Food Products. In: Ideas of Academician Vladimir Dmitrievich Kharitonov in High-Tech Technologies of Milk Processing. Moscow: VNIIMP, 2021. pp. 41–61. (in Russian).

3 Eremeeva N.B. Methods of Food Research. Saint Petersburg: ITMO University, 2022. 131 p. (in Russian).

4 On Safety of Certain Types of Specialized Food Products, Including Dietary Therapeutic and Dietary Preventive Nutrition: TR CU 027/2012: Adopted by the Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission dated June 15, 2012 No. 34 (as amended on May 10, 2024). Available at: https://docs.eaeunion.org (accessed: 03.03.2026) (in Russian).

5 Zhang L., Wu X., Yang R. et al. Effects of Berberine on the Gastrointestinal Microbiota. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. 2021. vol. 10. article 588517. doi: 10.3389/fcimb.2020.588517.

6 Devarajan A., Mudgil P., Aldhaheri F. et al. Camel milk-derived probiotic strains encapsulated in camel casein and gelatin complex microcapsules: stability against thermal challenge and simulated gastrointestinal digestion conditions. Journal of Dairy Science. 2022. vol. 105. no. 3. pp. 1862–1877. doi: 10.3168/jds.2021-20847.

7 Prestes A.A., Verruck S., Vargas M.O. et al. Influence of guabiroba pulp (Campomanesia xanthocarpa O. Berg) added to fermented milk on probiotic survival under in vitro simulated gastrointestinal conditions. Food Research International. 2021. vol. 141. article 110135. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110135.

8 Wijesekara A., Weerasingha V., Jayarathna S., Priyashantha H. Quality parameters of natural phenolics and its impact on physicochemical, microbiological, and sensory quality attributes of probiotic stirred yogurt during the storage. Food Chemistry: X. 2022. vol. 14. article 100332. doi: 10.1016/j.fochx.2022.100332.

9 Usaga J., Barahona D., Arroyo L., Esquivel P. Probiotics survival and betalains stability in purple pitaya (Hylocereus sp.) juice. NFS Journal. 2022. vol. 27. pp. 47–53. doi: 10.1016/j.nfs.2022.04.001.

10 Silva M.P., Martelli-Tosi M., Massarioli A.P. et al. Co-encapsulation of guaraná extracts and probiotics increases probiotic survivability and simultaneously delivers bioactive compounds in simulated gastrointestinal fluids. LWT. 2022. vol. 161. article 113351. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113351.

11 Yang S., Yan D., Zou Y. et al. Fermentation temperature affects yogurt quality: A metabolomics study. Food Bioscience. 2021. vol. 42. article 101104. doi: 10.1016/j.fbio.2021.101104.

12 Suez J., Zmora N., Segal E. et al. The pros, cons, and many unknowns of probiotics. Nature Medicine. 2019. vol. 25. no. 5. pp. 716–729. doi: 10.1038/s41591-019-0439-x.

13 Burak L.Ch., Zavalei A.P., Sapach A.N. Influence of Modern Processing Technologies on the Effectiveness of Probiotics and Prebiotics in Food Products. The Scientific Heritage. 2023. no. 122. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-sovremennyh-tehnologiy-obrabotki-na-effektivnost-probiotikov-i-prebiotikov-v-pischevyh-produktah (accessed: 03.03.2026) (in Russian).

14 Dmitruk E.M., Efimova E.V., Vyrina S.I. Technological Features of the Production of Liquid Dairy Products from Combined Milk Raw Materials of Various Types of Farm Animals. Current Issues in the Processing of Meat and Dairy Raw Materials. 2021. no. 15. pp. 94–103. doi: 10.47612/2220-8755-2020-15-94-103 (in Russian).

15 Khodzhieva G.U., Burkhanova G.Kh. Enrichment of Dairy Products with Natural Additives and Properties of Fruit Dairy Drinks. Economy and Society. 2025. no. 5-2 (132). pp. 1582–1585. (in Russian).

16 Yusupov M.M. Alkaloids of berberis XV. Study of the Structure of a New Alkaloid. Economy and Society. 2024. no. 9 (124). pp. 904–907. (in Russian).

17 Konovalov S.A., Rybchenko T.V., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. Increasing the Economic Efficiency of Using Plant Components in the Production of Dairy Products in Modern Production Conditions. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 70–79. doi: 10.20914/2310-1202-2025-4-70-79 (in Russian).

18 Makeeva I.A., Stratonova N.V., Pryanichnikova N.S., Belyakova Z.Yu. Russian Dairy Products: Evolution of Identification. News of Universities. Food Technology. 2021. no. 2-3 (380-381). pp. 10–13. doi: 10.26297/0579-3009.2021.2-3.2 (in Russian).

19 Anjum V., Kadi A.M.Y., Potoroko I.Y. Berberine in emulsions: possibilities to stimulate GABA production in yogurt. Bulletin of SUSU. Series: Food and Biotechnology. 2024. vol. 12. no. 3. pp. 12–21. (in Russian).

20 Shori A.B., Al Zahrani A.J. Non-dairy plant-based milk products as alternatives to conventional dairy products for delivering probiotics. Ciência e Tecnologia de Alimentos. 2022. vol. 42. article e101321. doi: 10.1590/fst.101321.

21 Kumar D., Lal M.K., Dutt S. et al. Functional Fermented Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics from Non-Dairy Products: A Perspective from Nutraceutical. Molecular Nutrition and Food Research. 2022. vol. 66. no. 14. article 2270037. doi: 10.1002/mnfr.202270037.

22 Ali Md.A., Kamal Md.M., Rahman Md.H. et al. Functional dairy products as a source of bioactive peptides and probiotics: current trends and future prospectives. Journal of Food Science and Technology. 2022. vol. 59. no. 4. pp. 1263–1279. doi: 10.1007/s13197-021-05091-8.

Сведения об авторах

Дмитрий О. Каплан аспирант, кафедра продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А, Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия, do.kaplan2124@omgau.org
https://orcid.org/0009-0003-7038-939X

Наталья Б. Гаврилова д.т.н., профессор, кафедра продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А, Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия, nb.gavrilova@omgau.org
https://orcid.org/0000-0001-6704-0339

Сергей А. Коновалов к.т.н., доцент, кафедра продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А, Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия, sa.konovalov@omgau.org
https://orcid.org/0000-0003-3537-8081

Анна А. Дерканосова д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, ул. Революции, 19, г. Воронеж, 394030, Россия, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнеса, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67А, г. Воронеж, 394030, Россия, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Information about authors

Dmitry O. Kaplan Graduate student, food and food biotechnology department, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Square, 1, Omsk, 644008, Russia, do.kaplan2124@omgau.org
https://orcid.org/0009-0003-7038-939X

Natalia B. Gavrilova Doctor of Engineering Sciences, professor, food and food biotechnology department, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Square, 1, Omsk, 644008, Russia, nb.gavrilova@omgau.org
https://orcid.org/0000-0001-6704-0339

Sergey A. Konovalov PhD, Associate Professor, engineer, food and food biotechnology department, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Square, 1, Omsk, 644008, Russia, sa.konovalov@omgau.org
https://orcid.org/0000-0003-3537-8081

Anna A. Derkanosova Dr. Sci.(Engin) professor, Department restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue,19, Voronezh, 394030, Russia, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci.(Engin) professor, Department of Management of socio-economic systems and business processes department, Voronezh branch of the Plekhanov Russian University of Economics, Karl Marx, st., 67A, Voronezh, 394030, Russia, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/11/2025	**После редакции** 18/12/2025	**Принята в печать** 20/01/2026
Received 01/11/2025	**Accepted in revised** 18/12/2025	**Accepted** 20/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-32-39 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.8.047 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка поликомпонентных чипсов путем рационального использования растительного сырья

Злата Ю. Родина [1] rodina.zlata.96@mail.ru 0009-0008-0478-251X
Ольга В. Перфилова [1] perfolgav@mail.ru 0000-0002-9186-7405
Анна А. Дерканосова [2] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Константин К. Полянский [2, 3] mto.vrn@mail.ru 0000-002-8817-1466

1 Мичуринский государственный аграрный университет, ул. Интернациональная, 101, г. Мичуринск, 393760, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
3 Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. В современном ритме жизни в качестве перекуса часто предпочтение потребителя отводится такому виду снека, как чипсы. При этом назрела необходимость обогащения чипсов макро- и микронутриентами, из-за несбалансированности их химического состава, и следуя принципам здорового питания. Целью работы явилась разработка рецептурной композиции поликомпонентных чипсов на основе рационального использования яблочных выжимок в сочетании с пюре из черноплодной рябины, мукой овсяной и порошком из травы зверобоя. Для подготовки яблочных выжимок предложено новое технологическое решение, заключающееся в их последовательном бланшировании, протирании для получения пюре и вытерок, последние сушатся и измельчаются в порошок, который смешивается с готовым пюре. Опытные рецептуры чипсов включали в себя смесь пюре яблочного с рябиновым в пропорциях 80:20, 70:30, 60:40 и 50:50, овсяную муку в дозировке от 5 до 20% и порошок из травы зверобоя – 1%. Выявлено снижение влажности смеси для чипсов с увеличением дозировки рябинового пюре и овсяной муки, при этом наблюдался рост вязкости. Заготовки чипсов высушивали инфракрасно-конвективным способом при температуре 50-55 °С до влажности 8%. Установлено, что дозировка рябинового пюре в количестве 30% обеспечивает достижение максимальной хрупкости чипсов – 0,23 кг/см^2. С повышением доли во фруктово-ягодной массе рябинового пюре с 20 до 50% отмечается значительный рост суммарного содержания антиоксидантов, из-за большего содержания водорастворимых антиоксидантов в рябиновом пюре. Наилучшее качество обеспечивается при соотношении в рецептуре чипсов пюре из яблочных выжимок и рябинового равном 70:30, доле овсяной муки и порошка из травы зверобоя 10 и 1% к фруктово-ягодной массе, при которых антиоксидантная ценность (по кверцетину) готовых изделий составила 341,32 мг/100 г (371 мг/100 г с.в.).

Ключевые слова: яблочные выжимки, черноплодная рябина, мука овсяная, трава зверобоя, чипсы, антиоксиданты.

Development of multi-component chips through the rational use of plant-based raw materials

Zlata Yu. Rodina [1] rodina.zlata.96@mail.ru 0009-0008-0478-251X
Olga V. Perfilova [1] perfolgav@mail.ru 0000-0002-9186-7405
Anna A. Derkanosova [2] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Konstantin K. Polyansky [2, 3] mto.vrn@mail.ru 0000-002-8817-1466

1 Michurinsk State Agrarian University, Internatsionalnaya st., 101Tambov region, Michurinsk, 393760, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
3 Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia

Abstract. In today's hectic lifestyle, chips are often a popular snack choice. However, due to their imbalanced chemical composition, there is a pressing need to enrich chips with macro- and micronutrients, in line with healthy eating principles. The aim of this study was to develop a multi-component chip formulation based on the rational use of apple refuse combined with chokeberry puree, oat flour, and St. John's wort powder. A new technological solution was proposed for preparing the apple refuse, which involves sequentially blanching, straining, and pureeing. The resulting pulp is then dried and ground into a powder, which is then mixed with the finished puree. Experimental chip recipes included a mixture of apple and rowan puree in proportions of 80:20, 70:30, 60:40, and 50:50, oat flour at a dosage of 5 to 20%, and St. John's wort powder at 1%. A decrease in the moisture content of the chip mixture was observed with increasing dosages of rowan puree and oat flour, while an increase in viscosity was observed. The chip blanks were dried using infrared convection at a temperature of 50-55°C to a moisture content of 8%. A dosage of 30% rowan puree was found to ensure maximum chip brittleness of 0.23 kg/cm^2. Increasing the proportion of rowan berry puree in the fruit and berry mass from 20 to 50% significantly increases the total antioxidant content, due to the higher content of water-soluble antioxidants in rowan berry puree. The best quality is achieved with a 70:30 ratio of apple refuse and rowan berry puree in the chip recipe, with oatmeal and St. John's wort powder at 10% and 1% of the fruit and berry mass, respectively. This yields an antioxidant value (based on quercetin) of 341.32 mg/100 g (371 mg/100 g dry matter).

Keywords: apple refuse, chokeberry, oat flour, St. John's wort, chips, antioxidants.

Для цитирования
Родина З.Ю., Перфилова О.В., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Разработка поликомпонентных чипсов путем рационального использования растительного сырья // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 32–39. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-32-39

For citation
Rodina Z.Y., Perfilova O.V., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. Development of multi-component chips through the rational use of plant-based raw materials. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 32–39. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-32-39

© 2026, Родина З.Ю. и др. / Rodina Z.Y. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Организация рационального, сбалансированного по макро- и микронутриентам питания является задачей социального характера, что и обуславливает основные приоритеты в направлениях развития пищевой индустрии в современном периоде развития, базирующиеся на концепции включения в рацион человека продуктов полноценных по своему составу и отвечающих постулатам сбалансированного питания, важной функцией которых является обеспечение поддержания и укрепления здоровья, что нашло отражение и в государственной политике России в области здорового питания населения [1–3].

Чипсы являются распространенным и излюбленным видом снека среди россиян, поэтому повышение их качества и обогащение антиоксидантами является перспективным и актуальным. Необходимость обогащения чипсов вызвана несбалансированностью по основным пищевым веществам, так как основным рецептурным компонентом выступают продукты переработки картофеля, в которых прослеживается дефицит витаминов, антиоксидантов и пищевых волокон [4–7].

В последнее время среди россиян, придерживающихся здорового образа жизни и принципов правильного питания, наблюдается рост заинтересованности в чипсах с применением растительных добавок. Поэтому расширение сырьевой базы для чипсов за счет вовлечения продуктов переработки растительного сырья является актуальным [8–10].

Цель работы – разработка рациональной рецептурной композиции поликомпонентных чипсов на основе пюре из яблочных выжимок с добавлением продуктов переработки фруктов, злаков и лекарственных растений.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выступали пюре из яблочных выжимок – вторичный продукт производства сока, полученного прямым отжимом на шнековом прессе, где выход составляет 45%, пюре из черноплодной рябины следующего сортимента: Черноплодная, Мулатка и Вениса, порошок из травы зверобоя, и мука овсяная, выработанная по СТО 53548590–019–2013. Рябина черноплодная была выращена в условиях Всероссийского научно-исследовательского института имени И.В. Мичурина. Трава зверобоя была собрана на территории г. Мичуринска Тамбовской области.

Процесс производства пюре из черноплодной рябины включал следующие этапы: отделение от веточек, сортирка по качеству и инспекция на роликовом транспортере, мойка в чистой проточной воде с использованием специализированных моечных машин, таких как вибрационные. Далее подготовленные плоды подвергались бланшированию, после их размягчения протирались на протирочных машинах с диаметром отверстий сит № 1–1,2 мм и № 2–0,8 мм с целью отделения мякоти от кожицы, семян и получения пюре, которое затем подвергалось гомогенизации.

Траву зверобоя использовали в качестве рецептурного ингредиента в виде порошка, для получения которого траву заготавливали в фазе цветения до появления зрелых плодов в сухую погоду вручную ножницами, либо секатором. Трава подвергалась сортировке по качеству и инспекции, далее равномерным слоем ее раскладывали на сетчатые поддоны и сушили в инфракрасно-конвективном шкафу «Универсал-СД-4» при температуре 40–50 °С до конечной влажности не более 10%, чтобы обеспечить хрупкость. Сухую траву охлаждали и повторно сортировали, затем измельчали в порошок, просеивали и упаковывали.

Яблочные выжимки в свою структуру включают семена, перегородки и кожицу, поэтому было разработано технологическое решение с целью обеспечения однородной системы для возможности использования в технологии чипсов: выжимки бланшируют для размягчения и протирают через сита № 1–1,2 мм и № 2–0,8 мм, на выходе образуются пюре и вытерки, последние направляют в инфракрасно-конвективную сушилку Универсал-СД-4 с температурой 50–60 °С, где сушат до влажности не более 10%, и далее после охлаждения выжимок до 20 °С их измельчают в молотковой дробилке в порошок, который после пропускания через магнитоуловитель смешивается с полученным пюре в месильной машине до однородного состояния.

В растительной смеси для чипсов и в готовых изделиях определяли влажность термогравиметрическим методом по ГОСТ 28561–90, вязкость на вискозиметре VISCO, хрупкость на приборе Строгонова, суммарное содержание водорастворимых антиоксидантов (по кверцетину) на приборе Цвет Яуза 01-АА амперометрическим методом.

Результаты и обсуждение

Выбор растительного сырья для проектирования новой рецептурной композиции чипсов, ориентированных на здоровое питание, основывался на высоком содержании сахаров с целью неиспользования сахара белого в рецептуре, а также водо- (флавоноиды), жирорастворимых антиоксидантов (бета-каротина) и пищевых волокон для обогащения изделий по данным нутриентам.

Яблочные выжимки для продуктов питания являются дополнительным источником клетчатки и пектиновых веществ – 4,1 г/100 г, а также водорастворимых антиоксидантов, так суммарное содержание антиоксидантов (ССА) по кверцетину составляет – 37,2 мг/100 г. В плодах черноплодной рябины и порошке из травы зверобоя определено высокое количество как водо-, так и жирорастворимых антиоксидантов: флавоноидов (сумма флавонолов, катехинов и антоцианов) 1094,9–1304,6 мг/100 г и 564,5 мг/100 г, β-каротина 4,12–8,95 мг/100 г и 8,99 мг/100 г соответственно. Овсяная мука содержит пищевые волокна в количестве 2,9 г на 100 г. В яблочных выжимках и плодах черноплодной рябины установлено содержание сахаров равное 8,4 и 13,8–14,6 г/100 г.

Опытные рецептуры чипсов на основе пюре из яблочных выжимок и черноплодной рябины с различными пропорциями порошка из травы зверобоя и муки овсяной представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Опытные рецептуры поликомпонентных чипсов на основе пюре из яблочных выжимок и черноплодной рябины

Table 1.

Experimental recipes for multi-component chips based on apple refuse and chokeberry puree

Образец Prototype	Пюре из яблочных выжимок, % Apple refuse puree, %	Пюре из черноплодной рябины, % Chokeberry puree, %	Порошок из травы зверобоя, % St. John's wort powder, %	Мука овсяная, % Oat flour, %
1	80	20	1	5
2	80	20	1	10
3	80	20	1	15
4	80	20	1	20
5	70	30	1	5
6	70	30	1	10
7	70	30	1	15
8	70	30	1	20
9	60	40	1	5
10	60	40	1	10
11	60	40	1	15
12	60	40	1	20
13	50	50	1	5
14	50	50	1	10
15	50	50	1	15
16	50	50	1	20

Смесь для опытных образцов чипсов готовилась из яблочного и рябинового пюре при соотношениях смешивания 80:20, 70:30, 60:40 и 50:50, далее полученная фруктово-ягодная композиция взбивалась в месильной машине до образования пышной системы однородной по консистенции, затем засыпалась овсяная мука, выступающая в качестве загустителя, в дозировке от 5 до 20% и порошок из сушеной травы зверобоя – 1%, которые предварительно смешивали друг с другом, и полученную смесь тщательно перемешивали. Увеличение добавки порошка из травы зверобоя более, чем 1% негативно сказывается на вкусовых качествах готовых изделий, придавая им горечь и травянистый привкус.

Динамика влажности смеси для опытных образцов чипсов в зависимости от пропорций рецептурных ингредиентов представлена в таблице 2.

Таблица 2.

Влажность опытных образцов рецептурной смеси для поликомпонентных чипсов на основе пюре из яблочных выжимок и рябины черноплодной

Table 2.

Moisture content of experimental samples of a recipe mixture for multi-component chips based on apple refuse and chokeberry puree

Соотношение пюре из яблочных выжимок и рябинового (сорт Вениса) The ratio of apple refuse and rowan puree (Venice variety)	Влажность опытных образцов смеси для чипсов, % Moisture content of test samples of the chip mix, %			
80:20	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
	89,7	80,2	70,0	65,2
70:30	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
	86,1	75,0	65,0	63,8
60:40	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12
	77,5	74,2	64,8	63,4
50:50	№ 13	№ 14	№ 15	№ 16
	68,6	67,6	58,6	57,5

С увеличением доли рябинового пюре с 20 до 50% во фруктово-ягодной массе влажность готовой смеси для опытных образцов чипсов (№ 1–16) снижается с 21,1 до 7,7%, что обусловлено большим содержанием сухих веществ в рябиновом пюре по сравнению с пюре из яблочных выжимок. Во всех опытных образцах с повышением доли овсяной муки к фруктово-ягодной массе с 5 до 20% влажность готовой рецептурной смеси снижается на 11,1–24,5%, что также объясняется большим содержанием сухих веществ в овсяной муке в сравнении с фруктово-ягодной массой.

Влияние рецептурных композиций смеси для чипсов на ее вязкость изображено на рисунке 1.

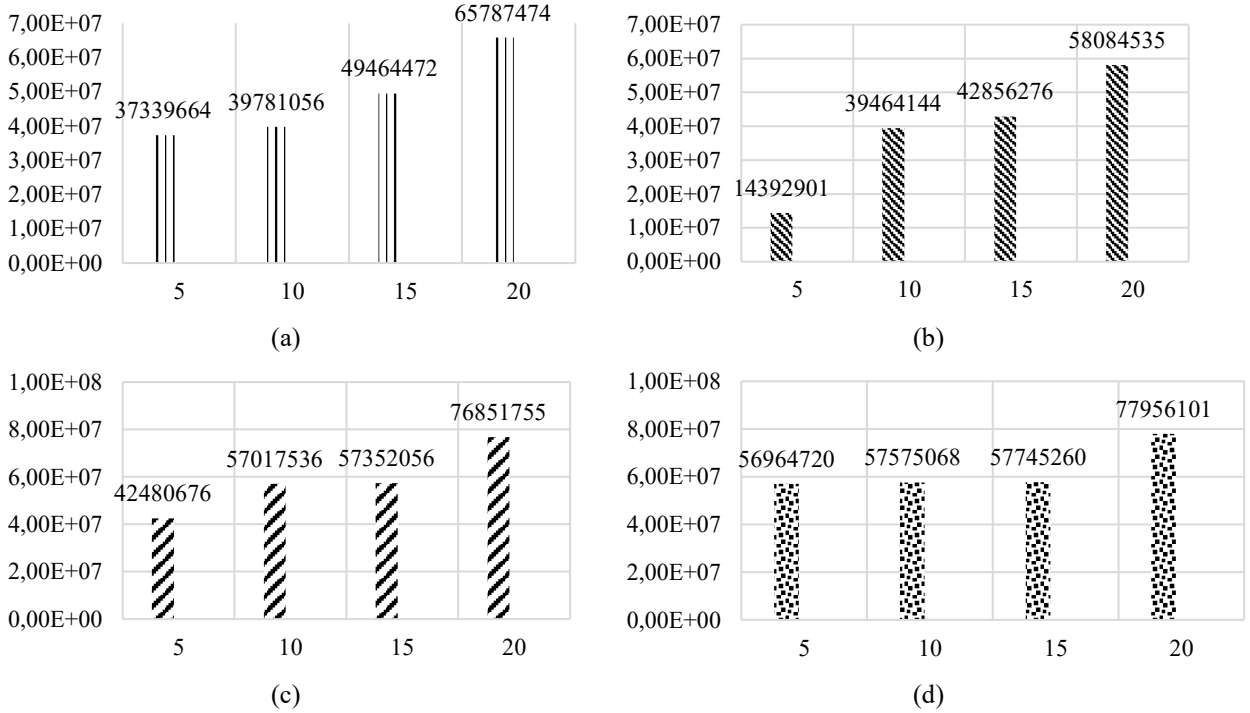


Рисунок 1. Зависимость вязкости от пропорций растительных ингредиентов в рецептурной смеси для чипсов при следующем соотношении пюре из яблочных выжимок и черноплодной рябины: (a) – 80:20, (b) – 70:30, (c) – 60:40, (d) – 50:50

Figure 1. The dependence of viscosity on the proportions of plant ingredients in the recipe mixture for chips with the following ratio of apple refuse and chokeberry puree: (a) – 80:20, (b) – 70:30, (c) – 60:40, (d) – 50:50

С увеличением доли рябинового пюре во фруктово-ягодной массе с 20 до 50% в опытных образцах смеси для чипсов под номерами 1–16 вязкость увеличивалась в 1,4–4 раза, что обусловлено ростом содержания сухих веществ в системе, из-за частичной замены яблочных выжимок на рябиновое пюре, влажность которого ниже. При этом, с увеличением в рецептуре опытных образцов чипсов содержания овсяной муки с 5 до 20% наблюдалась такая же тенденция, то есть вязкость смеси увеличилась в 1,4–4 раза, из-за роста количества сухих веществ и растворимой клетчатки овсяной муки – бета-глюкана, который образует при соединении с водой липкую текстуру.

Для получения опытных образцов чипсов смесь из пюре яблочного и рябинового с добавлением порошка из травы зверобоя и овсяной муки раскатывали в пласт толщиной не более 2 мм, нарезали на квадраты размером 50 х 50 мм и сушили в инфракрасно-конвективной сушилке Универсал-СД-4 при температуре 50–55^0 С до влажности 8%.

Одним из важных показателей качества чипсов считается хрупкость, поэтому приготовленные по предложенной технологии чипсы оценивали по показателю хрупкости, показатели которой изображены на рисунке 2.

При дозировке рябинового пюре 20% структура чипсов несколько пластичная, что ухудшает хрупкость готового изделия, при увеличение дозировки до 30% за счет повышения содержания сухих веществ обеспечивает достижение максимальной хрупкости для данного вида чипсов – 0,23 кг/см^2, дальнейшее повышение концентрации рябинового пюре приводит к переуплотнению массы и хрупкость ухудшается, готовые чипсы становятся твердыми с шершавой поверхностью. Также отмечается ухудшение хрупкости с увеличением доли

овсяной муки из-за ее высоких вязкостных свойств и увеличения содержания сухих веществ, из-за недостатка влаги консистенция переуплотняется, так при увеличении добавки муки с 5 до 10% значения хрупкости изделий увеличиваются на 50–65%. Рациональные значения хрупкости достигаются при дозировке овсяной муки не более 15%, при концентрации рябинового пюре не более 30%.

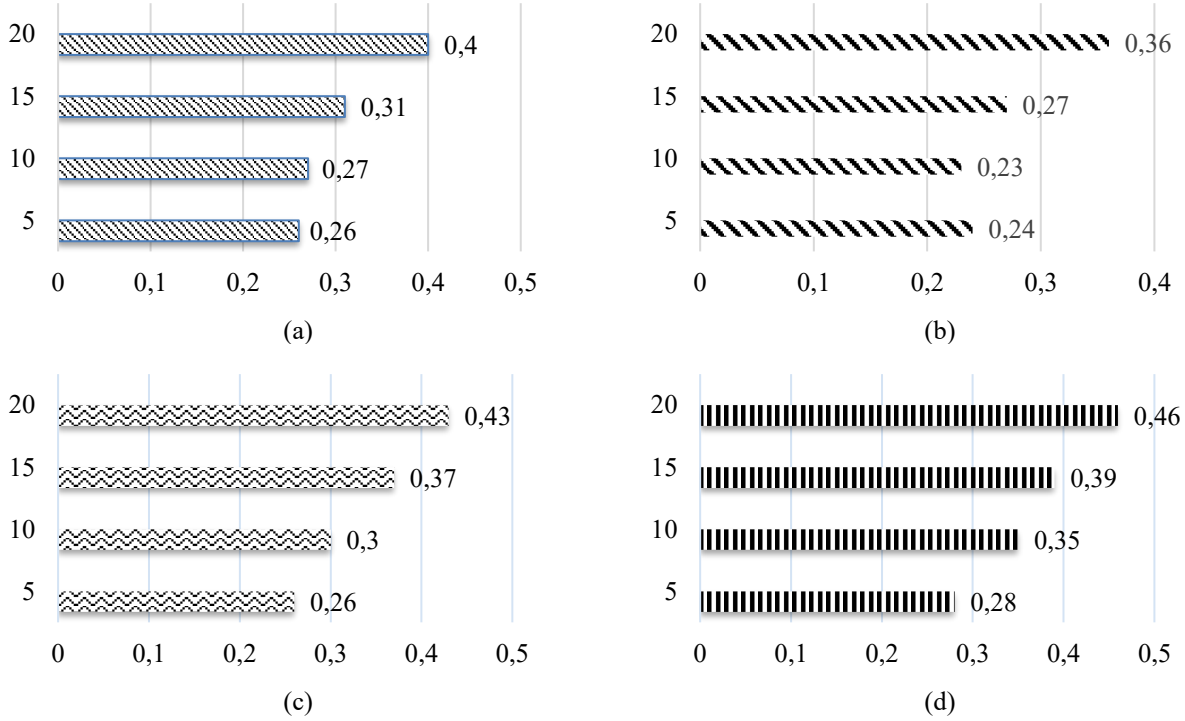


Рисунок 2. Хрупкость чипсов в зависимости от пропорций растительных компонентов в рецептурной смеси при следующем соотношении пюре из яблочных выжимок и рябины: (a) – 80:20, (b) – 70:30, (c) – 60:40, (d) – 50:50

Figure 2. The crispiness of the chips depends on the proportions of the plant components in the recipe mixture with the following ratio of apple refuse and rowan puree: (a) – 80:20, (b) – 70:30, (c) – 60:40, (d) – 50:50

Из-за первостепенной роли органолептических свойств при создании новых продуктов питания, не зависимо от их назначения, была проведена органолептическая оценка исследуемых образцов поликомпонентных чипсов по 10-балльной шкале (таблица 3).

Таблица 3.

Дегустационная оценка образцов чипсов по 10-балльной шкале

Table 3.

Tasting assessment of chip samples on a 10-point scale

Образец Prototype	Форма Form	Поверхность Surface	Хрупкость Fragility	Цвет Color	Вкус Taste	Запах Smell	Сумма баллов Total points
	коэффициент значимости | significance coefficient						
	0,2	0,2	0,5	0,3	0,5	0,3	
1.	5/1,0	5,0/1,0	4,0 / 2,0	5,0/1,5	4,0/2,0	4,0/1,2	27/8,7
2.	5/1,0	5,0/1,0	4,0/2,0	5/1,5	4,0/2,0	4,0/1,2	27/8,7
3.	4/0,8	4/0,8	3,0/1,5	4,5/1,4	3,0/1,5	3,0/0,9	21,5/6,9
4.	3/0,6	3/0,6	2,0/1,0	4/1,2	2,0/1,0	2,0/0,6	16/5
5.	5/1	5/1,0	4,5/2,3	5/1,5	5/2,5	5/1,5	29,5/9,8
6.	5/1	5/1,0	5,0/2,5	5/1,5	5/2,5	5/1,5	30/10
7.	4/0,8	4/0,8	4,0/2,0	4,0/1,2	3,5/1,8	3,5/1,1	23/7,7
8.	3/0,6	3/0,6	3,0/1,5	4,0/1,2	2,5/1,3	2,5/0,8	18/6,0
9.	5/1,0	4/0,8	4/2,0	4,5/1,4	4,0/2,0	4,0/1,2	25,5/8,4
10.	4,5/0,9	3,5/0,7	3/1,5	3,5/1,1	3,5/1,8	3,5/1,1	21,5/7,1
11.	4,5/0,9	3,5/0,7	3/1,5	3,5/1,1	3,0/1,5	3,0/0,9	20,5/6,6
12.	4/0,8	3/0,6	2/1,0	3,5/1,1	2,5/1,3	2,5/0,8	17,5/5,6
13.	4/0,8	4,0/0,8	4/2,0	4/1,2	3,5/1,8	3,5/1,1	23/7,7
14.	4/0,8	3,5/0,7	3/1,5	3/0,9	3/1,5	3/0,9	19,5/6,3
15.	3,5/0,7	3/0,6	3/1,5	3/0,9	3/1,5	3/0,9	18,5/6,1
16.	3,0/0,6	2,5/0,5	2/1,0	3/0,9	2/1	2/0,6	14,5/4,6

По результатам дегустационной оценки по 10-балльной шкале, с учетом коэффициентов весомости органолептических показателей, наибольшее количество баллов набрали образцы чипсов под номерами 5 и 6, при этом максимальное значение 10 баллов было отмечено у образца под номером 6, где соотношение яблочного и рябинового пюре 70:30, доля овсяной муки 10% и порошка из травы зверобоя 1%. Наименьшее количество баллов набрали образцы чипсов, где соотношение пюре из яблочных выжимок и рябинового составило 50:50, при добавлении 20% овсяной муки и 1% порошка из травы зверобоя – 4,6 баллов. Следует отметить, что с увеличением доли овсяной муки более 10% цвет готовых чипсов становился более тусклым, а при повышении доли рябинового пюре более 30% цвет приобретал черный оттенок. Для всех образцов чипсов с концентрацией рябинового пюре 20–30% характерен бордовый цвет различной интенсивности. Наиболее гармоничный фруктовый вкус наблюдался при концентрации рябинового пюре 20–30%, при повышении его дозировки наблюдалась горечь во вкусе.

В условиях неблагоприятной экологической обстановки все большее внимание ученых уделяется обогащению пищевых продуктов антиоксидантами, которые обладают свойством блокировать свободные радикалы, тем самым предотвращая их окислительное действие на здоровые клетки организма человека.

Показатель суммарного содержания антиоксидантов по кверцетину был выбран для общей оценки антиоксидантного состава исследуемых образцов чипсов. На рисунке 4 представлены графики изменения содержания антиоксидантов в чипсах в зависимости от рецептурной композиции.

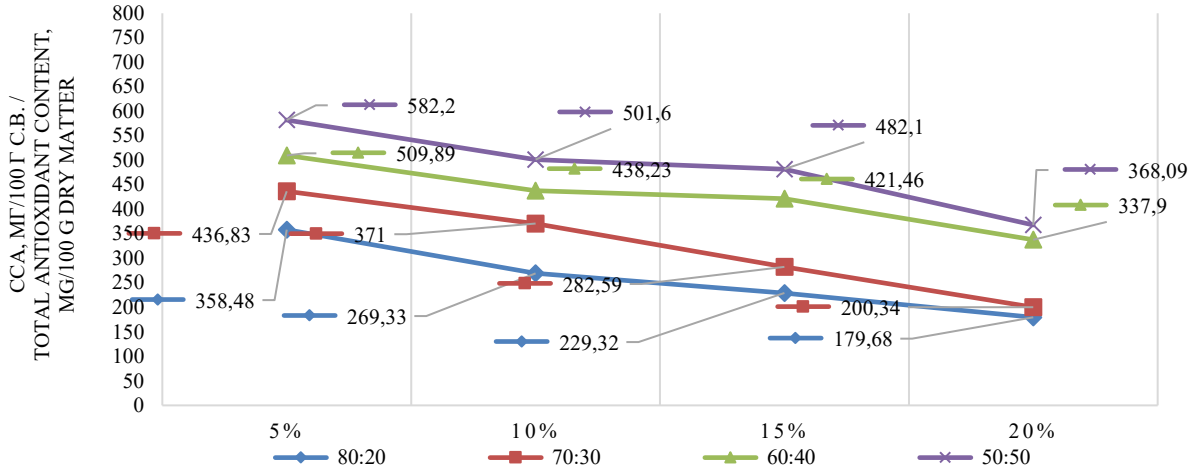


Рисунок 3. Графическая зависимость суммарного содержания антиоксидантов в чипсах от пропорций растительных ингредиентов в рецептурной смеси при следующем соотношении пюре из яблочных выжимок и черноплодной рябины: 80:20, 70:30, 60:40, 50:50

Figure 3. Graphic dependence of the total antioxidant content in chips on the proportions of plant ingredients in the recipe mixture with the following ratio of apple refuse and chokeberry puree: 80:20, 70:30, 60:40, 50:50

Из графиков на рисунке 3 видно, что с увеличением содержания во фруктово-ягодной массе рябинового пюре с 20 до 50% отмечается значительное повышение ССА, обусловленное большим содержания водорастворимых антиоксидантов в рябиновом пюре, чем в яблочном, так при добавлении овсяной муки, соответственно: 5% – на 62,4%, 10% – на 86,2%, 15% – на 110,2% и 20% – на 104,9%.

Увеличение доли овсяной муки в рецептурной смеси для чипсов с 5 до 20% способствует уменьшению значений ССА чипсов, связанное с меньшим количеством водорастворимых антиоксидантов по отношению к яблочному и рябиновому пюре, а также порошку из травы зверобоя, так процент снижения значений данного показателя составил для образцов, при соотношении яблочного и рябинового пюре 80:20, 70:30, 60:40 и 50:50, от 34 до 54%.

Заключение

В результате исследований по созданию новой рецептуры поликомпонентных чипсов путем рационального использования растительного сырья установлен лучший вариант композиции ингредиентов, а именно: соотношение пюре из яблочных выжимок и рябинового равное 70:30, доля овсяной муки и порошка из травы зверобоя к фруктово-ягодной массе 10% и 1%. Чипсы, произведенные по данной рецептуре положительно выделяются не только по органолептическим, реологическим и физико-химическим показателям, но и в них обеспечивается суммарное содержание антиоксидантов по кверцетину в количестве 341,32 мг / 100 г. (371 мг / 100 г. с.в.).

Литература

1 Варданян Л.Р., Арутюнян С.А., Торосян Г.О. Исследование антиоксидантной активности растительного сырья как натурального стабилизатора пищевых продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 485–495. doi: 10.21603/2074-9414-2025-3-2586

2 Игнатчук А.В., Рахта А.А. Овощные чипсы и диета. Овощные чипсы и спорт // NovaInfo.Ru. 2023. № 140. С. 6–7.

3 Нутрициология и клиническая диетология: национальное руководство / под ред. В.А. Тутельяна, Д.Б. Никитюка. 2-е изд. М.: ТАР Медиа, 2022. 1008 с.

4 Соснин М.Д., Шорсткий И.А. Сушка яблочных чипсов с применением интеллектуальной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 2. С. 368–383. doi: 10.21603/2074-9414-2023-2-2442

5 Горбунова К.Г., Масловский С.А., Каухчешвили Н.Э. и др. Обоснование способа дегидратации сырья при производстве чипсов из тыквы // Агропромышленные технологии Центральной России. 2024. № 3 (33). С. 27–36. doi: 10.24888/2541-7835-2024-33-27-36

6 Перфилова О.В., Родина З.Ю., Брыксина К.В. Рецептурная композиция для производства чипсов с применением яблочных выжимок // Пищевая промышленность. 2024. № 12. С. 26–31. doi: 10.52653/PPI.2024.12.12.005

7 Попов В.Г., Кузьмин С.В., Мозжерина И.В. Разработка высокобелковых чипсов с использованием нетрадиционного сырья Тюменской области // Ползуновский вестник. 2022. № 3. С. 136–143. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.019

8 Перфилова О.В., Брыксина К.В., Родина З.Ю. Использование нетрадиционного растительного сырья для рецептурной композиции чипсов // Новые технологии. 2023. Т. 19. № 3. С. 68–77. doi: 10.47370/2072-0920-2023-19-3-68-77

9 Хромов Н.В., Попова Е.И. Качественная характеристика нетрадиционных садовых культур в ЦЧЗ // Вестник Мичуринского ГАУ. 2024. № 1 (76). С. 58–61.

10 Yashin Y.I., Vedenin A.N., Yashin A.Y., Nemzer B.V. Антиоксидантная активность специй и их влияние на здоровье человека (обзор) // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17. № 6. С. 954–969. doi: 10.17308/sorpchrom.2017.17/457

11 Яшин А.Я., Яшин Я.И. Определение каротиноидов методом ВЭЖХ, их антиоксидантная активность и влияние на здоровье человека (обзор) // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22. № 6. С. 794–803.

12 Zhao Y., Zhang M., Bhandari B., Li C. Development of special nutritional balanced food 3D printing products based on the mixing of animals/plants materials: research progress, applications, and trends // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2025. V. 65. № 30. P. 6985–7009. doi: 10.1080/10408398.2024.2370452

13 Kowalska J., Marzec A., Domian E. et al. The Use of Antioxidant Potential of Chokeberry Juice in Creating Pro-Healthy Dried Apples by Hybrid (Convection-Microwave-Vacuum) Method // Molecules. 2020. V. 25. № 23. P. 5680. doi: 10.3390/molecules25235680

14 Wójtowicz A., Combrzyński M., Biernacka B. et al. Fresh chokeberry (Aronia melanocarpa) fruits as valuable additive in extruded snack pellets: Selected nutritional and physiochemical properties // Plants. 2023. V. 12. № 18. P. 3276. doi: 10.3390/plants12183276

15 Sidor A., Drożdżyńska A., Brzozowska A., Gramza-Michałowska A. The Effect of Plant Additives on the Stability of Polyphenols in Dried Black Chokeberry (Aronia melanocarpa) Fruit // Foods. 2021. V. 10. № 1. P. 44. doi: 10.3390/foods10010044

16 Zuñiga-Martínez B.S., Domínguez-Avila J.A., Robles-Sánchez R.M. et al. Agro-Industrial Fruit Byproducts as Health-Promoting Ingredients Used to Supplement Baked Food Products // Foods. 2022. V. 11. № 20. P. 3181. doi: 10.3390/foods11203181

17 Gaonkar S., Velingkar R., Prabhu N. et al. Valorization of fruit peel waste for the formulation of low-gluten phytonutrient-rich savory snacks // Nutrire. 2023. V. 48. P. 3. doi: 10.1186/s41110-022-00185-5

18 Arshad Z., Shahid S., Hasnain A. et al. Functional Foods Enriched With Bioactive Compounds: Therapeutic Potential and Technological Innovations // Food Science & Nutrition. 2025. V. 13. № 10. P. e71024. doi: 10.1002/fsn3.71024

19 Журавлева Н.Д., Тошев А.Д. Разработка технологии чипсов с применением растительного сырья // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 81–86. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-81-86

20 Bonarska-Kujawa D., Cyboran S., Kleszczyńska H., Oszmiański J. Antioxidant properties of apple leaves and fruits extracts from apple leaves and fruits as effective antioxidants // Journal of Medicinal Plants Research. 2011. V. 5. № 11. P. 2339–2347.

21 Parhi P.K., Bindhani B.K. Nutraceuticals: An Alternative of Medicine // Prebiotics, Probiotics and Nutraceuticals. 2022. P. 213. doi: 10.1007/978-981-19-2153-3_10

References

1 Vardanyan L.R., Harutyunyan S.A., Torosyan G.O. Study of the Antioxidant Activity of Plant Raw Materials as a Natural Stabilizer of Food Products. Technique and Technology of Food Production. 2025. vol. 55. no. 3. pp. 485–495. doi:10.21603/2074-9414-2025-3-2586 (in Russian).

2 Ignatchuk A.V., Rakhta A.A. Vegetable Chips and Diet. Vegetable Chips and Sport. NovaInfo.Ru. 2023. no. 140. pp. 6–7. (in Russian).

3 Tutelyan V.A., Nikityuk D.B. (Eds.). Nutriology and Clinical Dietetics: National Guidelines. 2nd ed. Moscow: TAR Media, 2022. 1008 p. (in Russian).

4 Sosnin M.D., Shorstky I.A. Drying of Apple Chips Using Intelligent Processing with Low-Temperature Atmospheric Plasma. Technique and Technology of Food Production. 2023. vol. 53. no. 2. pp. 368–383. doi: 10.21603/2074-9414-2023-2-2442 (in Russian).

5 Gorbunova K.G., Maslovsky S.A., Kaukhtseshvili N.E. et al. Justification of the Method of Raw Material Dehydration in the Production of Pumpkin Chips. Agro-Industrial Technologies of Central Russia. 2024. no. 3 (33). pp. 27–36. doi: 10.24888/2541-7835-2024-33-27-36 (in Russian).

6 Perfilova O.V., Rodina Z.Yu., Bryksina K.V. Formulation Composition for the Production of Chips Using Apple Pomace. Food Industry. 2024. no. 12. pp. 26–31. doi: 10.52653/PPI.2024.12.12.005 (in Russian).

7 Popov V.G., Kuzmin S.V., Mozzherina I.V. Development of High-Protein Chips Using Non-Traditional Raw Materials of the Tyumen Region. Polzunovsky Bulletin. 2022. no. 3. pp. 136–143. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.019 (in Russian).

8 Perfilova O.V., Bryksina K.V., Rodina Z.Yu. Use of Non-Traditional Plant Raw Materials for the Formulation Composition of Chips. New Technologies. 2023. vol. 19. no. 3. pp. 68–77. doi: 10.47370/2072-0920-2023-19-3-68-77 (in Russian).

9 Khromov N.V., Popova E.I. Qualitative Characteristics of Non-Traditional Garden Crops in the Central Chernozem Region. Bulletin of Michurinsk State Agrarian University. 2024. no. 1 (76). pp. 58–61. (in Russian).

10 Yashin Y.I., Vedenin A.N., Yashin A.Y., Nemzer B.V. Antioxidant Activity of Spices and Their Effect on Human Health (Review). Sorption and Chromatographic Processes. 2017. vol. 17. no. 6. pp. 954–969. doi: 10.17308/sorpchrom.2017.17/457 (in Russian).

11 Yashin A.Ya., Yashin Ya.I. Determination of Carotenoids by HPLC, Their Antioxidant Activity and Effect on Human Health (Review). Sorption and Chromatographic Processes. 2022. vol. 22. no. 6. pp. 794–803. (in Russian).

12 Zhao Y., Zhang M., Bhandari B., Li C. Development of special nutritional balanced food 3D printing products based on the mixing of animals/plants materials: research progress, applications, and trends. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2025. vol. 65. no. 30. pp. 6985–7009. doi: 10.1080/10408398.2024.2370452.

13 Kowalska J., Marzec A., Domian E. et al. The Use of Antioxidant Potential of Chokeberry Juice in Creating Pro-Healthy Dried Apples by Hybrid (Convection-Microwave-Vacuum) Method. Molecules. 2020. vol. 25. no. 23. article 5680. doi: 10.3390/molecules25235680.

14 Wójtowicz A., Combrzyński M., Biernacka B. et al. Fresh chokeberry (Aronia melanocarpa) fruits as valuable additive in extruded snack pellets: Selected nutritional and physiochemical properties. Plants. 2023. vol. 12. no. 18. article 3276. doi: 10.3390/plants12183276.

15 Sidor A., Drożdżyńska A., Brzozowska A., Gramza-Michałowska A. The Effect of Plant Additives on the Stability of Polyphenols in Dried Black Chokeberry (Aronia melanocarpa) Fruit. Foods. 2021. vol. 10. no. 1. article 44. doi: 10.3390/foods10010044.

16 Zuñiga-Martínez B.S., Domínguez-Avila J.A., Robles-Sánchez R.M. et al. Agro-Industrial Fruit Byproducts as Health-Promoting Ingredients Used to Supplement Baked Food Products. Foods. 2022. vol. 11. no. 20. article 3181. doi: 10.3390/foods11203181.

17 Gaonkar S., Velingkar R., Prabhu N. et al. Valorization of fruit peel waste for the formulation of low-gluten phytonutrient-rich savory snacks. Nutrire. 2023. vol. 48. article 3. doi: 10.1186/s41110-022-00185-5.

18 Arshad Z., Shahid S., Hasnain A. et al. Functional Foods Enriched With Bioactive Compounds: Therapeutic Potential and Technological Innovations. Food Science & Nutrition. 2025. vol. 13. no. 10. article e71024. doi: 10.1002/fsn3.71024.

19 Zhuravleva N.D., Toshev A.D. Development of Technology for Chips Using Plant Raw Materials. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 81–86. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-81-86 (in Russian).

20 Bonarska-Kujawa D., Cyboran S., Kleszczyńska H., Oszmiański J. Antioxidant properties of apple leaves and fruits extracts from apple leaves and fruits as effective antioxidants. Journal of Medicinal Plants Research. 2011. vol. 5. no. 11. pp. 2339–2347.

21 Parhi P.K., Bindhani B.K. Nutraceuticals: An Alternative of Medicine. In: Prebiotics, Probiotics and Nutraceuticals. 2022. pp. 213–229. doi: 10.1007/978-981-19-2153-3_10.

Сведения об авторах

Злата Ю. Родина аспирант, кафедра продуктов питания, товароведения и технологии переработки продукции животноводства, Мичуринский государственный аграрный университет, ул. Интернациональная, 101, г. Мичуринск, 393760, Россия, rodina.zlata.96@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-0478-251X

Ольга В. Перфилова д.т.н., профессор, кафедра продуктов питания, товароведения и технологии переработки продукции животноводства, Мичуринский государственный аграрный университет, ул. Интернациональная, 101, г. Мичуринск, 393760, Россия, perfolgav@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9186-7405

Анна А. Дерканосова д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, научный консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, кафедра коммерции и товароведения, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-002-8817-1466

Information about authors

Zlata Yu. Rodina graduate student, food, commodity science and livestock product processing technology department, Michurinsk State Agrarian University, Internationalnaya St., 101, Michurinsk, 393760, Russia, rodina.zlata.96@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-0478-251X

Olga V. Perfilova Dr. Sci. (Engin..), professor, food, commodity science and livestock product processing technology department, Michurinsk State Agrarian University, Internationalnaya St., 101, Michurinsk, 393760, Russia, perfolgav@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9186-7405

Anna A. Derkanosova Dr. Sci. (Engin..), professor, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin..), professor, scientific consultant, animal products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia; commerce and commodity science department, Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia; mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-002-8817-1466

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/11/2025	**После редакции** 18/12/2025	**Принята в печать** 20/01/2026

Received 21/11/2025	**Accepted in revised** 18/12/2025	**Accepted** 20/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-40-46 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.653.8 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Влияние порошка столовой свеклы на реологические свойства ржаного теста и качественные показатели хлебобулочных изделий

Наталья В. Родичева [1] rodicheva@bsuedu.ru 0000-0000-0000-0000
Юрий А. Болтенко [2] boltenko@bsuedu.ru 0000-0003-2183-2263
Нина И. Мячикова [2] myachikova@bsuedu.ru 0000-0001-7997-0605
Ирина Г. Зиновьева [2] zinovyeva@bsuedu.ru 0000-0000-0000-0000
Лариса Н. Фролова [3] kaf-mapp@vsuet.ru 0000-0002-6505-4136
Анна А. Деркаосова [3] aa-derk@yandex.ru 0000-0002-9726-9262

1 ООО «ИРЕКС ТРИЭР», ул. Щипок, 18, стр. 3, г. Москва, 115093, Россия
2 Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия
3 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Повышение пищевой и потребительской ценности хлебобулочных изделий за счет введения функциональных растительных ингредиентов является ключевым трендом в развитии хлебопекарной отрасли. В статье представлены результаты исследования влияния порошка столовой свеклы, используемого в качестве функционального ингредиента, на реологические свойства ржаного теста после замеса, а также на качество готовых хлебобулочных изделий. Проведена комплексная оценка качества обогащенного хлеба по органолептическим, физико-химическим и реологическим показателям. Экспериментальная часть работы базировалась на использовании современных приборных методов анализа, включая фариограф «Do-corder C3» для контроля процесса замеса и структурометр СТ-2 для точного измерения вязкости теста, что обеспечило высокую достоверность полученных данных. В ходе исследования варьирование дозировки порошка столовой свеклы (от 0 до 8% с шагом 2%) позволило всесторонне изучить его технологическое действие. Установлено влияние дозировки порошка столовой свеклы на реологические показатели ржаного теста после замеса. Выявлено, что добавление порошка закономерно увеличивает водопоглотительную способность муки и количество механической энергии, необходимое для замеса, что свидетельствует о структурирующем влиянии пищевых волокон свеклы. Наиболее оптимально введение порошка в количестве 6% от массы муки. При этом значении эффективной вязкости составляло 145 кПа*с, а также зафиксированы наилучшие показатели газообразующей способности теста в процессе брожения, что напрямую коррелирует с конечным объемом и структурой пористости хлеба. Показано, что оптимальная дозировка порошка в 6% позволяет не только улучшить потребительские свойства изделия, но и обогатить его состав биологически активными веществами, при этом физико-химические показатели (пористость достигла 63%, удельный объем — 1,85 см³/г) соответствуют и даже превосходят контрольные значения. Результаты работы представляют практический интерес для разработки новых видов функциональных хлебопродуктов на основе ржаной муки и могут быть рекомендованы для внедрения на предприятиях хлебопекарной промышленности с целью расширения ассортимента продукции здорового питания.

Ключевые слова: порошок столовой свеклы, ржаное тесто, реологические свойства, хлебобулочные изделия, функциональные ингредиенты, качество хлеба.

Influence of beetroot powder on the rheological properties of rye dough and the quality indicators of bakery products

Natal'ya V. Rodicheva [1] rodicheva@bsuedu.ru 0000-0000-0000-0000
Yurij A. Boltenko [2] boltenko@bsuedu.ru 0000-0003-2183-2263
Nina I. Myachikova [2] myachikova@bsuedu.ru 0000-0001-7997-0605
Irina G. Zinov'eva [2] zinovyeva@bsuedu.ru 0000-0000-0000-0000
Larisa N. Frolova [3] kaf-mapp@vsuet.ru 0000-0002-6505-4136
Anna A. Derkanosova [3] aa-derk@yandex.ru 0000-0002-9726-9262

1 IREKS TRIER LLC, 18 Shchipok Street, Building 3, Moscow, 115093, Russia
2 Belgorod State National Research University, Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia
3 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia)

Для цитирования
Родичева Н.В., Болтенко Ю.А., Мячикова Н.И., Зиновьева И.Г., Фролова Л.Н., Деркаосова А.А. Влияние порошка столовой свеклы на реологические свойства ржаного теста и качественные показатели хлебобулочных изделий // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 40–46. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-40-46

For citation
Rodicheva N.V., Boltenko Yu.A., Myachikova N.I., Zinov'eva I.G., Frolova L.N., Derkanosova A.A. Influence of beetroot powder on the rheological properties of rye dough and the quality indicators of bakery products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 40–46. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-40-46

© 2026, Родичева Н.В. и др. / Rodicheva N.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. Increasing the nutritional and consumer value of bakery products through the introduction of functional plant ingredients is a key trend in the development of the baking industry. The article presents the results of a study on the effect of beetroot powder, used as a functional ingredient, on the rheological properties of rye dough after kneading, as well as on the quality of finished bakery products. A comprehensive assessment of the quality of enriched bread was carried out based on organoleptic, physico-chemical, and rheological indicators. The experimental part of the work was based on the use of modern instrumental analysis methods, including a "Do-corder C3" farinograph to monitor the kneading process and a CT-2 structure meter for precise measurement of dough viscosity, which ensured high reliability of the obtained data. During the study, varying the dosage of beetroot powder (from 0 to 8% in 2% increments) made it possible to comprehensively study its technological effect. The influence of the beetroot powder dosage on the rheological parameters of rye dough after kneading was established. It was revealed that the addition of the powder regularly increases the water absorption capacity of the flour and the amount of mechanical energy required for kneading, which indicates the structuring effect of beet dietary fiber. The most optimal introduction of the powder is in an amount of 6% by weight of flour. At this value, the effective viscosity was 145 kPa*s, and the best indicators of gas-forming ability of the dough during fermentation were recorded, which directly correlates with the final volume and pore structure of the bread. It is shown that the optimal dosage of 6% powder not only improves the consumer properties of the product but also enriches its composition with biologically active substances, while the physico-chemical parameters (porosity reached 63%, specific volume — 1.85 cm^3/g) meet and even exceed the control values. The results of the work are of practical interest for the development of new types of functional rye-based bread products and can be recommended for implementation in baking industry enterprises to expand the range of healthy food products.

Keywords: beetroot powder, rye dough, rheological properties, bakery products, functional ingredients, bread quality.

Введение

Хлебобулочные изделия занимают важное место в питании человека. Эти продукты входят в ежедневный рацион употребления людей и являются главным источником энергии и пищевых веществ [1–4]. Разработка новых видов хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности на основе доступного отечественного сырья обусловлена задачами обеспечения продовольственной безопасности и улучшения питания населения [5–8]. Использование нетрадиционного овощного и фруктового сырья, в частности продуктов переработки овощей и фруктов, представляет собой экономически эффективную стратегию для обогащения массовых сортов хлеба [9–13].

Продукты переработки овощей и фруктов, отличающиеся низкой стоимостью и доступностью, выступают в качестве оптимальных компонентов для обогащения хлебобулочных изделий из пшеничной и ржаной муки. Включение их в рецептуру решает задачи: с одной стороны, происходит насыщение продукта нутриентами, с другой – достигается существенное улучшение технологических и качественных характеристик изделий [14–16]. Как свидетельствуют данные, овощные и фруктовые добавки выступают в роли натуральных улучшителей, положительно влияющих на цвет, структуру пористости, а также на вкус и аромат хлеба [1, 17–18].

Таким образом, совершенствование технологий хлебобулочных изделий с использованием продуктов переработки овощей и фруктов является актуальной задачей для хлебопекарной промышленности России.

Цель работы – установить влияние порошка столовой свеклы на реологические свойства ржаного теста и качественные показатели хлебобулочных изделий.

Материалы и методы

Тесто готовили опарным способом из ржаной обдирной муки по рецептуре, приведенной в таблице 1.

Таблица 1.

Рецептура приготовления ржаного теста с порошком столовой свеклы

Table 1.

Recipe for Rye Dough with Beetroot Powder

Сырье Raw material	Количество сырья (в % к массе муки) Amount of raw materials used (in % of the flour weight)
Мука ржаная обдирная Flaked rye flour	100*
Дрожжи прессованные хлебопекарные Pressed baking yeast	0,5
Соль поваренная пищевая Table salt	1,5
Порошок столовой свеклы | Powder	0, 2, 4, 6, 8
Ржаная густая закваска Rye thick sourdough	Исходя из заданной кислотности теста Based on the specified acidity of the dough
Вода Water	По расчету, исходя из консистенции теста равной 250+/ -10 *EF* By calculation, based on the consistency of the dough being equal to250+/ -10 *EF*
* Количество муки, необходимое на замес теста, устанавливали исходя из кислотности теста равной 6 град	

В процессе выполнения работы использовано сырье, соответствующее требованиям нормативной документации.

Замес теста с добавлением порошка столовой свеклы производили с использованием информационно-измерительной системы, включающей прибор «Do-corder C3», месильную емкость S300 и программируемый термостат. Частота вращения месильных органов составляла 63 об/мин. После замеса ржаное тесто имело консистенцию 250+/ -10 *EF* и температуру 26–28 °С.

Определение реологических характеристик ржаного теста после замеса осуществляли с использованием прибора «Структурометр СТ-2» [19–20] (Россия): тесто раскатывается между валками в виде пласта толщиной 15 мм. Из полученного пласта теста специальным прямоугольным пробником вырезаются две пробы теста, которые помещаются в две половинки разъемной кюветы. Между половинками кюветы помещается индентор «Пластина ребристая» и кювета защелкивается.

Подготовка пробы для ржаного теста несколько иная, т. к. оно является вязкопластичной системой с большими адгезионными свойствами. Таким образом, ржаное тесто после замеса отбирали в кювету специальной лопаточкой, а дальше по аналогии с пробоподготовкой пшеничного теста.

Результаты и обсуждение

Установлено влияние дозировки столовой свеклы от 0 до 8% с шагом 2% на параметры замеса и свойства ржаного теста (таблица 2).

Таблица 2.

Влияние дозировки порошка столовой свеклы на параметры замеса и свойства ржаного теста

Table 2.

The effect of the dosage of beetroot powder on the mixing parameters and properties of rye dough

Параметр фаринограммы Pharynogram parameter	Дозировка порошка столовой свеклы, % | Dosage of table beet powder, %				
	0	2	4	6	8
Водопоглотительная способность теста (ВПС), % Test Water Absorption Capacity (WPS), %	75,9	85,0	87,0	88,0	88,7
Продолжительность замеса B, *мин* Kneading time B, *min*	8,0	9,8	10,2	11,0	10,0
Стабильность C, *мин* | Stability C, *min*	5,1	6,2	6,8	7,0	13,5
Разжижение E, *EF* | Liquefaction E, *EF*	49	44	43	46	44
Количество механической энергии, затраченной на формирование структуры теста при замесе, W, *кДж/ кг* | Amount of mechanical energy used to form the dough structure during the kneading process, W, *кДж/кг*	9,2	10,7	11,1	11,3	11,6

Как видно из таблицы 2, продолжительность замеса теста (B) и количество механической энергии (W), затраченной на формирование его структуры при замесе, увеличиваются в определенных пределах с увеличением дозировки порошка столовой свеклы, что не позволяет однозначно установить технологическую эффективность данной добавки. Для выявления его рациональной дозировки проведены дополнительные исследования реологического поведения ржаного теста после замеса по изменению его вязкости, а также по изменению его биотехнологических свойств при брожении (рисунок 1–3).

Вязкость ржаного теста после замеса с разными дозировками порошка столовой свеклы определяли с помощью прибора «Структурометр СТ-2» (рисунок 1).

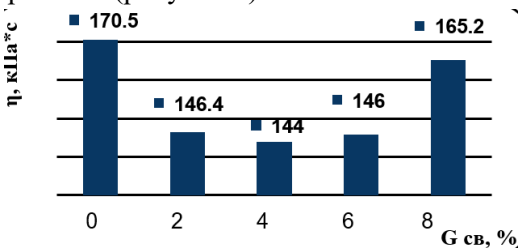


Рисунок 1. Изменение вязкости ржаного теста после замеса в зависимости от дозировки порошка столовой свеклы

Figure 1. Change in the viscosity of rye dough after kneading, depending on the dosage of beetroot powder

Как видно из рисунка 1, с увеличением дозировки порошка столовой свеклы показатель вязкости ржаного теста изменяется по параболическому закону. Минимальное значение вязкости соответствует дозировке порошка, равной 4%. В то же время анализ биотехнологических свойств ржаного теста (рисунок 2 и 3) показал, что максимальное количество образующегося диоксида углерода наблюдалось при дозировке порошка столовой свеклы, равной 6%.

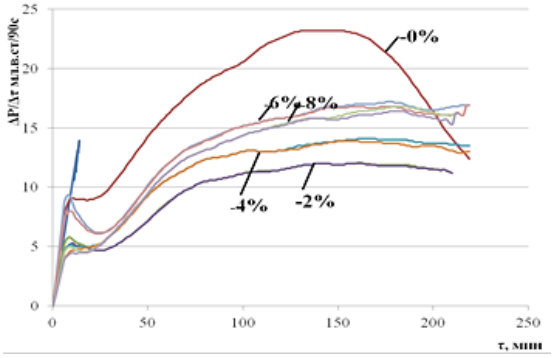


Рисунок 2. Изменение скорости давления образующегося диоксида углерода в процессе брожения ржаного теста при разных дозировках свекольного порошка

Figure 2. Change in the pressure rate of the carbon dioxide formed during the fermentation of rye dough at different dosages of beet powder

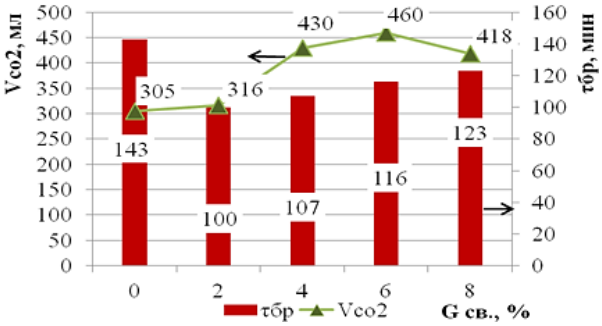
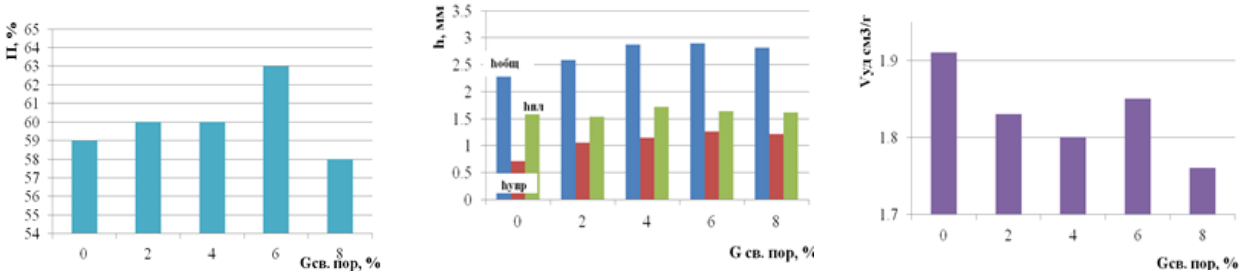


Рисунок 3. Влияние дозировки порошка столовой свеклы на изменение продолжительности брожения ржаного теста ($\tau_{бр}$) и количество образующегося диоксида углерода (Vco_2)

Figure 3. The effect of the dosage of beet powder on the change in the duration of fermentation of rye dough ($\tau_{бр}$) and the amount of carbon dioxide produced (Vco_2)

После установления оптимальной продолжительности брожения ржаного теста проводили пробные лабораторные выпечки хлебобулочных изделий. Оценку качества готовых изделий проводили по органолептическим и физико-химическим характеристикам.

Изменение удельного объема хлеба, пористости мякиша, деформационных характеристик мякиша приведено на рисунке 4.



(a) (b) (c)

Рисунок 4. Влияние дозировки порошка столовой свеклы на изменение пористости (a), удельного объема (b) и деформационные характеристики (c) мякиша хлеба

Figure 4. The effect of the dosage of beetroot powder on the change in porosity (a), specific volume (b) and deformation characteristics (c) of bread crumb

По физико-химическим показателям качество ржаного хлеба (рисунок 4) с внесением свекольного порошка, а именно, его пористость и удельный объем не уступали контрольным пробам, и находились в пределах 58–62% и 1,7–1,9 $см^3/г$, соответственно. Максимальные значения деформационных характеристик было достигнуто при дозировке порошка столовой свеклы равное 6%.

При органолептической оценке качества хлебобулочных изделий определяли: правильность формы, окраску корки, состояние поверхности, состояние мякиша, цвет мякиша, его эластичность, состояние пористости, вкус и аромат (таблица 3).

Таблица 3.

Органолептические и физико-химические показатели качества ржаного хлеба из ржаной обдирной муки с различными дозировками порошка столовой свеклы

Table 3.

Organoleptic and physico-chemical quality indicators of rye bread made from rye flour with various dosages of beetroot powder

Показатель Indicator	Дозировка порошка столовой свеклы, % | Dosage of beetroot powder, %				
	0	2	4	6	8
Внешний вид хлеба | Appearance of bread	Форма симметричная с выпуклой поверхностью | The shape is symmetrical and has a convex surface	Форма симметричная с плоской поверхностью | The shape is symmetrical and has a flat surface	Форма симметричная, поверхность выпуклая | The shape is symmetrical, the surface is convex	Форма симметричная, верхняя поверхность выпуклая | The shape is symmetrical, the upper surface is convex	Форма симметричная, верхняя поверхность менее выпуклая, чем у проб с дозировкой 4 и 6% | The shape is symmetrical, the upper surface is less convex than in samples with dosages of 4 and 6%
Цвет корки | The color of the crust	Цвет: темно-коричневый. Поверхность корки: однородная, ровная без трещин, корка тонкая | Color: dark brown. Crust surface: uniform, smooth without cracks, thin crust	Цвет: темно-коричневый. Поверхность корки: однородная, ровная, без трещин | Color: dark brown. Crust surface: uniform, smooth, without cracks	Цвет: темно-коричневый. Поверхность корки: однородная, ровная, корка тонкая | Color: dark brown. Crust surface: uniform, smooth, thin crust	Цвет: темно-коричневый. Поверхность корки: однородная, ровная, корка тонкая, без трещин | Color: dark brown. Crust surface: uniform, smooth, thin crust, without cracks	Цвет: темно-коричневый, Поверхность корки: однородная, ровная, корка тонкая | Color: dark brown. Crust surface: uniform, smooth, thin crust

Показатель Indicator	Дозировка порошка столовой свеклы, % | Dosage of beetroot powder, %				
	0	2	4	6	8
Вкус и аромат | Taste and aroma	Свойственный данному виду изделий | Characteristic of this type of products				
Пористость, % | Porosity, %	59	60	60	63	58
Крошковатость, % | Crumbiness, %	10	8,4	8,1	7,5	7,9
$V_{хлеба}$, $см^3$ | V_{bread}, cm^3	760	720	700	720	700
$V_{уд}$, $см^3/г$ | V_{Sp}, cm^3/g	1,91	1,83	1,8	1,85	1,76

Заключение

На основании комплексных исследований установлено влияние дозировки порошка столовой свеклы на водопоглотительную способность ржаной муки при замесе теста и его реологическое поведение, а также параметры приготовления теста и показатели качества готовых изделий. Установлена рациональная дозировка порошка столовой свеклы при производстве ржаного хлеба, равная 6%. При этом значение эффективной вязкости составляло 145 кПа×с.

Таким образом, разработка технологий с применением данного сырья способствует созданию качественных и доступных продуктов массового спроса, соответствующих современным требованиям здорового питания.

Литература

1 Боташева Х.Ю., Лукина С.И., Пономарева Е.И. и др. Влияние нетрадиционных видов сырья на технологические показатели теста и качество хлеба // Пищевая технология. 2016. № 4. С. 21–24.

2 Костюченко М.Н., Тюрина О.Е., Тюрина И.А. и др. Формирование рецептурного состава хлебопекарных композитных смесей для здорового питания // Хлебопечение России. 2018. № 3. С. 20–23.

3 Wang Y., Jian C. Sustainable plant-based ingredients as wheat flour substitutes in bread making // Science of Food. 2022. V. 6. № 1. P. 49. doi: 10.1038/s41538-022-00163-1

4 Kourkouta L., Kourkourikos K., Iliadis C. et al. Bread and health // Journal of Pharmacology and Pharmaceutical Research. 2017. V. 1. № 1. P. 5. doi: 10.17265/2328-2150/2017.11.005

5 Беляев А.Г., Пьяникова Э.А., Ковалева А.Е., Бывалец О.А. Изготовление хлеба из разных сортов муки с использованием сыворотки и исследование их качественных показателей, ИК Фурье спектроскопия полученных образцов // Технология пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2018. № 3. С. 24–32.

6 Сейлхан К.Е., Жунусова Г.С. Использование нетрадиционного растительного сырья и побочных растительных компонентов в хлебопечении – перспективы и эффекты // Вестник науки. 2025. Т. 3. № 12 (93). С. 2200–2206.

7 Smirnova T.B., Temereva I.V., Tolstoguzova T.T. The use of whole-ground amaranth flour in the production of bread // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1052. № 1. P. 012027. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012027

8 Семенова Е.Г., Башкуева М.Р., Дагбаева Т.Ц., Тыхенова О.Г. Использование черемши в технологии производства ржано-пшеничного хлеба // Вестник КрасГАУ. 2022. № 8 (185). С. 173–179.

9 Amoah I., Cairncross C., Osei E.O. et al. Bioactive Properties of Bread Formulated with Plant-based Functional Ingredients: Before Consumption and Possible Links with Health Outcomes After Consumption: A Review // Plant Foods for Human Nutrition. 2022. V. 77. P. 329–339. doi: 10.1007/s11130-022-00989-6

10 Amoah I., Taarji N., Johnson P.N.T. et al. Plant-based food by-products: prospects for valorisation in functional bread development // Sustainability. 2020. V. 12. № 18. P. 7785. doi: 10.3390/su12187785

11 Ranawana V., Raikos V., Campbell F. et al. Breads fortified with freeze-dried vegetables: quality and nutritional attributes. Part I: Breads containing oil as an ingredient // Foods. 2016. V. 5. № 1. P. 19. doi: 10.3390/foods5010019

12 Ranawana V., Campbell F., Bestwick C. et al. Breads fortified with freeze-dried vegetables: quality and nutritional attributes. Part II: Breads not containing oil as an ingredient // Foods. 2016. V. 5. № 3. P. 62. doi: 10.3390/foods5030062

13 Хекилаева З.С., Гуриева А.Х. Применение яблочного пектина в рецептурах хлеба // Инновационные научные исследования. 2023. № 11. С. 45–55. doi: 10.5281/zenodo.8052760

14 Заикина М.А. Применение йодсодержащего пектинового экстракта в технологии хлеба // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты питания здорового питания. 2020. № 4. С. 8–14.

15 Purkiewicz A., Hazan Guil F., Pietrzak-Fiecko R. The Utilization of Vegetable Powders for Bread Enrichment: The Effect on the Content of Selected Minerals, Total Phenolic and Flavonoid Content, and the Coverage of Daily Requirements in the Human Diet // Applied Sciences. 2022. V. 14. № 21. P. 10022. doi: 10.3390/app142110022

16 Русина И.М., Колесник И.М. Влияние овощных порошков на динамику брожения и показатели качества пшеничного хлеба пробных выпечек // Вестник ГрГУ им. Янки Купалы. Сер. 6. Техника. 2019. Т. 6. № 2. С. 62–72.

17 Shevchenko A., Fursik O., Drobot V. et al. The Use of Wastes from the Flour Mills and Vegetable Processing for the Enrichment of Food Products // Bioconversion of Wastes to Value-added Products. Boca Raton: CRC Press, 2023. P. 1–35. doi: 10.1201/9781003324482-1

18 Заикина М.А., Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А. Разработка рецептуры хлеба ржано-пшеничного с использованием яблочного йод пектинового экстракта // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 4. С. 202–206. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-202-206

19 Черных В.Я. Информационно-измерительная система на базе прибора «Структурометр СТ-2» для контроля реологических характеристик пищевых сред // Управление реологическими свойствами пищевых продуктов. 2015. С. 24–29.

20 Черных В.Я., Жирнова Е.В. Методология управления реологическими свойствами полуфабрикатов и готовых изделий хлебопекарного производства // Хлебопечение России. 2015. № 1. С. 14–17.

References

1 Botasheva Kh.Yu., Lukina S.I., Ponomareva E.I. et al. Influence of Non-Traditional Types of Raw Materials on Technological Parameters of Dough and Bread Quality. Food Technology. 2016. no. 4. pp. 21–24. (in Russian).

2 Kostyuchenko M.N., Tyurina O.E., Tyurina I.A. et al. Formation of the Recipe Composition of Bakery Composite Mixtures for Healthy Nutrition. Baking in Russia. 2018. no. 3. pp. 20–23. (in Russian).

3 Wang Y., Jian C. Sustainable plant-based ingredients as wheat flour substitutes in bread making. Science of Food. 2022. vol. 6. no. 1. article 49. doi: 10.1038/s41538-022-00163-1.

4 Kourkouta L., Kourkourikos K., Iliadis C. et al. Bread and health. Journal of Pharmacology and Pharmaceutical Research. 2017. vol. 1. no. 1. article 5. doi: 10.17265/2328-2150/2017.11.005.

5 Belyaev A.G., Pyanikova E.A., Kovaleva A.E., Byvalets O.A. Manufacturing Bread from Different Types of Flour Using Whey and Study of Their Quality Indicators, IR Fourier Spectroscopy of the Obtained Samples. Technology of Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products. 2018. no. 3. pp. 24–32. (in Russian).

6 Seilkhan K.E., Zhunusova G.S. The Use of Non-Traditional Plant Raw Materials and By-Product Plant Components in Baking – Prospects and Effects. Bulletin of Science. 2025. vol. 3. no. 12 (93). pp. 2200–2206. (in Russian).

7 Smirnova T.B., Temereva I.V., Tolstoguzova T.T. The use of whole-ground amaranth flour in the production of bread. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. vol. 1052. no. 1. article 012027. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012027.

8 Semenova E.G., Bashkueva M.R., Dagbaeva T.Ts., Tykenova O.G. The Use of Wild Garlic in the Technology of Rye-Wheat Bread Production. Bulletin of KrasGAU. 2022. no. 8 (185). pp. 173–179. (in Russian).

9 Amoah I., Cairncross C., Osei E.O. et al. Bioactive Properties of Bread Formulated with Plant-based Functional Ingredients: Before Consumption and Possible Links with Health Outcomes After Consumption: A Review. Plant Foods for Human Nutrition. 2022. vol. 77. pp. 329–339. doi: 10.1007/s11130-022-00989-6.

10 Amoah I., Taarji N., Johnson P.N.T. et al. Plant-based food by-products: prospects for valorisation in functional bread development. Sustainability. 2020. vol. 12. no. 18. article 7785. doi: 10.3390/su12187785.

11 Ranawana V., Raikos V., Campbell F. et al. Breads fortified with freeze-dried vegetables: quality and nutritional attributes. Part I: Breads containing oil as an ingredient. Foods. 2016. vol. 5. no. 1. article 19. doi: 10.3390/foods5010019.

12 Ranawana V., Campbell F., Bestwick C. et al. Breads fortified with freeze-dried vegetables: quality and nutritional attributes. Part II: Breads not containing oil as an ingredient. Foods. 2016. vol. 5. no. 3. article 62. doi: 10.3390/foods5030062.

13 Khekilaeva Z.S., Gurieva A.Kh. Application of Apple Pectin in Bread Formulations. Innovative Scientific Research. 2023. no. 11. pp. 45–55. doi: 10.5281/zenodo.8052760 (in Russian).

14 Zaikina M.A. Application of Iodine-Containing Pectin Extract in Bread Technology. Technologies of Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products. 2020. no. 4. pp. 8–14. (in Russian).

15 Purkiewicz A., Hazan Guil F., Pietrzak-Fiecko R. The Utilization of Vegetable Powders for Bread Enrichment: The Effect on the Content of Selected Minerals, Total Phenolic and Flavonoid Content, and the Coverage of Daily Requirements in the Human Diet. Applied Sciences. 2022. vol. 14. no. 21. article 10022. doi: 10.3390/app142110022.

16 Rusina I.M., Kolesnik I.M. Influence of Vegetable Powders on Fermentation Dynamics and Quality Indicators of Wheat Bread from Test Bakings. Bulletin of Yanka Kupala Grodno State University. Series 6. Engineering. 2019. vol. 6. no. 2. pp. 62–72. (in Russian).

17 Shevchenko A., Fursik O., Drobot V. et al. The Use of Wastes from the Flour Mills and Vegetable Processing for the Enrichment of Food Products. In: Bioconversion of Wastes to Value-added Products. Boca Raton: CRC Press, 2023. pp. 1–35. doi: 10.1201/9781003324482-1.

18 Zaikina M.A., Kovaleva A.E., Pyanikova E.A. Development of a Recipe for Rye-Wheat Bread Using Apple Iodine-Pectin Extract. Bulletin of VSUET. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 202–206. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-202-206 (in Russian).

19 Chernykh V.Ya. Information-Measuring System Based on the "Structurometer ST-2" Device for Monitoring the Rheological Characteristics of Food Media. In: Management of Rheological Properties of Food Products. 2015. pp. 24–29. (in Russian).

20 Chernykh V.Ya., Zhirnova E.V. Methodology for Managing the Rheological Properties of Semi-Finished Products and Finished Products in Bakery Production. Baking in Russia. 2015. no. 1. pp. 14–17. (in Russian).

Сведения об авторах

Наталья В. Родичева к.т.н., руководитель, департамент контроля качества и сертификации, ООО «ИРЕКС ТРИЭР», ул. Щипок, 18, стр. 3, г. Москва, 115093, Россия, rodicheva@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0000-0000-0000

Юрий А. Болтенко к.т.н., кафедра технологии продуктов питания, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия, boltenko@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0003-2183-2263

Нина И. Мячикова к.т.н., доцент, кафедра технологии продуктов питания, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия, myachikova@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0001-7997-0605

Information about authors

Natal'ya V. Rodicheva Cand. Sci. (Engin.), Director, Department of Quality Control and Certification, IREKS TRIER LLC, Shchipok St., 18, p. 3, Moscow, 115093, Russia, rodicheva@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0000-0000-0000

Yurij A. Boltenko Cand. Sci. (Engin.), Food technology department, Belgorod State National Research University, Pobedy Str., 85, Belgorod, 308015, Russia, boltenko@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0003-2183-2263

Nina I. Myachikova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Food technology department , Belgorod State National Research University, Pobedy Str., 85, Belgorod, 308015, Russia, myachikova@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0001-7997-0605

Ирина Г. Зиновьева старший преподаватель, кафедра технологии продуктов питания, Белгородский национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия, zinovyeva@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0000-0000-0000

Лариса Н. Фролова д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет пищевых производств, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия), kaf-mapp@vsuet.ru
https://orcid.org/0000-0002-6505-4136

Анна А. Дерканосова д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет пищевых производств, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Irina G. Zinov'eva Senior lecturer, Food technology department, Belgorod State National Research University, Pobedy Str., 85, Belgorod, 308015 Russia, zinovyeva@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0000-0000-0000

Larisa N. Frolova Doc. Sci. (Engin.), professor, Department of Food Production Machines and Apparatuses, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-mapp@vsuet.ru
https://orcid.org/0000-0002-6505-4136

Anna A. Derkanosova Doc. Sci. (Engin.), professor, service and restaurant business, department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/01/2026	**После редакции** 01/02/2026	**Принята в печать** 23/02/2026

Received 03/01/2026	**Accepted in revised** 01/02/2026	**Accepted** 23/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-47-53 Оригинальная статья/Research article
УДК 639.371 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка рецептур псевдокапсулированных рыбных комбикормов

Константин В. Мишинев [1] mishinev.k@yandex.ru 0009-0006-0202-7700
Александр Н. Остриков [1] ostrikov27@ya.ru 0000-0002-2335-0017

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Актуальность статьи обусловлена тем, что, используемые в промышленности полноценные рыбные комбикорма легкорастворимы в воде и, попадая в воду, быстро вымываются и не поступают в достаточном количестве в организм рыб. В статье представлен новый подход к формированию рецептов псевдокапсулированных продукционных комбикормов для ценных пород рыб, основанный на применении такого принцип питания, как «Бочка Либиха», который направлен на формирование сбалансированного содержания всех аминокислот. В частности, дефицит любой незаменимой аминокислоты ведёт к тому, что избыток других аминокислот не дает повышения продуктивности, т. к. организм рыбы тратит энергию на дезаминирование избытка аминокислот, а не на собственный рост. Поэтому при разработке рецептур нового поколения необходимо не только устранить дефицит какой-либо аминокислоты, но и сбалансировать содержание всех незаменимых аминокислот в составе рыбного комбикорма на оптимальном уровне для достижения высокой продуктивности. В составе разрабатываемых псевдокапсулированных комбикормов уменьшили содержание рыбной муки за счет увеличения таких белковых концентратов, как амаратный жмых, а также лизина, пробиотиков, премикса, фитазы, минеральных добавок, кальция и фосфора, ß – каротина капсантал для окрашивания мышц форели и лосося. Кроме того, в состав комбикормов вводились автотрофные микроорганизмы (дрожжи, бактерии), которые превращают простые сахара, соли аммония, спирт, уксусную кислоту и т. д. в ценные кормовые белки. Продукты микробиосинтеза применялись в стартовых кормах для некоторых видов рыб, личинки которых при переходе к активному питанию ещё не имеют достаточно развитой пищеварительной системы. В результате были разработаны рецепты псевдокапсулированных продукционных комбикормов для ценных пород рыб: для осетровых (ОПО – оптимальный, продукционный; ОПЭ – экономичный, продукционный; для маточного стада ОМ), для форелево-осетровых (ОПФ – оптимальный, продукционный; ЭПФ – экономичный, продукционный; для маточного стада ФМ), для сиговых (ОПС – оптимальный, продукционный; ЭПС – экономичный, продукционный; для маточного стада СМ). Испытание опытных партий псевдокапсулированных комбикормов проводили на годовиках и мальках русского осетра в крестьянско-фермерском хозяйстве «Малахов А.Е.» с полным контролем условий среды выращивания. Изучали темп роста рыб, величину смертности, кормовой коэффициент, показатели упитанности и среднесуточных приростов. Авторы доказывают, что разработанные рецептуры псевдокапсулированных продукционных комбикормов для ценных пород рыб позволили повысить усвояемость рыбами комбикормов на 11-13 %, повысить привесы ценных пород рыб на 10-12 %, снизить стоимость товарной продукции рыбоводства на 8-11 %, снизить конверсию корма на 13 %.

Ключевые слова: рецептура, псевдокапсулирование, рыбный комбикорм, испытание, показатели качества, незаменимые аминокислоты.

Development of recipes for pseudo-encapsulated fish feed

Konstantin V. Mishinev [1] mishinev.k@yandex.ru 0009-0006-0202-7700
Alexander N. Ostrikov [1] ostrikov27@ya.ru 0000-0002-2335-0017

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The relevance of the article is due to the fact that full-fledged fish feed used in the industry is easily soluble in water and, when it enters the water, it is quickly washed out and does not enter the fish's body in sufficient quantities. The article presents a new approach to the formulation of recipes for pseudo-encapsulated production feed for valuable fish breeds, based on the use of the "Liebig Barrel" feeding principle, which aims to create a balanced content of all amino acids. In particular, a deficiency of any essential amino acid leads to the fact that an excess of other amino acids does not increase productivity, because the fish's body spends energy on deaminating the excess amino acids rather than on its own growth. Therefore, when developing new-generation formulations, it is necessary not only to eliminate the deficiency of any amino acid, but also to balance the content of all essential amino acids in the fish feed at an optimal level to achieve high productivity. In the developed pseudo-encapsulated compound feed, the content of fish meal was reduced by increasing the amount of protein concentrates such as amaranth meal, as well as lysine, probiotics, premix, phytase, mineral supplements, calcium, and phosphorus, and ß-carotene capsantal for coloring the muscles of trout and salmon. In addition, autotrophic microorganisms (yeast, bacteria) were added to the compound feed, which convert simple sugars, ammonium salts, alcohol, acetic acid, etc., into valuable feed proteins. The products of microbiosis were used in the starter feed for certain fish species, whose larvae do not yet have a sufficiently developed digestive system when they begin to feed actively. As a result, recipes for pseudo-capsulated production feed for valuable fish species were developed: for sturgeon (OPO – optimal, production; OPE – economical, production; for the breeding stock, OM), for trout-sturgeon (OPF – optimal, production; EPF – economical, production; for the FM broodstock), for whitefish (OPS – optimal, productive; EPS – economical, productive; for the SM broodstock). The test of experimental batches of pseudo-capsulated compound feed was carried out on one-year-old and fry of Russian sturgeon in the Malakhov A.E. peasant farm with full control of the growing environment conditions. The authors studied the growth rate of fish, the mortality rate, the feed conversion ratio, and the indicators of body condition and average daily growth. The authors prove that the developed formulations of pseudo-encapsulated production feed for valuable fish species have increased the fish's digestibility of feed by 11-13%, increased the weight gain of valuable fish species by 10-12 %, reduced the cost of fish farming products by 8-11 %, and reduced the feed conversion ratio by 13 %.

Keywords: chitin, chitosan, pseudoencapsulation, fish compound feed, inert shells, quality indicators, technology.

Для цитирования
Мишинев К.В., Остриков А.Н. Разработка рецептур псевдокапсулированных рыбных комбикормов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 47–53. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-47-53

For citation
Mishinev K.V., Ostrikov A.N. Development of recipes for pseudo-encapsulated fish feed. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 47–53. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-47-53

© 2026, Мишинев К.В. и др. / Mishinev K.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Объемы производства рыбных комбикормов в России составляет по данным Росрыболовства около 20 тыс. тонн, около 85–90 % рыбных комбикормов импортируется из-за рубежа [1, 2]. В 2025 году планировалось вырастить более 600 тыс. т рыбы, для реализации этого показателя необходимо увеличить объем производимых рыбных комбикормов до 900 тыс. тонн [3]. К сожалению, отечественные производители производят, в основном, комбикорма для карповых, а не для ценных пород рыб (лососевых, осетровых и форелевых), которые практически полностью (до 90 %) ввозятся из-за рубежа. Поэтому существует острая потребность в расширении производства рыбных кормов для ценных пород рыб. [4, 10].

В настоящее время учеными разработаны полноценные рецептуры комбикормов, обладающие сбалансированным составом, содержащим необходимые питательные компоненты (белки, жиры, витамины, минералы и т. п.), в том числе минеральные и биологически активные вещества. Однако большинство из них легкорастворимы в воде, попадая в воду в составе корма они быстро вымываются и не поступают в достаточном количестве в организм рыб [6, 7, 9, 10]. Отсутствие псевдокапсулированных комбикормов, исключающих, с одной стороны, быстрое растворение защитной оболочки в воде, и обладающих, с другой стороны, высокой герметичностью, наличием антимикробных свойств и иммунитетного эффекта и повышающих усвояемость комбикорма, значительно замедляет воспроизводство популяций ценных пород рыб – форели, осетровых, лососевых и других [11, 12].

Этих недостатков лишена технология псевдокапсулирования, которую можно использовать для создания рыбных комбикормов нового поколения, в частности, с введением лекарственных препаратов, отдельных микрокомпонентов для введения в стартовые комбикорма, а также легкорастворимых в воде минерально-витаминных комплексов. При этом защитное покрытие гранул комбикорма должны препятствовать вымыванию содержащихся в них веществ, но быть растворимы в щелочной среде переднего отдела кишечника у безжелудочных рыб или в кислой среде желудка у рыб с кислотно-щелочным типом пищеварения.

Покрытие гранул при производстве псевдокапсулированных комбикормов инертной оболочки обосновано необходимостью защиты компонентов комбикорма от контакта с влагой и кислородом, содержащимися в воздухе. Это повышает хранимоспособность комбикормов, так как комбикорма дольше не окисляются и не распадаются [8–9].

Анализ данных по изучению потребности рыб в незаменимых аминокислотах показывает, что достаточно часто публикуется рекомендуемый аминокислотный профиль для всего периода выращивания ценных пород рыб [5]. При этом игнорируется различия в потребностях аминокислот и протеине в разные периоды жизнедеятельности рыб. Различный состав используемых кормов, качество воды и уровень насыщения воды кислородом влияют на получаемые результаты [7].

Berntssen M.H.G. и др. [11] исследовал допустимые уровни добавок селенометионина и селенита к кормам атлантического лосося, установлено, что замена рыбной муки на растительную муку для разработки аквакормов приводит к снижению уровня селена. Они определили, что атлантический лосось допускает добавление селенита или селено-метионина до уровня общего количества селена 1–2 или 3 мг на кг корма.

Dadras H. и др. [12] исследовали влияние двух диетических лекарственных трав, добавок Rose hip (Rosa canina) и Safflower (Carthamus tinctorius) на показатели роста, гематологические, биохимические параметры и врожденный иммунный ответ у молодой белуги, Huso huso. Коэффициент конверсии корма (FCR), удельный темп роста (SGR) и коэффициент состояния (CF) не выявили значительных различий у рыб при травяных диетах. Полученные результаты показывают, что введение лекарственных трав в состав рыбных комбикормов можно рассматривать как полезную диетическую добавку для улучшения физиологических параметров и усиления иммунного ответа осетра.

В работе [13] были определены показатели роста и строение тела российских осетровых (Acipenser gueldenstaedii) и были определены при четырех разных скоростях кормления (FR, % массы тела [BW] в день). Рыб кормили гранулы с содержанием белка 42 % и жира 18 %. Результаты исследования показывают, что для российского осетра оптимальный уровень кормления составляет 2 % от массы тела в день. При этом оптимальная скорость кормления осетрового молодняка со средним весом 248,194 ± 1,59 г. составляла 2 % от массы в день.

В [14] показаны исследования по оценке влияния режима кормления в течение дня на рост годовалого осетра Acipenser stellatus. Средний вес и длина осетровых в конце исследования составляли 406 ± 96 г. и 55,4 ± 4,4 см. Результаты этого исследования свидетельствуют о том, что годовалый осетр можно кормить через день, а не ежедневно. Режим кормления через день может привести к экономии кормов для коммерческой эксплуатации, помочь защитить природные ресурсы, например,

для приготовления рыбной муки, и уменьшить воздействие избыточных питательных веществ в естественных водоемах.

В работе [15] представлена оценка качества готового корма для осетровой молоди на основе показателей роста и сохранения питательных веществ). Были приведены результаты кормления готового корма для молодых озерных осетровых *Acipenser fulvescens* и определена оптимальная скорость подачи мягко-влажного корма на показатели роста и состав всего тела рыбы. Скорость роста и набор массы тела, и содержание влаги в значительной степени зависели от уровня кормления в обоих исследованиях. Уровни тирозина, изолейцина, лизина, фенилаланина и валина у рыбы были скорректированы в зависимости от скорости кормления. Эти результаты указывают на то, что группе осетровых можно давать готовый корм после акклиматизации к приготовленному корму.

Поэтому дальнейшее ускоренное развитие отечественной комбикормовой индустрии для аквакультуры является важной задачей для развития рыборазведения.

Материалы и методы

Для оценки физико-механических свойств псевдокапсулированных комбикормов определяли следующие показатели: определение запаха – по ГОСТ 13496.13–2018; определение массовой доли влаги – по ГОСТ 31640–2012, 13496.3–92 (ИСО 6496–83), 32040–20212; определение водостойкости – по ГОСТ 28758–97, определение массовой доли протеина – по ГОСТ 13496.4–2019, 32040–2012, 32044.1 (ISO 5983–1:2005), определение массовой доли сырой клетчатки – по ГОСТ 31675–2012, 32040–2012, определение крошимости – по ГОСТ 28497–2014, определение массовой доли сырой золы – по ГОСТ 13496.15–2016, 32040–2012, определение массовой доли фосфора – по ГОСТ 26657, 32041, определение массовой доли лизина – по ГОСТ 13496.21, 31480, 32195, определение массовой доли метионина и цистина – по ГОСТ 13496.22, 31480, 32195.

Определение размера гранул проводят с помощью линейки, измеряя диаметр и длину десяти гранул, взятых подряд. По полученным данным вычисляют среднеарифметическое значение диаметра и длины гранул.

Результаты

При разработке рецептур псевдокапсулированных комбикормов для ценных пород рыб был применен принцип питания, известный как «Бочка Либиха», суть которого заключается в достижении и формировании сбалансированного содержания всех аминокислот [7]. В частности, дефицит любой незаменимой аминокислоты ведёт к тому, что избыток других аминокислот не дает повышения продуктивности, т. к. организм рыбы тратит энергию на дезаминирование избытка аминокислот, а не на собственный рост. Поэтому при разработке рецептур нового поколения необходимо не только устранить дефицит какой-либо аминокислоты, но и сбалансировать содержание всех незаменимых аминокислот в составе рыбного комбикорма на оптимальном уровне для достижения высокой продуктивности.

Для достижения этого оптимального уровня, называемого «идеальным протеином», был положен принцип «Бочки Либиха» в основу составления рецептур для псевдокапсулированных комбикормов для достижения максимальной эффективности скармливания. Реализация этого принципа позволит сократить до 10 % содержания сырого протеина в кормах, достигая «концепцию низкопротеиновых рационов». Таким образом, снижается как количество азота, так и количество неусвоенного фосфора (слабоусвояемого) фосфора из костных элементов муки. Другим способом снижения уровня неусваиваемого фитатного фосфора растительных клеток является использование фермента фитазы, расщепляющей фитатные соединения растительных ингредиентов. Расчет рецептов комбикормов проводили на основе созданной матрицы состава кормовых компонентов (аминокислот, общие химические вещества P, Ca). Использовали специальные кормовые таблицы [7, 16, 17] состава кормовых компонентов и данные производителей нового комбикормового сырья (амарантовый жмых, ценные кормовые белки на основе автотрофных микроорганизмов, кормовые дрожжи и т. д.).

Потребности рыб в кормах и питательных веществах зависят от многих факторов, в первую очередь от окружающей водной среды. Необходимо учитывать возраст рыбы и ее физиологическое состояние и, как следствие, питательную ценность комбикормов (таблица 1).

Разрабатываемые псевдокапсулированные комбикорма имели следующие условные индексы (таблица 1): осетровые: продукционный оптимальный – ОПО, продукционный экономичный – ОПЭ (для рыб массой от 100 г. и более 500 г.), для маточного стада – ОМ; форелево–лососевые: продукционный оптимальный (ОПФ) и экономичный (ЭПФ) для рыб массой от 100 г. до 250 г. и выше, для маточного стада – ФМ; сиговые: продукционный оптимальный – ОПС и экономичный – ЭПС для рыб массой 100 г. – 250 г. и более, для маточного стада – СМ.

Комбикорма изготавливали на лабораторном оборудовании. Испытание опытных партий псевдокапсулированных комбикормов проводили на годовиках и мальках русского осетра в крестьянско-фермерском хозяйстве «Малахов А.Е.» (от массы тела 5,2–5,3 г до массы тела 700 г.) за 300 сут (январь – ноябрь 2025 г.) с полным контролем условий среды выращивания.

Изучали темп роста рыб, величину смертности, кормовой коэффициент, показатели упитанности и среднесуточных приростов. Температуру воды для осетра поддерживали на уровне 295–299 К, содержание кислорода 7–8 мг/л, pH 6,5–6,7.

В составе разрабатываемых псевдокапсулированных комбикормов уменьшили содержание рыбной муки за счет увеличения таких белковых концентратов, как амаратный жмых, а также лизин, пробиотик, премикс, фитазу для разрушения лигнинофитатных комплексов в растительном сырье, минеральные добавки кальция и фосфора, ß – каротин капсантал для окрашивания мышц форели и лосося.

Показатели качества псевдокапсулированных продукционных комбикормов для осетровых, форелево-лососевых и сиговых рыб представлены в таблице 2.

Состав незаменимых аминокислот в рецептах псевдокапсулированных комбикормов, предназначенных для выращивания осетровых, форелево-лососевых и сиговых представлены в таблице 3.

Таблица 1.

Рецепты псевдокапсулированных комбикормов для ценных пород рыб, %

Table 1.

Recipes for pseudo-encapsulated feed for valuable fish breeds, %

Кормовые компоненты Compounds	Осетровые Sturgeon			Форелево-лососевые Trout and salmon			Сиговые | Whitefish		
	ОПО	ОПЭ	ОМ	ОПФ	ЭПФ	ФМ	ОПС	ЭПС	СМ
Мука рыбная | Fish meal	26,8	24,4	34,45	29,13	23,53	32,15	32,23	27,23	30,0
Соевый концентрат | Soy concentrate	-	-	5,0	3,0	-	3,0	3,0	-	3,2
Мука мясная | Meat meal	4,2	5,1	4,0	5,5	-	4,0	6,0	-	4,2
Мука мясокостная | Meat and bone meal	5,53	5,0	4,0	-	4,0	4,0	-	4,0	4,3
Дрожжи кормовые | Feed yeast	3,2	4,0	-	3,0	-	-	3,0	-	-
Мука кровяная | Blood meal	8,3	8,0	8,0	4,0	-	8,1	4,0	-	8,1
Мука кукурузная | Corn meal	4,3	3,4	4,4	4,0	4,0	6,6	4,0	4,0	6,6
Соевый шрот | Soybean meal	8,8	8,1	8,0	6,8	10,0	9,2	5,6	8,1	9,3
Пшеница | Wheat	7,0	7,0	7,0	6,0	5,0	5,0	6,0	5,0	6,3
Кукурузный глютен | Corn gluten	10,4	10,42	10,0	13,6	14,1	10,6	13,0	17,7	9,2
Жмых амарантный | Amaranth cake	6,9	7,9	-	6,0	15,0	6,0	6,0	14,0	6,0
Хитозан | Chitosan	1,1	2,4	1,9	1,1	1,5	1,4	1,1	1,8	1,2
Белковый концентрат | Protein concentrate	3,2	3,81	3,4	3,4	3,0	2,8	3,6	3,8	3,45
Рыбий жир | Fish oil	6,7	8,0	7,7	10,0	13,0	5,0	8,0	10,0	6,0
Подсолнечное масло | Sunflower oil	1,2	0,4	-	2,0	4,1	-	2,0	2,0	-
L-лизин | L-lysine	0,3	0,4	-	0,2	0,3	-	0,2	0,3	-
Фитаза | Phytase	0,02	0,02	-	0,02	0,02	-	0,02	0,02	-
Оксикап | Oxicap	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Карбонат кальция | Calcium carbonate	0,6	0,6	0,3	0,6	0,6	0,3	0,6	0,5	0,3
Монокальций фосфат | Monocalcium phosphate	0,6	-	0,3	0,6	0,6	0,3	0,6	0,5	0,3
Премикс | Premix	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5

Таблица 2.

Показатели качества псевдокапсулированных продукционных комбикормов для ценных пород рыб

Table 2.

Quality indicators of pseudo-encapsulated production feed for valuable fish breeds

Показатели Index	Осетровые Sturgeon			Форелево-лососевые Trout and salmon			Сиговые | Whitefish		
	ОПО	ОПЭ	ОМ	ОПФ	ЭПФ	ФМ	ОПС	ЭПС	СМ
Обменная энергия, МДж | Metabolizable energy, MJ	12,6	12,6	12,0				32,23	27,23	30,0
Сырой протеин, % | Crude protein, %	45,0	42,0	50,0	45,0	40,0	48,0	45,0	40,0	48,0
Сырой жир, % | Crude fat, %	10,0	12,0	10,0	18,0	23,0	11,0	16,0	18,0	12,0
Сырые углеводы, % | Crude carbohydrates, %	27,6	35,6	23,0	16,3	16,1	23,8	16,3	16,1	23,8
Сырая клетчатка, % | Crude fiber, %	2,2	2,4	1,5	2,4	2,6	1,7	2,4	2,6	1,7
Минеральные вещества, % | Minerals, %	8,2	8,0	8,5	8,3	8,3	8,5	8,3	8,3	8,5
Влага, % | Moisture, %	6–7	6–7	6–7	6–7	6–7	6–7	6–7	6–7	6–7
Ca	3,0	2,8	3,2	3,2	2,8	3,2	3,2	2,8	3,2
P	2,1	1,8	2,5	2,1	1,9	2,2	2,1	1,9	2,2
Незаменимые жирные кислоты линоленового ряда (ω 3), % Essential linolenic fatty acids (ω 3), %	2,0	2,1	2,0	2,5	2,7	1,6	2,5	2,7	1,6
Незаменимые жирные кислоты линолевого ряда (ω 6), % Essential linolenic fatty acids (ω 6), %	1,0	1,0	1,0	0,8	1,2	0,6	0,7	1,1	0,6
Общая энергия, МДж | Total energy, MJ	19,6	21	20	23,2	21,5	22,1	23,2	21,5	22,1
Переваримая энергия, МДж | Digestible energy, MJ	15,5	16,6	15,8	18,3	17,0	17,5	18,3	17,0	17,5

Таблица 3.

Состав незаменимых аминокислот в рецептах псевдокапсулированных комбикормов для ценных пород рыб

Table 3.

Composition of essential amino acids in recipes for pseudo-encapsulated feed for valuable fish breeds

Аминокислота Amino acid	Осетровые Sturgeon			Форелево-лососевые Trout and salmon			Сиговые | Whitefish		
	ОПО	ОПЭ	ОМ	ОПФ	ЭПФ	ФМ	ОПС	ЭПС	СМ
Lys	27,0	26,3	30,9	27,1	21,4	30,4	2,71	3,4	2,96
Met + Cys	9,6	8,8	10,4	10,8	10,7	10,7	1,12	1,16	1,0
Try	4,5	4,4	4,9	6,4	5,9	5,5	0,66	0,64	0,49
Arg	23,4	24,8	28,0	24,8	22,8	30,9	2,55	2,65	2,7
Gys	11,7	11,1	13,0	10,7	9,5	12,6	2,09	1,03	1,1
Ley	30,8	31,3	33,3	29,5	25,9	37,5	3,04	2,83	3,34
IsoLey	21,5	14,9	16,7	18,2	16,1	22,7	1,88	1,76	2,01
Phe	21,6	22,4	23,6	21,8	20,6	26,1	1,19	1,56	2,37
Tre	16,9	13,8	14,9	17,4	16,4	19,0	1,79	1,79	1,77
Val	21,0	20,9	23,0	21,6	20,6	25,4	2,23	2,25	2,21

Корма для сиговых, также из семейства лососевых по уровню протеина близки к кормам для форели и лососевых рыб (46–50 %), но в них меньше жира – 14–18 %.

В состав псевдокапсулированных комбикормов вводились автотрофные микроорганизмы (дрожжи, бактерии), которые превращают простые сахара, соли аммония, спирт, уксусную кислоту и т. д. в ценные кормовые белки. Продукты микробиосинтеза применялись в стартовых кормах для некоторых видов рыб, личинки которых при переходе к активному питанию ещё не имеют достаточно развитой пищеварительной системы. Состав белка, полученного с помощью микроорганизмов, обеспечивает потребности личинок рыб в структурном материале для роста, так как они легко усваиваются в нативном виде и не требуют глубокой ферментативной обработки.

Присутствие мелких фракций белка позволяет создавать псевдокапсулированные комбикорма с рациональным балансом аминокислот, что способствует их росту и снижает риск заболеваний. Содержание продуктов микробиосинтеза, вводимых в состав продукционных комбикормов для ценных пород рыб, колебалось в диапазоне от 4 до 12 %.

Заключение

1. Разработаны рецепты псевдокапсулированных продукционных комбикормов для ценных пород рыб для осетровых (ОПО – оптимальный, продукционный; ОПЭ – экономичный, продукционный; для маточного стада ОМ), для форелево-осетровых (ОПФ – оптимальный, продукционный; ЭПФ – экономичный, продукционный; для маточного стада ФМ), для сиговых (ОПС – оптимальный, продукционный; ЭПС – экономичный, продукционный; для маточного стада СМ) с использованием такого принципа питания, как «Бочка Либиха».

2. Разработанные рецептуры псевдокапсулированных продукционных комбикормов для ценных пород рыб позволили повысить усвояемость рыбами комбикормов на 11–13 %, повысить привесы ценных пород рыб на 10–12 %, снизить стоимость товарной продукции рыбоводства на 8–11 %, снизить конверсию корма на 13 %.

3. Успешно прошла производственные испытания опытная партия псевдокапсулированных комбикормов, апробированная на годовиках и мальках русского осетра в крестьянско-фермерском хозяйстве «Малахов А.Е.» (от массы тела 5,2–5,3 г до массы тела 700 г.) за 300 сут (январь – ноябрь 2025 г.) с полным контролем условий среды выращивания.

Литература

1 Чурилов А.В. Проблемы сохранения и удержания стада в условиях фермерского осетроводческого хозяйства // Вестник науки. 2023. Т. 5. № 12 (69). С. 123–139.

2 Волошин Г.А., Борисов А.Н., Григорьев В.С. и др. Состояние и перспективы развития рынка комбикормов для индустриальной аквакультуры в Российской Федерации // Труды ВНИРО. 2022. Т. 190. С. 163–169.

3 Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Богомолов И.С. и др. Разработка технологии высокоусвояемых комбикормов с вакуумным напылением жидких компонентов // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 94–101.

4 Афанасьев В.А., Богомолов И.С., Остриков А.Н. и др. Технология и оборудование для производства комбикормов для ценных пород рыб // Комбикорма. 2021. № 1. С. 24–28.

5 Пахомов В.И., Хлыстунов В.Ф., Брагинец С.В., Бахчевников О.Н. Состояние и перспективы использования растительного сырья в кормах для аквакультуры (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. Т. 23. № 3. С. 281–294. doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294

6 Бектурсунова М.Ж., Семенова А.А., Новикова Е.В. и др. Использование нетрадиционных видов сырья при производстве комбикормов для ценных видов рыб // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 2. С. 34–49.

7 Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Кочкин И.Ю. и др. Разработка продуктивных псевдокапсулированных комбикормов для радужной форели, выращиваемой в Центральном федеральном округе Российской Федерации // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 1. С. 174–179. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-174-179

8 Крутских С. Технология псевдокапсулирования – современный подход к производству премиксов и кормовых добавок. URL: https://agroserver.ru/ (дата обращения: 17.01.2026).

9 Михайлова М.В. Технология микрокапсулирования в комбикормах для молоди ценных видов рыб // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2017. № 3. С. [уточнить страницы].

10 Коноваленко Л.Ю., Мишуров Н.П., Пономарев С.В., Федоровых Ю.В. Технологии производства кормов для аквакультуры: монография. М.: Росинформагротех, 2020. 80 с.

11 Berntssen M.H.G., Betancor M.B., Caballero M.J., Hillestad M. Safe limits of selenomethionine and selenite supplementation to plant-based Atlantic salmon feeds // Aquaculture. 2018. V. 495. P. 611–618. doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.06.041

12 Safari R., Hoseinifar S.H., Imanpour M.R. et al. The effects of multi-enzyme and betaine on growth performance, body composition haemato-immunological parameters and expression of growth-related genes in beluga (Huso huso) // Aquaculture. 2022. V. 549. P. 737784. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737784

13 Fakhrian M., Morshedi V., Zefrehei A.R.P. Effects of deprivation and compensatory growth feed on growth and feeding performance, body composition, blood parameters and structure of liver and intestine tissues in juvenile Siberian sturgeon (Acipenser baerii) // Journal of Animal Environment. 2021. Т. 13. № 3. С. 155–164.

14 Ahmadi S.M., Vahabzadeh Roudsari H., Khara H. et al. Optimum growth, enzymatic and biochemical reactions of stellate sturgeon, Acipenser stellatus juveniles in response to the feeding frequency and exposure to environmental salinity // Caspian Journal of Environmental Sciences. 2024. P. 1–12. doi: 10.22124/cjes.2024.8300

15 Lee S., Zhao H., Li Y. et al. Evaluation of Formulated Feed for Juvenile Lake Sturgeon Based on Growth Performance and Nutrient Retention // North American Journal of Aquaculture. 2018. V. 80. № 2. P. 223–236. doi: 10.1002/naaq.10028

16 Naghdi S., Mohtasebi S.S., Aghbashlo M. et al. Insights into fishery by-product application in aquatic feed and food: a review // Aquaculture International. 2024. V. 32. № 5. P. 5851–5910. doi: 10.1007/s10499-024-01468-2

17 Pourhosein-Sarameh S. Application of various sources of vegetable lipids in sturgeon feeding // Aquatic Animals Nutrition. 2022. V. 8. № 2. P. 39–52.

18 Fotodimas I., Vidalis K.L., Theodorou J.A. et al. Sustainable aquaculture through enzymatic hydrolysis of raw chitin from crab by-products: functional fish feeds targeting fish health with implications for human health // Fishes. 2025. V. 10. № 10. P. 514. doi: 10.3390/fishes10100514

19 Kumar A., Singh U., Jaiswal S.G. et al. Recent trends in the encapsulation of functional lipids: comprehensive review // Sustainable Food Technology. 2024. V. 2. № 6. P. 1610–1630. doi: 10.1039/D4FB00187G

20 Tian X.Y., Bai J.W., Fang Q. et al. Polyphenols in modern nutrition: green extraction technologies, encapsulation, and promissory applications // Food and Bioprocess Technology. 2025. V. 18. № 7. P. 6035–6065. doi: 10.1007/s11947-025-03715-1

21 Voicea I., Moga C.I., Biriș S.Ș. et al. Experimental research on obtaining pelletized feed recipes with applicability in semi-intensive aquaculture systems // E3S Web of Conferences. 2021. V. 286. P. 03005. doi: 10.1051/e3sconf/202128603005

22 Wang H., Ma S., Yang J. et al. Optimization of the process parameters for extruded commercial sinking fish feed with mixed plant protein sources // Journal of Food Process Engineering. 2021. V. 44. № 1. P. e13599. doi: 10.1111/jfpe.13599

References

1 Churilov A.V. Problems of Conservation and Retention of the Herd in the Conditions of a Farm Sturgeon Farming. Bulletin of Science. 2023. vol. 5. no. 12 (69). pp. 123–139. (in Russian).

2 Voloshin G.A., Borisov A.N., Grigoriev V.S. et al. State and Prospects of Development of the Compound Feed Market for Industrial Aquaculture in the Russian Federation. Proceedings of VNIRO. 2022. vol. 190. pp. 163–169. (in Russian).

3 Afanasyev V.A., Ostrikov A.N., Bogomolov I.S. et al. Development of Technology for Highly Digestible Compound Feeds with Vacuum Spraying of Liquid Components. Bulletin of VSUET. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 94–101. (in Russian).

4 Afanasyev V.A., Bogomolov I.S., Ostrikov A.N. et al. Technology and Equipment for the Production of Compound Feeds for Valuable Fish Species. Compound Feeds. 2021. no. 1. pp. 24–28. (in Russian).

5 Pakhomov V.I., Khlystunov V.F., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N. State and Prospects of Using Plant Raw Materials in Aquaculture Feeds (Review). Agricultural Science of the Euro-North-East. 2022. vol. 23. no. 3. pp. 281–294. doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294 (in Russian).

6 Bektursunova M.Zh., Semenova A.A., Novikova E.V. et al. The Use of Non-Traditional Types of Raw Materials in the Production of Compound Feeds for Valuable Fish Species. Bulletin of ASTU. Series: Fisheries. 2022. no. 2. pp. 34–49. (in Russian).

7 Vasilenko V.N., Frolova L.N., Kochkin I.Yu. et al. Development of Productive Pseudo-Encapsulated Compound Feeds for Rainbow Trout Cultured in the Central Federal District of the Russian Federation. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 174–179. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-174-179 (in Russian).

8 Krutskikh S. Pseudo-encapsulation Technology – A Modern Approach to the Production of Premixes and Feed Additives. Available at: https://agroserver.ru/ (accessed: 17.01.2026) (in Russian).

9 Mikhailova M.V. Microencapsulation Technology in Compound Feeds for Juvenile Valuable Fish Species. Fish Breeding and Fisheries. 2017. no. 3. pp. [Note: Please specify page numbers when available]. (in Russian).

10 Konovalenko L.Yu., Mishurov N.P., Ponomarev S.V., Fedorovykh Yu.V. Technologies for the Production of Aquaculture Feeds: A Monograph. Moscow: Rosinformagrotekh, 2020. 80 p. (in Russian).

11 Berntssen M.H.G., Betancor M.B., Caballero M.J., Hillestad M. Safe limits of selenomethionine and selenite supplementation to plant-based Atlantic salmon feeds. Aquaculture. 2018. vol. 495. pp. 611–618. doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.06.041.

12 Safari R., Hoseinifar S.H., Imanpour M.R. et al. The effects of multi-enzyme and betaine on growth performance, body composition haemato-immunological parameters and expression of growth-related genes in beluga (Huso huso). Aquaculture. 2022. vol. 549. article 737784. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737784.

13 Fakhrian M., Morshedi V., Zefrehei A.R.P. Effects of deprivation and compensatory growth feed on growth and feeding performance, body composition, blood parameters and structure of liver and intestine tissues in juvenile Siberian sturgeon (Acipenser baerii). Journal of Animal Environment. 2021. vol. 13. no. 3. pp. 155–164. (in Russian).

14 Ahmadi S.M., Vahabzadeh Roudsari H., Khara H. et al. Optimum growth, enzymatic and biochemical reactions of stellate sturgeon, Acipenser stellatus juveniles in response to the feeding frequency and exposure to environmental salinity. Caspian Journal of Environmental Sciences. 2024. pp. 1–12. doi: 10.22124/cjes.2024.8300.

15 Lee S., Zhao H., Li Y. et al. Evaluation of Formulated Feed for Juvenile Lake Sturgeon Based on Growth Performance and Nutrient Retention. North American Journal of Aquaculture. 2018. vol. 80. no. 2. pp. 223–236. doi: 10.1002/naaq.10028.

16 Naghdi S., Mohtasebi S.S., Aghbashlo M. et al. Insights into fishery by-product application in aquatic feed and food: a review. Aquaculture International. 2024. vol. 32. no. 5. pp. 5851–5910. doi: 10.1007/s10499-024-01468-2.

17 Pourhosein-Sarameh S. Application of various sources of vegetable lipids in sturgeon feeding. Aquatic Animals Nutrition. 2022. vol. 8. no. 2. pp. 39–52.

18 Fotodimas I., Vidalis K.L., Theodorou J.A. et al. Sustainable aquaculture through enzymatic hydrolysis of raw chitin from crab by-products: functional fish feeds targeting fish health with implications for human health. Fishes. 2025. vol. 10. no. 10. article 514. doi: 10.3390/fishes10100514.

19 Kumar A., Singh U., Jaiswal S.G. et al. Recent trends in the encapsulation of functional lipids: comprehensive review. Sustainable Food Technology. 2024. vol. 2. no. 6. pp. 1610–1630. doi: 10.1039/D4FB00187G.

20 Tian X.Y., Bai J.W., Fang Q. et al. Polyphenols in modern nutrition: green extraction technologies, encapsulation, and promissory applications. Food and Bioprocess Technology. 2025. vol. 18. no. 7. pp. 6035–6065. doi: 10.1007/s11947-025-03715-1.

21 Voicea I., Moga C.I., Biriș S.Ș. et al. Experimental research on obtaining pelletized feed recipes with applicability in semi-intensive aquaculture systems. E3S Web of Conferences. 2021. vol. 286. article 03005. doi: 10.1051/e3sconf/202128603005.

22 Wang H., Ma S., Yang J. et al. Optimization of the process parameters for extruded commercial sinking fish feed with mixed plant protein sources. Journal of Food Process Engineering. 2021. vol. 44. no. 1. article e13599. doi: 10.1111/jfpe.13599.

Сведения об авторах

Константин В. Мишинев аспирант, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mishinev.k@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0006-0202-7700

Александр Н. Остриков д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ostrikov27@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-2335-0017

Information about authors

Konstantin V. Mishinev graduate student, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mishinev.k@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0006-0202-7700

Alexander N. Ostrikov Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-2335-0017

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 19/01/2026	**После редакции** 02/02/2026	**Принята в печать** 23/02/2026
Received 19/01/2026	**Accepted in revised** 02/02/2026	**Accepted** 23/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-54-66 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.8.022:635.657 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Оценка эффективности инактивации фитатов в чечевице и продуктах ее переработки

Виктор Е. Плотников [1] viktor_plotnikov_1999@mail.ru 0000-0001-6707-8337
Светлана В. Образцова [1] sveta5501pavlenkova@yandex.ru 0000-0001-9539-0168
Дарья Е. Скосарь [1] dartch.skosar@yandex.ru 0009-0006-4260-8948
Валерия В. Курганская [1] kurganskaya.28.11@icloud.com 0009-0008-0568-1411
Инесса В. Плотникова [1] plotnikova_2506@mail.ru 0000-0001-5959-6652
Константин К. Полянский [1, 2] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Воронежский филиал ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова», ул. К. Маркса, 67А, г. Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. Присутствие в растительном сырье антипитательных веществ снижает его пищевую и питательную ценность. Фитиновая кислота и ее соли являются антиалиментарным фактором и оказывают негативный эффект на биодоступность и усвоение важных пищевых веществ. Эффективными способами снижения содержания фитинов является применение технологических приёмов: шелушение, замачивание, варка, проращивание, экструзия. Целью работы являлось определение наличия и содержания солей фитиновой кислоты качественным и количественным методом в нативной чечевице и в продуктах ее переработки (экструдат, сушеная и пророщенная чечевица, чечевичный экстракт (аквафаба)). Для качественного определения солей фитиновой кислоты применяли метод титрования раствора фитиновой кислоты исследуемых объектов с использованием реактива Вэйда. Количественный метод заключается в измерении ослабления окраски комплекса железа с роданидом из-за конкурентного связывания железа фитиновой кислотой. Результаты исследований показали, что содержание фитина в замоченной чечевице сортов КДЦ «Кермит» и «Орловская краснозерная» по сравнению с нативной снизилось соответственно на 7,7 % и 6,6 %. При уваривании незамоченной и замоченной чечевицы в воде, фитиновая кислота и ее соли физически диффундируют в водную фазу и их содержание в экстракте составило от 17,7 до 19,3 %, остальные 80,7–82,3 % остались в вареной чечевице. После экструдирования и сушки вареной чечевицы содержание фитина в экструдате снизилось на 3,3 % и 3,8 %, а в сушеной чечевице соответственно – на 1,6 % и 2,2 %. При получении чечевичного экстракта содержание фитина в растворе составило 0,32 % и 0,35 %, причем предварительное замачивание чечевицы позволило снизить содержание фитина до 0,30 % и 0,33 %. Самым эффективным способом снижения фитинов является проращивание чечевицы, при котором содержание фитина снизилось на 37 % и 41 %.

Ключевые слова: чечевица, продукты переработки чечевицы, методы определения солей фитиновой кислоты, эффективность инактивации.

Evaluation of the effectiveness of phytate inactivation in lentils and it’s processed products

Viktor E. Plotnikov [1] viktor_plotnikov_1999@mail.ru 0000-0001-6707-8337
Svetlana V. Obraztsova [1] sveta5501pavlenkova@yandex.ru 0000-0001-9539-0168
Daria E. Skosar [1] dartch.skosar@yandex.ru 0009-0006-4260-8948
Valeriia V. Kurganskaia [1] kurganskaya.28.11@icloud.com 0009-0008-0568-1411
Inessa V. Plotnikova [1] plotnikova_2506@mail.ru 0000-0001-5959-6652
Konstantin K. Polyanskii [1, 2] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
2 Voronezh branch FSBEI HE Russian University of Economics named after G. V. Plekhanov, 67A K. Marx St., Voronezh, 394030, Russia

Abstract. The presence of anti-nutritional substances in plant raw materials reduces its nutritional and nutritional value. Phytic acid and its salts are an anti-inflammatory factor and have a negative effect on the bioavailability and assimilation of important nutrients. Effective ways to reduce the content of phytins are the use of technological techniques: peeling, soaking, cooking, germination, extrusion. The aim of the work was to determine the presence and content of phytic acid salts by qualitative and quantitative methods in native lentils and in its processed products (extrudate, dried and sprouted lentils, lentil extract (aquafaba)). For the qualitative determination of phytic acid salts, the method of titration of a phytic acid solution of the studied objects using Wade's reagent was used. The quantitative method consists in measuring the weakening of the color of the iron-rhodanide complex due to the competitive binding of iron by phytic acid. The research results showed that the phytin content in soaked KDC "Kermit" and "Orlovskaya Krasnozernaya" lentils decreased by 7.7 % and 6.6 %, respectively, compared with native ones. When boiled unsoaked and soaked lentils in water, phytic acid and its salts physically diffuse into the aqueous phase and their content in the extract ranged from 17.7 to 19.3 %, the remaining 80.7–82.3 % remained in boiled lentils. After extrusion and drying of boiled lentils, the phytin content in the extrudate decreased by 3.3 % and 3.8 %, and in dried lentils, respectively, by 1.6 % and 2.2 %. When lentil extract was obtained, the phytin content in the solution was 0.32 % and 0.35 %, and pre-soaking the lentils allowed to reduce the phytin content to 0.30 % and 0.33 %. The most effective way to reduce phytins is to germinate lentils, in which the phytin content decreased by 37 % and 41 %.

Keywords: lentils, lentil processing products, methods for the determination of phytic acid salts, inactivation efficiency.

Для цитирования
Плотников В.Е., Образцова С.В., Скосарь Д.Е., Курганская В.В., Плотникова И.В., Полянский К.К. Оценка эффективности инактивации фитатов в чечевице и продуктах ее переработки // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 54–66. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-54-66

For citation
Plotnikov V.E., Obraztsova S.V., Skosar D.E., Kurganskaia V.V., Plotnikova I.V., Polyanskii K.K. Evaluation of the effectiveness of phytate inactivation in lentils and it’s processed products . Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 54–66. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-54-66

© 2026, Плотников В.Е. и др. / Plotnikov V.E. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В условиях роста доли растительных рационов проблема негативного воздействия антиалиментарных факторов на нутритивный статус становится особенно актуальной, прежде всего для развивающихся регионов [1]. Обеспечение безопасности растительного сырья при одновременном снижении в его составе антиалиментарных компонентов, повышении качества и пищевой адекватности здорового рациона, является одной из приоритетных задач, решаемых на государственном и мировом уровне [2].

Злаковые и бобовые культуры являются ценным растительным сырьем при производстве функциональных продуктов питания, однако присутствие в их составе антипитательных веществ, оказывающих негативное влияние на организм человека, снижает их пищевую и питательную ценность [3].

К наиболее распространенным антиалиментарным факторам относятся: ингибиторы протеаз, трипсина и химотрипсина, лектины, алкалоиды, олигосахариды, танины, соли фитиновой кислоты (фитаты) и ряд других [4].

Большинство из вышеназванных компонентов не представляют значительной опасности для здоровья человека, но есть и такие, которые проявляют высокую токсичность при определенных условиях [2].

Фитиновая кислота или мио-инозитгексафосфорная кислота (C_6 H_{18} O_{24} P_6) является основной формой хранения фосфора (от 50 до 85%) и составляет 0,5–6% по массе в зерновых, бобовых и масличных культурах, причем накапливается в растениях в период их созревания [5]. В растениях фитиновая кислота содержится в виде соли фитиновой кислоты – фитатов кальция и магния в форме фитинов, которые выполняют роль антиоксидантов и являются запасом около 2/3 фосфора в их клетках. Работают фитаты как сильно отрицательно заряженные ионы и оказывают негативный эффект на биодоступность и усвоение белков, витаминов и минеральных веществ [2]. Фитиновая кислота может связываться с ионами многовалентных (двух- и трёхвалентных) металлов Zn^{2+}, $Fe^{2+/3+}$, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Cu^{2+}, P^{3+}, $Co^{2+/3+}$ в нерастворимые комплексные соединения (фитаты), что делает их недоступными для усвоения и препятствует нормальному их всасыванию в тонком кишечнике. В «ловушку» фитата могут попасть и макромолекулы (белок, крахмал или соединения, образующие липиды). Кроме того, присутствие фитиновой кислоты тормозит расщепление белков и углеводов, ингибирует окисление жиров, вызывает снижение активности пищеварительных ферментов (пепсина, амилазы, протеазы, липазы, трипсина), необходимых для расщепления белков и крахмала. Декальцинирующий эффект фитатов увеличивается при снижении соотношения кальция и фосфора (оптимальное соотношение кальция и фосфора – **1** ÷ 2**:1**) и витамина D [6–8].

Фитиновая кислота – это сложный эфир циклического шестиатомного полиспирта мио-инозитола (или мио-инозита) и шести остатков ортофосфорной кислоты (рисунок 1).

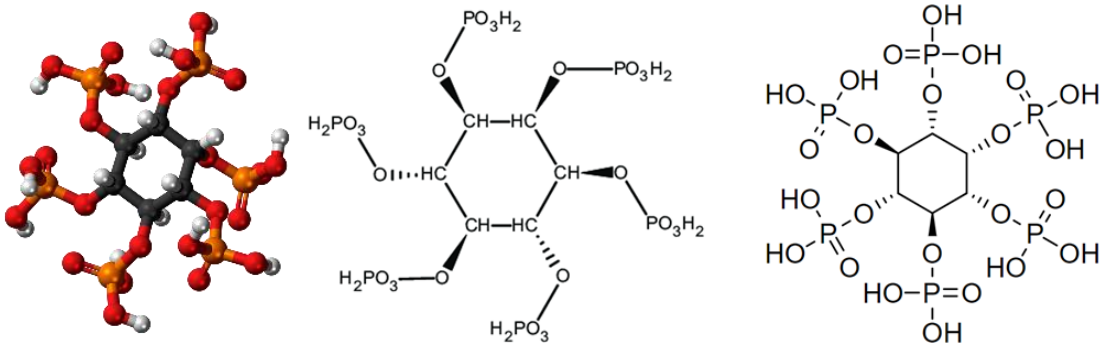


Рисунок 1. Структурная формула фитиновой кислоты [9]

Figure 1. The structural formula of phytic acid [9]

Молекула фитиновой кислоты имеет высокий хелатообразовательный потенциал и в нейтральной среде формирует нерастворимые соли (фитаты) с катионами. Шесть остатков фосфорной кислоты, связанных с инозитолом, могут принимать или отдавать до 12 протонов (ионов водорода) [5]. Установлено, что в среде с pH менее 1,1 фитиновая кислота имеет нейтральный заряд, то есть не отдает положительно заряженные ионы водорода. Приближение среды к pH 2 приведёт к ионизации 3-х фосфатных групп, дальнейшее повышение pH приводит к потере последующих протонов. Таким образом, в среде с нейтральным pH, присущей растениям, фосфатные группы фитиновой кислоты частично диссоциируют, приобретая по одному или два отрицательных заряда, благодаря чему катионы (положительно заряженные ионы металлов, протонированные аминогруппы и т. п.) могут прочно хелатироваться остатками фосфорной кислоты [9], то есть связываться с молекулой фитата (рисунок 2).

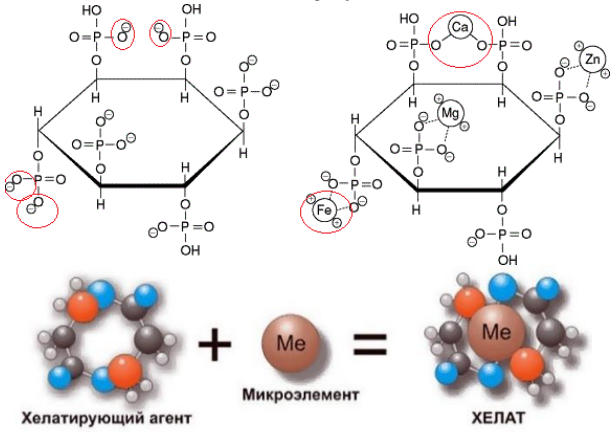


Рисунок 2. Структурная формула фитата и схема образование хелата с ионами многовалентного металла

Figure 2. The structural formula of phytate and the scheme of chelate formation with ions of a multivalent metal

Высвобождение катионов может происходить в результате гидролитического расщепления эфирных связей фитиновой кислоты фитазами животного, растительного или микробного происхождения. Фитаза разрушает эфирные связи фитатного комплекса, высвобождая фосфор и другие питательные вещества, делая их доступными для питания и роста растений [10].

В нашем организме нет ферментов, необходимых для гидролиза инозитол-фосфатных связей и расщепления фитатов, поэтому до 50% минеральных веществ, особенно железа, выводится из организма несбалансированными [11].

Известно, что фитаза вырабатывается микроорганизмами рубца, ее активность повышается при регулярном употреблении фитиновой кислоты и снижается при безфитиновой диете. Поэтому у тех, кто переходит к здоровому питанию с достаточным количеством пищевых волокон, фитиновая кислота действительно не разлагается, но по мере привыкания к такому рациону, активность фитазы будет увеличиваться [12].

Однако известно, что до 60% от общего количества фитатов может гидролизоваться под воздействием ферментов микрофлоры и кислой среды желудка, а остальное – в тонком кишечнике [13].

Снижение биодоступности ряда важных микронутриентов с отсутствием или недостатком у человека фермента фитазы в пищеварительном тракте приводит к их дефициту, что ведет к железо- и йоддефицитному состоянию, особенно это касается людей, у которых обедненный однообразный рацион питания. К группам риска по развитию этих дефицитов относятся дети, подростки, беременные и кормящие женщины, вегетарианцы, веганы, пожилые люди, у которых также часто встречается дефицит кальция. При разнообразном и сбалансированном питании фитиновая кислота не представляет большой опасности для здоровья [12].

Однако современные исследования раскрывают многогранную физиологическую роль фитиновой кислоты, выходящую за рамки простого антинутриента, что требует пересмотра подходов к оценке ее значения в питании [14]. Для человека и моногастричных животных эти соединения обладают двойственным действием. С одной стороны, они рассматриваются как классические антинутриенты, способные существенно снижать биодоступность критически важных минералов и ухудшать переваримость пищевых веществ [15]. С другой – в контексте сбалансированного питания фитиновая кислота демонстрирует ряд полезных свойств, включая антиоксидантную активность, что позволяет классифицировать её как потенциальный нутрицевтик [16]. С одной стороны, фитиновая кислота может хелатировать кальций и приводить к остеопорозу, с другой стороны, это может предотвращать образование камней в почках. Хелатирование железа может привести к дефициту железа, но снижает окислительный стресс в организме, предотвращает катализацию реакций перекисного окисления липидов, оказывая антиоксидантный эффект [5]. В экспериментальных исследованиях подтверждены протективные эффекты фитиновой кислоты в отношении рака толстой кишки, молочной железы, заболеваний сердечно-сосудистой системы и др. [5]. Фитиновая кислота может улучшать липидный и углеводный обмен, что представляет интерес для профилактики диабета 2 типа [17]. Отдельные опыты на людях показали, что при длительном потреблении продуктов с высоким содержанием фитиновой кислоты, прочность костной структуры костей была выше, чем у контрольной группы [15]. В организмах исследуемых женщин значительно снижается риск остеопороза [16]. Чем больше человек употребляет в пищу продуктов, богатых фитатами, тем лучше его кишечник (микробиота) приспосабливается к её расщеплению, и соответственно усвоению кальция, фосфора и других микроэлементов. То есть у последовательных вегетарианцев проблемы вообще нет, их ЖКТ на 100% справляется с фитиновой кислотой [17]. У людей, употребляющих в пищу достаточно продуктов, богатых фитатами, более высокая минеральная плотность костей, они реже страдают от остеопороза и перелома шейки бедра [18].

Имеются данные, что фитиновая кислота, как уникальный природный растительный антиоксидант, способствует удалению свободных радикалов из клеток организма. Она участвует в развитии, репарации ДНК, редактировании РНК, транспорте мРНК, реакции на стресс, гомеостазе и восприятии фосфатов; обладает противораковыми свойствами и играет профилактическую роль при таких заболеваниях, как болезни сердца и резистентность к инсулину. Более того, фитиновая кислота тормозит развитие клеток, съедающих костную ткань изнутри при остеопорозе [19].

Фитиновая кислота участвует в снижении перекисного окисления липидов и используется в качестве пищевого консерванта из-за своих антиоксидантных свойств [20]. Правильное добавление фитиновой кислоты в качестве антиоксиданта к растительным маслам или продуктам с высоким содержанием масла может продлить срок хранения в 3–5 раз. При добавлении ее в консервы позволяет добиться стабильности эффекта защиты цвета [21].

Таким образом, негативное влияние фитатов наиболее актуально для групп риска, в то время как в сбалансированном рационе их польза может перевешивать потенциальный вред.

На долю фитинового фосфора приходится большая часть общего фосфора, содержащегося в семенах различных культур. В целом, фитиновый фосфор составляет 60–80% от общего количества фосфора семян. Концентрация фитинового фосфора в различных органах растений неодинакова и колеблется от 0,5 до 6%, что зависит от типа семян, их содержания в конкретных частях, условий окружающей среды, климата и качества почвы. Большая часть фитина сосредоточена в семенах. Небольшие количества фитина присутствуют в вегетативных органах, например, корнях и корнеплодах – менее 0,1%, следовые – в листьях. [22]. В семенах большинства злаков фитин сосредоточен в алейроновом слое и зародыше, а в семенах двудольных растений, включая бобовые и масличные, он равномерно распределен по всему объёму семян [2].

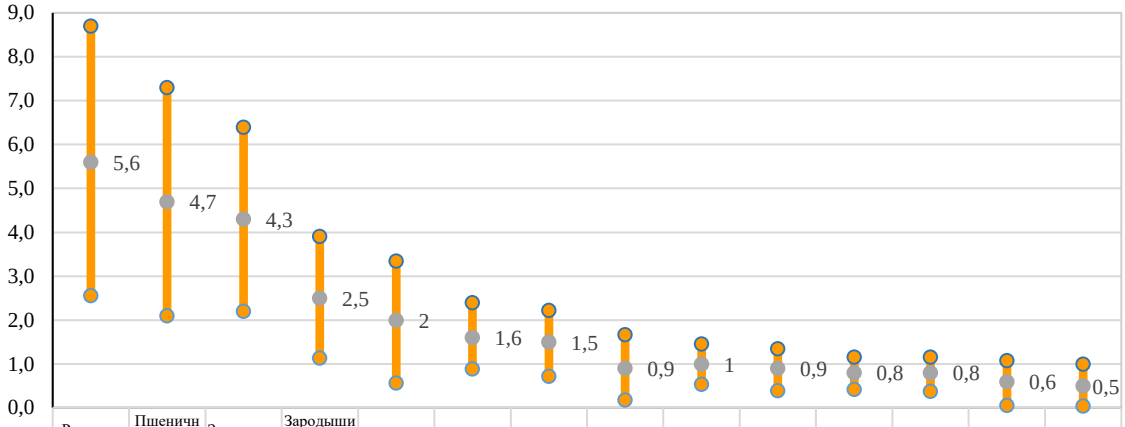
Зерновые и бобовые культуры являются источниками питательных микроэлементов, однако биодоступность многих других минеральных веществ снижается в присутствии фитиновой кислоты (рисунок 3). Учёные извлекли фитиновую кислоту из зерновых, чтобы посмотреть, как усваивается железо при её отсутствии. Всасываемость железа из риса без фитатов увеличилась с 1,73 до 5,34%, из пшеницы – с 0,99 до 11,54%, из овсяной каши – с 0,33 до 2,79%. Следовательно, основной вред сводится к тому, что фитиновая кислота снижает питательную ценность продуктов и обедняет питание, что особенно касается вегетарианцев [23].

Анализируя данные, представленные на рисунке 3, можно сказать, что бобовые культуры содержат в меньшей степени фитатов, чем масличные и злаковые культуры. Среди бобовых наибольшее усредненное количество фитатов в сои и фасоли – 1,61 и 1,5 г/100 г сухого вещества, наименьшее в чечевице, горохе и люпине – от 0,89 до 0,62 г/100 г сухого вещества. Среди масличных культур миндаль и грецкий орех в среднем содержат наибольшее количество фитатов – 4,9 и 3,4 г/100 г сухого вещества, наименьшее у чиа и фундука – 0,8 и 0,6 г/100 г сухого вещества. В отрубях и зародышах риса, пшеницы, кукурузы в среднем содержится наибольшее количество фитатов – от 5,6 до 2,5 г/100 г сухого вещества, минимальное количество у овса, ячменя, риса и гречихи – от 0,8 до 0,5 г/100 г сухого вещества.

Эффективными способами снижения содержания фитиновой кислоты и ее солей является либо активация или применение фермента фитазы, который гидролизует фитиновую кислоту до низших инозитолфосфатов и неорганического фосфата, теряющих хелатирующую способность [8, 11], либо технологических приёмов (шелушение, замачивание в кислой среде, варка, проращивание или ферментация в процессе молочнокислого брожения при заквашивании и мариновании, экструзия), способствующих расщеплению фитатов с выделением фосфора, что повышает его содержание в продукте [24].

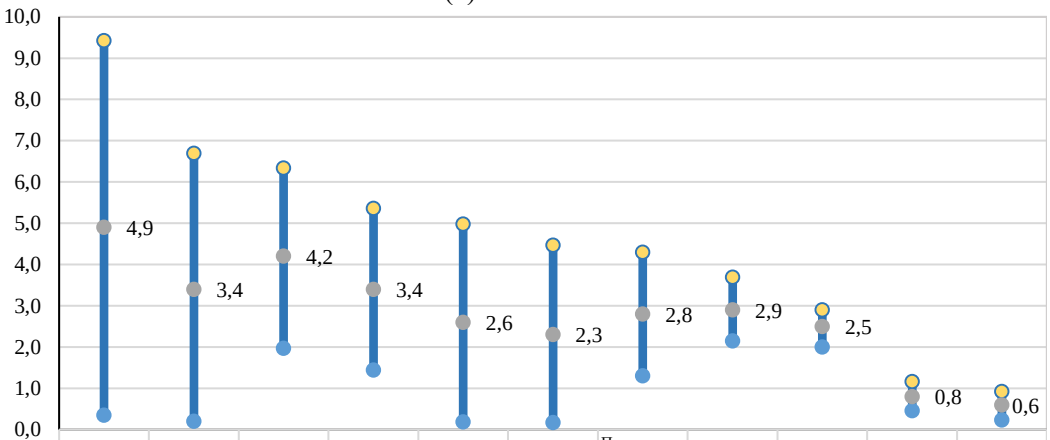
Процесс замачивания в воде приводит к вымыванию водорастворимых компонентов и активации эндогенных ферментов, однако его эффективность неоднозначна: кратковременное замачивание (4–6 ч) может давать незначительный эффект, в то время как длительное замачивание (12–24 ч) с периодической сменой воды, особенно в тёплой или подкисленной среде (лимонный сок, сыворотка), способно снизить уровень фитиновой кислоты на 15–50% за счёт выщелачивания и частичной ферментативной деградации [10].

Варка предварительно замоченных семян приводит к значительному снижению фитиновой кислоты на 10–80% в зависимости от культуры за счёт перехода фитатов в отвар, который затем утилизируется. Сочетание замачивания и варки может снизить содержание фитиновой кислоты на 60–77% [25].



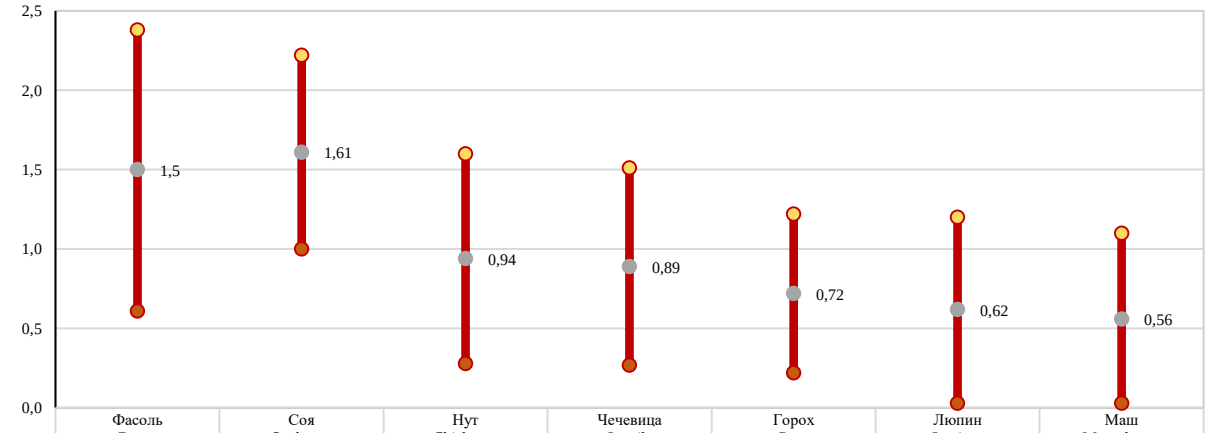
	Рисовые отруби Rice bran	Пшеничные отруби Wheat bran	Зародыши кукурузы Corn germ	Зародыши пшеницы Wheat germ	Сорго Sorghum	Овсянка Oatmeal	Кукуруза Corn	Просо Millet	Рожь Rye	Пшеница Wheat	Овес Oats	Ячмень Barley	Рис Rice	Гречиха Buckwheat
Min	2,56	2,1	2,2	1,14	0,57	0,89	0,72	0,18	0,54	0,39	0,42	0,38	0,06	0,04
Max	8,7	7,3	6,4	3,91	3,35	2,4	2,22	1,67	1,46	1,35	1,16	1,16	1,08	1
Усредненное значение	5,6	4,7	4,3	2,5	2	1,6	1,5	0,9	1	0,9	0,8	0,8	0,6	0,5

(a)



	Миндаль Almonds	Грецкий орех Walnuts	Бразильский орех Brazil nuts	Кунжут Sesame	Кешью Cashews	Арахис Peanuts	Подсолнечный шрот Sunflower meal	Лен Flax	Рапс Rapeseed	Чиа Chia	Фундук Hazelnuts
Min	0,35	0,2	1,97	1,44	0,19	0,17	1,3	2,15	2	0,46	0,23
Max	9,42	6,69	6,34	5,36	4,98	4,47	4,3	3,69	2,9	1,16	0,92
Ave	4,9	3,4	4,2	3,4	2,6	2,3	2,8	2,9	2,5	0,8	0,6

(b)



	Фасоль Beans	Соя Soybeans	Нут Chickpeas	Чечевица Lentils	Горох Peas	Люпин Lupines	Маш Mung beans
Min	0,61	1	0,28	0,27	0,22	0,03	0,03
Max	2,38	2,22	1,6	1,51	1,22	1,2	1,1
Ave	1,5	1,61	0,94	0,89	0,72	0,62	0,56

(c)

Рисунок 3. Содержание фитиновой кислоты в злаковых (a), масличных (b) и бобовых (c) культурах

Figure 3. Phytic acid content in cereals (a), oilseeds (b) and legumes (c)

Проращивание (солодование) один из наиболее эффективных методов, при котором активируется собственная фитаза семени, которая за 48 ч увеличивает активность в 8 раз и гидролизует фитиновую кислоту, расщепляя её до низших инозитолфосфатов и свободного фосфора. Эти производные обладают значительно меньшей способностью связывать минералы. В зависимости от вида и сорта культуры, содержание фитатов в процессе проращивания уменьшается на 60–87%. Проращивание чечевицы в течение 72 ч приводит к снижению фитиновой кислоты на 27–37% [26]. Большинство исследователей отмечают, что снижение содержания фитиновой кислоты идет на пятый день проращивания [27].

Предложен процесс индуцированного автолиза для снижения содержания фитиновой кислоты и ее солей в бобовых культурах [28, 29], который частично воспроизводит ферментативные процессы, происходящие при прорастании семян, что приводит к увеличению пищевой ценности, улучшению функциональных свойств и инактивации антиалиментарных факторов. Процесс обработки включает следующие этапы: введение в суспензию муки бобовых кислоты для создания кислой среды, внесение в нее ферментных экзопрепаратов – кислых протеаз, активизирующих эндопротеазы сырья, последующая нейтрализация смеси и выдерживание ее в нейтральных условиях для осуществления процесса автолиза, имитирующего процесс прорастания [30].

Уваривание не оказывает существенного влияния на разложение фитатов, так как они являются термостойкими. Однако высокотемпературная кратковременная обработка под давлением при экструзии может способствовать денатурации белково-фитатных комплексов и повышению доступности субстрата для ферментов, хотя прямое разрушение фитиновой кислоты ограничено [31].

Сводные данные об эффективности инактивации фитатов различными способами представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные методы обработки инактивации фитатов в растительном сырье

Table 1.

The main methods of processing phytate inactivation in plant raw materials

Метод обработки Method	Условия обработки Conditions	Биологические процессы при обработке Processes
Длительное замачивание в кислой среде с периодической промывкой воды Long-term soaking in an acidic environment with periodic water rinsing	Замачивание Soaking τ = 12–24 ч t = 20–25 °C	Активируются эндогенные ферменты, эффективность повышается при нагреве воды и ее подкислении Endogenous enzymes are activated, and their effectiveness increases with heating and acidification of the water.
Варка предварительно замоченных семян Cooking of pre-soaked seeds	Замачивание Soaking τ = 12–24 ч t = 20–25 °C с последующим кипячением в течение	Переход фитатов в экстракт (отвар) Phytates are converted into the extract (decoction).
Проращивание (солодование) Germination (malting)	τ = 72–96 ч при t = 12–14 °C	Активируется эндогенный фермент фитаза, которая гидролизует фитиновую кислоту и расщепляет её до низших инозитолфосфатов и свободного фосфора The endogenous enzyme phytase is activated, hydrolyzing phytic acid and breaking it down into lower inositol phosphates and free phosphorus.
Индуцированный автолиз Induced autolysis	Внесение ферментных экзопрепаратов – кислых протеаз. Нейтрализация и выдерживание в нейтральных условиях	Частично воспроизводит ферментативные процессы, происходящие при прорастании Partially reproduces the enzymatic processes that occur during germination.
Экструзия Extrusion	τ = 10–15 с при t = 140–160 °C, P = 30 атм	Денатурация белково-фитатных комплексов и повышение доступности субстрата для ферментов Denaturation of protein-phytate complexes and increased substrate availability for enzymes.

Сочетание нескольких способов может существенно уменьшить количество антинутриентов, иногда даже полностью. Так, замачивание, проращивание и молочнокислая ферментация уменьшают фитаты практически полностью [24].

На сегодняшний день остается актуальным исследование влияния различных способов обработки сырья на содержание фитатов, в частности в бобовых и продуктах их переработки.

Целью работы являлось определение наличия и содержания солей фитиновой кислоты качественным и количественным методом в нативной чечевице различных сортов и в продуктах ее переработки (экструдат, сушеная и пророщенная чечевица, экстракт чечевичный (аквафаба)).

В качестве объектов взяты образцы нативной чечевицы двух сортов КДЦ «Кермит» и «Орловская краснозерная». Перед использованием образцы чечевицы очищали от посторонних

примесей и промывали в холодной воде, замачивали. Проращивание чечевицы проводили 5 сут, после чего пророщенные семена поэтапно сушили конвективным способом – по 2 ч сначала при t = 56 °С, а затем при t = 65 °С, и 3 ч при t = 75 °С, общая продолжительность сушки – 7 ч. Получение экструдата из чечевицы осуществляли в экструдере при температуре в предматричной зоне – 120 ± 1 °С, на выходе продукта – 158 ± 1 °С, давлении – 30 атм (3 МПа), продолжительность экструзии – 10–15 с. Чечевичный экстракт (аквафаба) получали путем уваривания подготовленной чечевицы в воде при гидромодуле 1:4 в течение 60 ± 5 мин, после чего разделяли вареную чечевицу от экстракта. Вареную чечевицу высушивали конвективным способом при температуре 50–60 °С до получения сушеной чечевицы.

Для качественного определения солей фитиновой кислоты применяли метод титрования раствора фитиновой кислоты исследуемых объектов с использованием реактива Вэйда. Сущность метода заключается в способности фитиновой кислоты связывать ионы металлов в составе окрашенных комплексов, вследствие чего их окраска ослабевает. При добавлении железа происходит реакция осветления опытных образцов растворов, при этом наблюдается выпадение светло-желтого осадка в виде комплекса – йодид железа (II) (FeI_2) в разном количестве.

Для приготовления реактива Вэйда использовали два раствора: 1 – 0,3240 г сульфосалициловой кислоты растворяли в 100 мл дистиллированной воды; 2 – 0,0324 г $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ растворяли в 100 мл дистиллированной воды. Реактив Вэйда всегда готовится перед определением анализа путем смешивания двух растворов в равных объемах. В результате 1 мл полученного реагента содержит 0,2 μмоль железа [32].

Для получения экстрактов солей фитиновой кислоты исследуемые объекты предварительно измельчали в фарфоровой ступке до порошкообразного состояния. В колбу вместимостью 500 мл помещали около 10 г измельчённой навески исследуемого объекта и добавляли 200 мл раствора кислоты хлористоводородной разбавленной концентрацией 2,4%. Смесь перемешивали стеклянной палочкой до гомогенного состояния и оставляли при комнатной температуре на 24 ч. Далее экстракт фильтровали через бумажный фильтр, полученный фильтрат использовали для исследований.

Все полученные экстракты подвергали тестированию на содержание солей фитиновой кислоты. Реактив Вэйда имеет фиолетово-розовое окрашивание раствора, которое исчезает при добавлении исследуемых экстрактов. Параллельно для сравнения проводили холостой опыт – добавляли такое же количество дистиллированной воды.

Результаты проведенных экспериментальных исследований представлены на рисунке 4 и в таблице 2. Все пробы дали положительный результат, что говорит о наличии фитатов в чечевице и продуктах ее переработки. Исходя из данных таблице 2, видно, что наименьшее количество солей фитиновой кислоты содержится в образце № 11 (экстракт чечевичный), так как на титрование и получение окрашивающегося комплекса пошло наибольшее количество объема раствора железа – 2,9 мл.

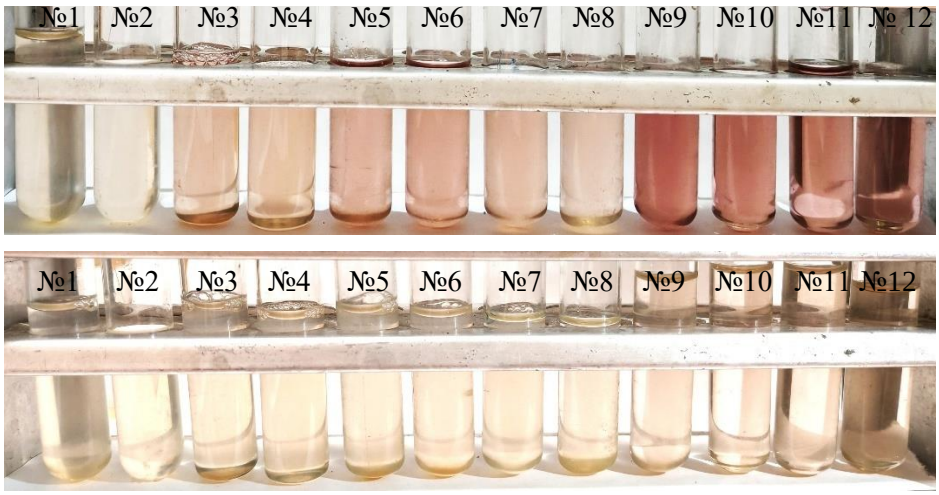


Рисунок 4. Фото результатов качественной реакции на наличие солей фитиновой кислоты с реактивом Вэйда: (a) – экстракты солей фитиновой кислоты исследуемых объектов до титрования; (b) – экстракты солей фитиновой кислоты исследуемых объектов после титрования

Figure 4. Photos of the results of a qualitative reaction for the presence of phytic acid salts with Wade's reagent: (a) - extracts of phytic acid salts of the test objects before titration; (b) - extracts of phytic acid salts of the test objects after titration

Таблица 2.

Результаты титрования экстрактов солей фитиновой кислоты исследуемых объектов реактивом Вэйда

Table 2.

Results of titration of phytic acid salt extracts of the studied objects with Wade's reagent

Объект Object	Наименование Name	Объем реактива Вэйда, пошедшего на титрование, мл Volume of Wade reagent used for titration, ml
№ 1	Нативная чечевица сорта «Орловская краснозерная» Native lentils of the Orlovskaya Krasnozernaya variety	1,0
№ 2	Нативная чечевица сорта КДЦ «Кермит» Native lentils of the KDC Kermit variety	0,95
№ 3	Экструдат из чечевицы сорта «Орловская краснозерная» Extrudate from lentils of the Orlovskaya Krasnozernaya variety	1,4
№ 4	Экструдат из чечевицы сорта КДЦ «Кермит» Extrudate from lentils of the KDC Kermit variety	1,35
№ 5	Пророщенная чечевица сорта КДЦ «Кермит» Sprouted lentils of the KDC Kermit variety	1,45
№ 6	Пророщенная чечевица сорта «Орловская краснозерная» Sprouted lentils of the Orlovskaya Krasnozernaya variety	1,55
№ 7	Сушеная чечевица сорта КДЦ «Кермит» Dried lentils of the KDC Kermit variety	1,25
№ 8	Сушеная чечевица сорта «Орловская краснозерная» Dried lentils of the Orlovskaya Krasnozernaya variety	1,30
№ 9	Чечевичный экстракт (аквафаба) из чечевицы сорта КДЦ «Кермит» Lentil extract (aquafaba) from lentils of the KDC Kermit variety	2,4
№ 10	Чечевичный экстракт (аквафаба) из чечевицы сорта «Орловская краснозерная» Lentil extract (aquafaba) from lentils of the Orlovskaya Krasnozernaya variety	2,1
№ 11	Чечевичный экстракт (аквафаба) из замоченной чечевицы сорта КДЦ «Кермит» Lentil extract (aquafaba) from soaked lentils of the KDC Kermit variety	2,9
№ 12	Чечевичный экстракт (аквафаба) из замоченной чечевицы сорта «Орловская краснозерная» | Lentil extract (aquafaba) from soaked lentils of the Orlovskaya Krasnozernaya variety	2,75

Оценку количественного содержания фитатов в исследуемых объектах проводили методом фотоэлектроколориметрии в центре коллективного пользования ФГБОУ ВО «ВГУИТ» на спектрофотометре марки *UV mini-1240* (Shimadzu, Япония).

Количественный метод определения солей фитиновой кислоты заключается в измерении ослабления окраски комплекса железа с роданидом из-за конкурентного связывания железа фитиновой кислотой [33].

Методика определения содержания фитина заключается в следующем. Вначале проводили экстракцию фитина из сырья соляной кислотой путем растирания 500 мг пробы измельченного высушенного объекта с 500 мг песка в 0,5 М HCl (раствор № 1), далее проводили дополнительную очистку солянокислой вытяжки добавлением к ней смеси из 1000 мкл раствора изоамилового спирта с хлороформом (1:24 об. долей) в соотношении объемов вытяжка и смесь – 4:1 (раствор № 2), смесь перемешивали и центрифугировали в течение 20 мин при 3000 об/мин, отбирали 2 $см^3$ надосадочной жидкости в эппендорфы и центрифугировали еще 5 мин при 13000 об/мин. К 1 $см^3$ (1000 мг) абсолютно прозрачной, очищенной от примесей пробы надосадочной жидкости, содержащей фитин, добавляли 1,5 $см^3$ индикативного 0,03% кислого раствора роданида аммония NH_4 SCN в 6% растворе HCl (раствор № 3), затем прибавляли 50 мкл кислого конкурентного раствора хлорида железа (III) – $FeCl_3$ (раствор № 4) и 0,2% HCl в дистиллированной воде в объемном соотношении 1:1,5:1. Раствор хлорид железа готовили из соли $FeCl_3$, высушенной в эксикаторе с концентрированной серной кислотой. Содержание раствора представляет собой 0,86% $FeCl_3$ в 0,2% по HCl. В качестве контроля использовали смесь растворов № 3 (0,03% роданида аммония NH_4 SCN в 6% HCl) и № 4 (раствор 0,86% $FeCl_3$ и 0,2% HCl в дистиллированной воде) в тех же пропорциях, что и для образцов, заменяя объем пробы равным объёмом дистиллированной воды. После добавления раствора № 4 образцы колориметрировали в предварительно калиброванных кварцевых кюветах. Измерение оптической плотности проводили при длине волны 337 нм.

По результатам определения оптической плотности был построен градуировочный график по концентрации раствора фитина (рисунок 5).

По данным градуировочного графика построена линия тренда, с помощью которой сформировано линейное уравнение для определения концентрации фитина исследуемых растворов

$$X = \frac{0,9278 - Y}{0,1583}.$$

Концентрацию раствора фитина C_f, мг/мг, определяли по составленному градуировочному графику, используя в качестве стандарта водный раствор натриевой соли фитиновой кислоты.

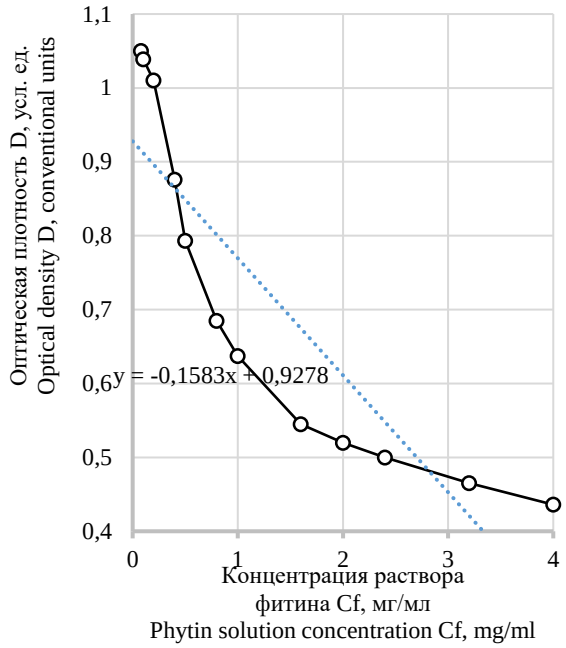


Рисунок 5. Градуировочный график зависимости изменения оптической плотности от концентрации фитина исследуемых растворов (R_2=0,7807)

Figure 5. Calibration graph of the dependence of the change in optical density on the concentration of phytin in the studied solutions (R2=0.7807)

Расчет абсолютной массы фитина в образце *f*, мг, с учетом разбавления в ходе анализа проводили по формуле

$$f = \frac{C_f \cdot (M_п + 2000) \cdot 1{,}275}{M_{нж}},$$

где C_f – измеренная концентрация фитина, мг/мл; $M_п$ – масса навески пробы, мг; $M_{нж}$ – масса навески пробы надосадочной жидкости, мг.

Расчет содержания фитина в образце *F*, % масс., с учетом разбавления в ходе анализа проводили по следующей формуле

$$F = \frac{100 \times f}{M_{нж}}.$$

Полученные значения основных показателей количественного определения фитина в исследуемых объектах сведены в таблице 3.

Результаты расчета содержания фитина в исследуемых объектах представлены в таблице 4, расхождение между повторными опытами не превышало 0,5%.

Таблица 3.

Значения основных показателей

Table 3.

The values of the main indicators

Наименование Name	Оптическая плотность *D*, усл. ед. Optical density *D*, conventional units		Концентрация раствора фитина Cf, мг/мл Phytin solution concentration Cf, mg/ml		Содержание абсолютной массы фитина в объекте *f*, мг Absolute mass content of phytin in object f, mg	
	сорт КДЦ «Кермит» KDC "Kermit" variety	сорт «Орловская краснозерная» Orlovskaya Krasnozernaya variety	сорт КДЦ «Кермит» KDC "Kermit" variety	сорт «Орловская краснозерная» Orlovskaya Krasnozernaya variety	сорт КДЦ «Кермит» KDC "Kermit" variety	сорт «Орловская краснозерная» Orlovskaya Krasnozernaya variety
Нативная чечевица незамоченная Unsoaked native lentils	5,68	5,74	0,03	0,02	18,1	18,3
Нативная чечевица замоченная Soaked native lentils	5,23	5,35	0,10	0,08	16,7	17,1
Экструдат из чечевицы Lentil extrudate	5,48	5,51	0,06	0,06	17,5	17,6
Сушеная чечевица Dried lentils	5,55	5,64	0,05	0,04	17,7	18,0
Пророщенная чечевица Sprouted lentils	3,59	3,39	0,36	0,39	11,4	10,8
Чечевичный экстракт (аквафаба) из незамоченной чечевицы Lentil extract (aquafaba) from unsoaked lentils	0,96	1,10	0,77	0,75	3,2	3,5
Чечевичный экстракт (аквафаба) из замоченной чечевицы Lentil extract (aquafaba) from soaked lentils	0,90	1,04	0,79	0,76	3,0	3,3

Таблица 4.

Массовая доля влаги и содержание фитина в исследуемых объектах

Table 4.

Mass fraction of moisture and phytin content in the studied objects

Объект	Массовая доля влаги в объекте *W*, % Moisture content in object W, %		Содержание фитина в объекте *F*, % Phytin content in object F, %	
	сорт КДЦ «Кермит» KDC "Kermit" variety	сорт «Орловская краснозерная» Orlovskaya Krasnozernaya variety	сорт КДЦ «Кермит» KDC "Kermit" variety	сорт «Орловская краснозерная» Orlovskaya Krasnozernaya variety
Нативная чечевица незамоченная Unsoaked native lentils	12,6	10,8	1,81	1,83
Нативная чечевица замоченная Soaked native lentils	23,1	20,3	1,67	1,71
Экструдат из чечевицы Lentil extrudate	7,5	7,0	1,75	1,76
Сушеная чечевица Dried lentils	8,4	8,0	1,77	1,80
Пророщенная чечевица Sprouted lentils	8,8	8,6	1,14	1,08
Чечевичный экстракт (аквафаба) из незамоченной чечевицы Lentil extract (aquafaba) from unsoaked lentils	91,4	91,8	0,32	0,35
Чечевичный экстракт (аквафаба) из замоченной чечевицы Lentil extract (aquafaba) from soaked lentils	90,5	90,2	0,30	0,33

Проведенный анализ позволяет сделать следующий вывод, что содержание солей фитиновой кислоты в чечевице сортов КДЦ «Кермит» и «Орловская краснозерная», и продуктах их переработки, в большей степени зависит от способа обработки, нежели от сорта чечевицы. Содержание фитина в замоченной чечевице по сравнению с нативной снизилось соответственно на 7,7 и 6,6%. При уваривании незамоченной и замоченной чечевицы в воде, фитиновая кислота и ее соли физически диффундируют в водную фазу и их содержание в чечевичном экстракте составило от 17,7 до 19,3%, остальные 80,7–82,3% остались в вареной чечевице. После экструдирования и сушки вареной чечевицы содержание фитина в экструдате снизилось на 3,3 и 3,8%, а в сушеной чечевице соответственно – на 1,6 и 2,2%. При получении чечевичного экстракта содержание фитина в растворе составило 0,32 и 0,35%, причем предварительное замачивание чечевицы позволило снизить содержание фитина до 0,30 и 0,33%, это объясняется размягчением тканей семенной оболочки чечевицы при замачивании с последующим поглощением клеточной тканью экстрагента в значительных количествах, что приводит к набуханию, ослаблению межмолекулярных связей полимеров и большему разрушению фитиновой кислоты при варке. Самым эффективным способом снижения фитинов является проращивание чечевицы, при котором в процессе активации фермента фитазы, расщепляющей фитиновую кислоту до свободного фосфора, содержание фитина снизилось на 37 и 41%. Таким образом, как и ранее было доказано многими учеными, соли фитиновой кислоты являются термоустойчивыми и практически не разлагаются при воздействии высоких температур.

Литература

1 Стародубова А.В. Можно ли считать здоровое питание инструментом здоровьесбережения? // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 2. С. 162–170. doi: 10.31857/S0869587322020098

2 Елисеева Л.Г., Махотина И.А., Калачев С.Л. Повышение безопасности пищевых продуктов растительного происхождения путем уменьшения содержания фитатов // Вопросы безопасности. 2019. № 1. С. 9–17. doi: 10.25136/2409-7543.2019.1.28874

3 Вебер А.Л., Леонова С.А. Изменения биологической и пищевой ценности зерна гороха и фасоли в результате его биоактивации // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2024. Т. 27. № 3. С. 282–293.

4 Плотников В.Е., Магомедов М.Г., Суханов П.Т. и др. Антипитательные факторы зернобобовых культур: качественный и количественный анализ танинов в чечевице и продуктах ее переработки // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 141–152. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-141-152

5 Ших Е.В., Махова А.А., Дорогун О.Б., Елизарова Е.В. Роль фитатов в питании человека // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 4. С. 20–28. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-4-20-28

6 Kumar A., Singh B., Kaur K. et al. Phytic acid: A reservoir of phosphorus in seeds plays a dynamic role in plant and animal metabolism // Phytochemistry Reviews. 2023. V. 22. № 5. P. 1281–1304. doi: 10.1007/s11101-023-09858-1

7 Layrisse M., García-Casal M.N., Solano L. et al. Iron bioavailability in humans from breakfasts enriched with iron bis-glycine chelate, phytates and polyphenols // The Journal of Nutrition. 2000. V. 130. № 9. P. 2195–2199. doi: 10.1093/jn/130.9.2195

8 Hidvegi M., Lasztity R. Phytic acid content of cereals and legumes and interaction with proteins // Periodica Polytechnica: Chemical Engineering. 2002. V. 46. № 1–2. P. 59–64.

9 Зиновьев С.В., Крюков В.С., Мутиева Х.М., Глебова И.В. и др. Антипитательное действие фитатов – экстрафосфорный эффект фитазы (обзор) // Генетика и разведение животных. 2021. № 4. С. 74–84. doi: 10.31043/2410-2733-2021-4-74-84

10 Qi N., Zhan X., Milmine J., Chang K.H., Li J. A novel thermophilic strain of Bacillus subtilis with antimicrobial activity and its potential application in solid-state fermentation of soybean meal // Microbiology Spectrum. 2024. V. 12. № 4. P. e02784-23. doi: 10.1128/spectrum.02784-23

11 Pires S.M.G., Reis R.S., Cardoso S.M. et al. Phytates as a natural source for health promotion: A critical evaluation of clinical trials // Frontiers in Chemistry. 2023. V. 11. P. 1174109. doi: 10.3389/fchem.2023.1174109

12 Уразова А.А., Ярмоц Г.А. Ферментные препараты в животноводстве // Успехи молодежной науки в агропромышленном комплексе: сб. тр. конф. 2022. С. 229–238.

13 Samtiya M., Aluko R.E., Dhewa T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview // Food Production, Processing and Nutrition. 2020. V. 2. P. 6. doi: 10.1186/s43014-020-0020-5

14 Иванова А.А. Анализ методологических подходов к оценке продовольственной безопасности // Продовольственная политика и безопасность. 2024. Т. 11. № 2. С. 229–244.

15 Mahajan M. Clinical Survey: Protein Consumption in Diet of Adult Indians: A General Consumer Survey // Indian Medical Gazette. 2015. V. 149. № 3. P. 149–150.

16 Semba R.D. The rise and fall of protein malnutrition in global health // Annals of Nutrition and Metabolism. 2016. V. 69. № 2. P. 79–88. doi: 10.1159/000449175

17 Avnee, Sood S., Chaudhary D.R., Jhorar P., Rana R.S. Biofortification: an approach to eradicate micronutrient deficiency // Frontiers in Nutrition. 2023. V. 10. P. 1233070. doi: 10.3389/fnut.2023.1233070

18 Стрижко М.Н. Антинутриенты в растительных напитках на зерновом сырье: обзор предметного поля // Food metaengineering. 2023. Т. 1. № 1. С. 63–89. doi: 10.37442/fme.2023.1.3

19 López-González A.A., Grases F., Roca P. et al. Phytate (myo-inositol hexaphosphate) and risk factors for osteoporosis // Journal of Medicinal Food. 2008. V. 11. № 4. P. 747–752. doi: 10.1089/jmf.2008.0087

20 Arriero M.M., Ramis J.M., Perelló J., Monjo M. Inositol hexakisphosphate inhibits osteoclastogenesis on RAW 264.7 cells and human primary osteoclasts // PLoS ONE. 2012. V. 7. № 8. P. e43187. doi: 10.1371/journal.pone.0043187

21 Sanchis P., López-González Á.A., Costa-Bauzá A. et al. Understanding the protective effect of phytate in bone decalcification related-diseases // Nutrients. 2021. V. 13. № 8. P. 2859. doi: 10.3390/nu13082859

22 De Vos W.M., Nguyen Trung M., Davids M. et al. Phytate metabolism is mediated by microbial cross-feeding in the gut microbiota // Nature Microbiology. 2024. V. 9. № 7. P. 1812–1827. doi: 10.1038/s41564-024-01678-9

23 Горлов И.Ф., Семенова И.А., Мосолов А.А., Сложенкин А.Б. и др. Новый метод снижения содержания антипитательных веществ в бобовых культурах // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 3. С. 71–73.

24 Бурак Л.Ч. Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 3. С. 59–73. doi: 10.21603/2074-9414-2021-3-59-73

25 Vashishth A., Ram S., Beniwal V. Cereal phytases and their importance in improvement of micronutrients bioavailability // 3 Biotech. 2017. V. 7. № 1. P. 42. doi: 10.1007/s13205-017-0698-y

26 Кощаева О.В., Хмара И.В., Федоренко К.П., Шкредов В.В. Влияние проращивания на химический состав и содержание антипитательных веществ в семенах сои // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 97 (03). С. 1–25.

27 Sharma B., Gujral H.S. Modifying the dough mixing behavior, protein & starch digestibility and antinutritional profile of minor millets by sprouting // International Journal of Biological Macromolecules. 2020. V. 153. P. 962–970. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.10.225

28 Chukwuejim S., Utioh A., Choi T.D., Aluko R.E. Lupin Seed Proteins: A Comprehensive Review of Composition, Extraction Technologies, Food Functionality, and Health Benefits // Food Reviews International. 2024. V. 40. № 2. P. 691–714. doi: 10.1080/87559129.2023.2191701

29 Елисеева Л.Г., Токарев П.И., Симина Д.В., Молодкина П.Г. Управление качеством и пищевой ценностью пищевых продуктов на основе нетрадиционного сырья с целью их экспортоориентированного производства // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сб. тр. конф. СПб.: Политех-Пресс, 2023. С. 647–655.

30 Pasarin D., Lavric V., Enascuta C.E. et al. Optimal Enzymatic Hydrolysis of Sweet Lupine Protein towards Food Ingredients // Fermentation. 2023. V. 9. № 3. P. 203. doi: 10.3390/fermentation9030203

31 Sinkovič L., Pipan B., Šibul F. et al. Nutrients, Phytic Acid and Bioactive Compounds in Marketable Pulses // Plants. 2023. V. 12. № 1. P. 170. doi: 10.3390/plants12010170

32 Землянухина О.А., Вепринцев В.Н., Калаев В.Н., Аль-Хачами Ф.Р.Х. и др. Модификация метода Вэйда для количественного определения содержания фитина в эндосперме ореха // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. № 3. С. 163–169.

33 Пат. № 2680833 Российская Федерация, МПК G01N 33/00. Способ определения солей фитиновой кислоты в семенах растений / Вепринцев В.Н., Землянухина О.А., Калаев В.Н., Жужжалова Т.П. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ВГУ". № 2018102663; заявл. 23.01.2018; опубл. 28.02.2019. Бюл. № 7.

References

1 Starodubova A.V. Can Healthy Nutrition Be Considered a Tool for Health Preservation? Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2022. vol. 92. no. 2. pp. 162–170. doi: 10.31857/S0869587322020098 (in Russian).

2 Eliseeva L.G., Makhotina I.A., Kalachev S.L. Increasing the Safety of Plant-Based Food Products by Reducing the Content of Phytates. Security Issues. 2019. no. 1. pp. 9–17. doi: 10.25136/2409-7543.2019.1.28874 (in Russian).

3 Veber A.L., Leonova S.A. Changes in the Biological and Nutritional Value of Pea and Bean Grains as a Result of Their Bioactivation. Bulletin of Murmansk State Technical University. 2024. vol. 27. no. 3. pp. 282–293. (in Russian).

4 Plotnikov V.E., Magomedov M.G., Sukhanov P.T. et al. Anti-Nutritional Factors of Legumes: Qualitative and Quantitative Analysis of Tannins in Lentils and Products of Their Processing. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 141–152. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-141-152 (in Russian).

5 Shikh E.V., Makhova A.A., Dorogun O.B., Elizarova E.V. The Role of Phytates in Human Nutrition. Problems of Nutrition. 2023. vol. 92. no. 4. pp. 20–28. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-4-20-28 (in Russian).

6 Kumar A., Singh B., Kaur K. et al. Phytic acid: A reservoir of phosphorus in seeds plays a dynamic role in plant and animal metabolism. Phytochemistry Reviews. 2023. vol. 22. no. 5. pp. 1281–1304. doi: 10.1007/s11101-023-09858-1.

7 Layrisse M., García-Casal M.N., Solano L. et al. Iron bioavailability in humans from breakfasts enriched with iron bis-glycine chelate, phytates and polyphenols. The Journal of Nutrition. 2000. vol. 130. no. 9. pp. 2195–2199. doi: 10.1093/jn/130.9.2195.

8 Hidvegi M., Lasztity R. Phytic acid content of cereals and legumes and interaction with proteins. Periodica Polytechnica: Chemical Engineering. 2002. vol. 46. no. 1–2. pp. 59–64.

9 Zinoviev S.V., Kryukov V.S., Mutieva Kh.M., Glebova I.V. et al. Anti-Nutritional Effect of Phytates – Extra-Phosphorus Effect of Phytase (Review). Genetics and Animal Breeding. 2021. no. 4. pp. 74–84. doi: 10.31043/2410-2733-2021-4-74-84 (in Russian).

10 Qi N., Zhan X., Milmine J., Chang K.H., Li J. A novel thermophilic strain of Bacillus subtilis with antimicrobial activity and its potential application in solid-state fermentation of soybean meal. Microbiology Spectrum. 2024. vol. 12. no. 4. article e02784-23. doi: 10.1128/spectrum.02784-23.

11 Pires S.M.G., Reis R.S., Cardoso S.M. et al. Phytates as a natural source for health promotion: A critical evaluation of clinical trials. Frontiers in Chemistry. 2023. vol. 11. article 1174109. doi: 10.3389/fchem.2023.1174109.

12 Urazova A.A., Yarmots G.A. Enzyme Preparations in Animal Husbandry. In: Advances of Youth Science in the Agro-Industrial Complex: Collection of Conference Proceedings. 2022. pp. 229–238. (in Russian).

13 Samtiya M., Aluko R.E., Dhewa T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. Food Production, Processing and Nutrition. 2020. vol. 2. article 6. doi: 10.1186/s43014-020-0020-5.

14 Ivanova A.A. Analysis of Methodological Approaches to Assessing Food Security. Food Policy and Security. 2024. vol. 11. no. 2. pp. 229–244. (in Russian).

15 Mahajan M. Clinical Survey: Protein Consumption in Diet of Adult Indians: A General Consumer Survey. Indian Medical Gazette. 2015. vol. 149. no. 3. pp. 149–150.

16 Semba R.D. The rise and fall of protein malnutrition in global health. Annals of Nutrition and Metabolism. 2016. vol. 69. no. 2. pp. 79–88. doi: 10.1159/000449175.

17 Avnee, Sood S., Chaudhary D.R., Jhorar P., Rana R.S. Biofortification: an approach to eradicate micronutrient deficiency. Frontiers in Nutrition. 2023. vol. 10. article 1233070. doi: 10.3389/fnut.2023.1233070.

18 Strizhko M.N. Antinutrients in Plant-Based Drinks from Grain Raw Materials: A Scoping Review. Food Metaengineering. 2023. vol. 1. no. 1. pp. 63–89. doi: 10.37442/fme.2023.1.3 (in Russian).

19 López-González A.A., Grases F., Roca P. et al. Phytate (myo-inositol hexaphosphate) and risk factors for osteoporosis. Journal of Medicinal Food. 2008. vol. 11. no. 4. pp. 747–752. doi: 10.1089/jmf.2008.0087.

20 Arriero M.M., Ramis J.M., Perelló J., Monjo M. Inositol hexakisphosphate inhibits osteoclastogenesis on RAW 264.7 cells and human primary osteoclasts. PLoS ONE. 2012. vol. 7. no. 8. article e43187. doi: 10.1371/journal.pone.0043187.

21 Sanchis P., López-González Á.A., Costa-Bauzá A. et al. Understanding the protective effect of phytate in bone decalcification related-diseases. Nutrients. 2021. vol. 13. no. 8. article 2859. doi: 10.3390/nu13082859.

22 De Vos W.M., Nguyen Trung M., Davids M. et al. Phytate metabolism is mediated by microbial cross-feeding in the gut microbiota. Nature Microbiology. 2024. vol. 9. no. 7. pp. 1812–1827. doi: 10.1038/s41564-024-01678-9.

23 Gorlov I.F., Semenova I.A., Mosolov A.A., Slozhenkin A.B. et al. A New Method for Reducing the Content of Anti-Nutritional Substances in Legumes. Bulletin of the Russian Agricultural Science. 2018. no. 3. pp. 71–73. (in Russian).

24 Burak L.Ch. Existing Methods of Food Processing and Their Impact on Nutritional Value and Chemical Composition. Technique and Technology of Food Production. 2021. vol. 51. no. 3. pp. 59–73. doi: 10.21603/2074-9414-2021-3-59-73 (in Russian).

25 Vashishth A., Ram S., Beniwal V. Cereal phytases and their importance in improvement of micronutrients bioavailability. 3 Biotech. 2017. vol. 7. no. 1. article 42. doi: 10.1007/s13205-017-0698-y.

26 Koshchaeva O.V., Khmara I.V., Fedorenko K.P., Shkredov V.V. Effect of Germination on the Chemical Composition and Content of Anti-Nutritional Substances in Soybean Seeds. Scientific Journal of KubSAU. 2014. no. 97 (03). pp. 1–25. (in Russian).

27 Sharma B., Gujral H.S. Modifying the dough mixing behavior, protein & starch digestibility and antinutritional profile of minor millets by sprouting. International Journal of Biological Macromolecules. 2020. vol. 153. pp. 962–970. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.10.225.

28 Chukwuejim S., Utioh A., Choi T.D., Aluko R.E. Lupin Seed Proteins: A Comprehensive Review of Composition, Extraction Technologies, Food Functionality, and Health Benefits. Food Reviews International. 2024. vol. 40. no. 2. pp. 691–714. doi: 10.1080/87559129.2023.2191701.

29 Eliseeva L.G., Tokarev P.I., Simina D.V., Molodkina P.G. Quality Management and Nutritional Value of Food Products Based on Non-Traditional Raw Materials for Export-Oriented Production. In: Fundamental and Applied Research in the Field of Management, Economics and Trade: Collection of Conference Proceedings. Saint Petersburg: Politech-Press, 2023. pp. 647–655. (in Russian).

30 Pasarin D., Lavric V., Enascuta C.E. et al. Optimal Enzymatic Hydrolysis of Sweet Lupine Protein towards Food Ingredients. Fermentation. 2023. vol. 9. no. 3. article 203. doi: 10.3390/fermentation9030203.

31 Sinkovič L., Pipan B., Šibul F. et al. Nutrients, Phytic Acid and Bioactive Compounds in Marketable Pulses. Plants. 2023. vol. 12. no. 1. article 170. doi: 10.3390/plants12010170.

32 Zemlyanukhina O.A., Veprintsev V.N., Kalaev V.N., Al-Khachami F.R.Kh. et al. Modification of the Wade Method for Quantitative Determination of Phytin Content in Nut Endosperm. Bulletin of VSU. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy. 2018. no. 3. pp. 163–169. (in Russian).

33 Patent no. 2680833, Russian Federation, IPC G01N 33/00. Method for Determining Salts of Phytic Acid in Plant Seeds. Veprintsev V.N., Zemlyanukhina O.A., Kalaev V.N., Zhuzhzhalova T.P. et al.; applicant and patent holder Voronezh State University. no. 2018102663; filed 23.01.2018; publ. 28.02.2019. Bull. no. 7. (in Russian).

Сведения об авторах

Виктор Е. Плотников аспирант, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, viktor_plotnikov_1999@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6707-8337

Светлана В. Образцова к.б.н., доцент, кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sveta5501pavlenkova@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-9539-0168

Дарья Е. Скосарь студент, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, dartch.skosar@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0006-4260-8948

Валерия В. Курганская студент, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kurganskaya.28.11@icloud.com
https://orcid.org/0009-0008-0568-1411

Инесса В. Плотникова к.т.н., доцент, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, plotnikova_2506@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5959-6652

Константин К. Полянский д.т.н., профессор-консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036; профессор, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнес-процессами, ВФ РЭУ им. Г.В. Плеханова, ул. К. Маркса, 67А, г. Воронеж, 394030, Россия, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Information about authors

Viktor E. Plotnikov graduate student, Bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, viktor_plotnikov_1999@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6707-8337

Svetlana V. Obraztsova Cand. Sci. (Biol.), assistant professor, biochemistry and biotechnology department , Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sveta5501pavlenkova@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-9539-0168

Daria E. Skosar students, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department , Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, dartch.skosar@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0006-4260-8948

Valeriia V. Kurganskaia Степень, должность, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kurganskaya.28.11@icloud.com
https://orcid.org/0009-0008-0568-1411

Inessa V. Plotnikova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, plotnikova_2506@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5959-6652

Konstantin K. Polyanskii Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, professor, Management of Socio-economic Systems and Business Processes department, Plekhanov Russian University of Economics, 67A K. Marx St., Voronezh, 394030, Russia mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/01/2026	**После редакции** 26/01/2026	**Принята в печать** 16/02/2026
Received 12/01/2026	**Accepted in revised** 26/01/2026	**Accepted** 16/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-67-76 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.951:633.8 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Влияние пряно-ароматических растений на качество пищевых продуктов

Анна Т. Васюкова [1] vasyukova-at@yandex.ru 0000-0002-7374-4145
Константин В. Кривошонок [2] krivoshonok@gmail.com 0000-0001-6360-6964
Анатолий Р. Эдварс [3] aedvars@yandex.ru 0009-0005-8778-717X
Николай М. Портнов [4] detsoft@mail.ru 0000-0001-9520-8928
Валерий И. Карпов [5] belenokaleksis@mail.ru 0000-0003-0422-4936
Алексей И. Беленков [6] vikarp@mail.ru 0000-0001-6338-0467

1 Российский государственный университет народного хозяйства имени В.И. Вернадского, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50, Балашиха, Московская область, 143907, Россия
2 Центр гигиенического образования населения Роспотребнадзора, 1 й Смоленский переулок, дом 9, стр. 1, Москва, 121099, Россия
3 Российский биотехнологический университет, ул. Волоколамское шоссе, д. 11, Москва, 125080, Россия
4 Федеральный центр мониторинга питания обучающихся, ул. Радио, д. 10А, г. Москва, 105005, Россия
5 Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, Научный городок, корпус 1, Лобня, Московская обл., 141055, Россия
6 Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия

Аннотация. В статье изложены основные сведения о характеристиках пряно-ароматических растений, их влиянии на вкусо-ароматическую гамму, антиоксидантность, бактерицидный эффект и лечебные свойства пищевых продуктов, в рецептуру которых они входят. Наличие в эфирных маслах пряностей углеводородов (лимонена, карвона, фелантрена, терпинена, цинеола и др.) позволяет корректировать вкусовые характеристики пищи. Продукты получают выраженный аромат и остроту вкуса. Это важно при изготовлении блюд из минтая, который имеет высокую концентрацию триметиламина и обладает резким запахом, особенно после длительного хранения. Поэтому коррекция сенсорных характеристик рыбной продукции посредством введения ароматических веществ и одновременно регулирование продолжительности хранения – значительная научная задача. Анализ пряно-ароматического сырья позволил выявить зависимость вида пряностей и их сочетания с минтаем от продолжительности хранения. В рецептуру модельного рыбного фарша вводили 20 наименований пряностей с концентрацией 0,01 г на 100 г образца и сравнивали с контрольным образцом (рецептура № 364 Сборника рецептур). Рассмотрено влияние продолжительности интенсивности вкусовой гаммы на сенсорные характеристики образцов фаршей и изделий из них (биточки). Установлены рациональные параметры хранения полуфабрикатов и кулинарных изделий. Это послужило основанием для регулирования вкусовых характеристик рыбных продуктов различной степени готовности. Целью разработки является изучение сочетаемости пряно-ароматического сырья и рыбного компонента фаршевых изделий, и влияние пряностей на сроки годности продукта. В статье приведены данные по оптимизации ингредиентного состава рыбных кулинарных изделий с учетом технологических свойств сырья и условий хранения. Научно обоснован перечень ингредиентов, обладающих иммуномодулирующими и антиоксидантными свойствами и возможность их применения при приготовлении рыбных кулинарных изделий для рационального питания населения, в том числе граждан с ограниченными возможностями здоровья. Обоснована рецептура рыбного полуфабриката пролонгированного срока годности в соответствии с СанПин 2.3/2.4.3590–20.

Ключевые слова: пряно-ароматические растения, рыбные полуфабрикаты, сроки годности, ингредиенты, антиоксидантные свойства.

The influence of aromatic plants on the quality of food products

Anna T. Vasyukova [1] vasyukova-at@yandex.ru 0000-0002-7374-4145
Konstantin V. Krivoshonok [2] krivoshonok@gmail.com 0000-0001-6360-6964
Anatoly R. Edwards [3] aedvars@yandex.ru 0009-0005-8778-717X
Nikolay M. Portnov [4] detsoft@mail.ru 0000-0001-9520-8928
Valery I. Karpov [5] belenokaleksis@mail.ru 0000-0003-0422-4936
Alexey I. Belenkov [6] vikarp@mail.ru 0000-0001-6338-0467

1 Vernadsky Russian State University of National Economy, Entuziastov Highway St., Building 50, Balashikha, Moscow Region, 143907, Russia
2 Center for Hygiene Education of the Population of Rospotrebnadzor, 1st Smolensky Lane, Building 9, Building 1, Moscow, 121099, Russia
3 Moscow State University of Food Production, 11, Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russia
4 Federal Center for Monitoring Student Nutrition, 10A Radio St., Moscow, 105005, Russia
5 Federal Scientific Center for Forage Production and Agroecology named after V.R. Williams, Science City, Building 1, Lobnya, Moscow Region, 141055, Russia
6 Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky, 73, Zemlyanoy Val Str., Moscow, 109004, Russia

Для цитирования
Васюкова А.Т., Кривошонок К.В., Эдварс А.Р., Портнов Н.М., Беленков А.И., Карпов В.И. Влияние пряно-ароматических растений на качество пищевых продуктов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 67–76. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-67-76

For citation
Vasyukova A.T., Krivoshonok K.V., Edwards A.R., Portnov N.M., Belenkov A.I., Karpov V.I. The influence of aromatic plants on the quality of food products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 67–76. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-67-76

© 2026, Васюкова А.Т. и др. / Vasyukova A.T. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. This article presents basic information about the characteristics of aromatic plants, their influence on the flavor profile, antioxidant activity, bactericidal effect, and medicinal properties of food products containing them. The presence of limonene, carvone, phelanthrene, terpinene, and cineole in spice essential oils allows for the adjustment of flavor characteristics. Products acquire a distinct aroma and pungency. This is important when preparing dishes from pollock, which has a high concentration of trimethylamine and a pungent odor, especially after prolonged storage. Therefore, adjusting the sensory characteristics of fish products by adding aromatic substances while simultaneously regulating shelf life is a significant scientific challenge. Analysis of aromatic raw materials revealed the relationship between the type of spices and their combination with pollock and shelf life. Twenty spices were added to a model fish mince recipe at a concentration of 0.01 g per 100 g of sample and compared with a control sample (recipe no. 364 of the Recipe Collection). The effect of flavor intensity duration on the sensory characteristics of mince samples and products made from them (meatballs) was examined. Rational storage parameters for semi-finished and culinary products were established. This served as the basis for regulating the flavor characteristics of fish products at varying degrees of readiness. The aim of the development is to study the compatibility of spicy-aromatic raw materials and the fish component of minced meat products, and the influence of spices on the shelf life of the product. This article presents data on optimizing the ingredient composition of fish culinary products, taking into account the technological properties of the raw materials and storage conditions. A list of ingredients with immunomodulatory and antioxidant properties and the possibility of their use in the preparation of fish culinary products for the balanced nutrition of the population, including individuals with disabilities, is scientifically substantiated. The formulation of a semi-finished fish product with an extended shelf life is substantiated in accordance with SanPiN 2.3/2.4.3590–20

Keywords: aromatic herbs, semi-finished fish products, shelf life, ingredients, antioxidant properties.

Введение

Формируя новые вкусовые свойства продуктов питания, пряности усиливают физиологическую активность воздействия пищи на органы пищеварения, способствуя ее лучшему усвоению, так как в них обнаружено значительное количество витаминов, минеральных солей, других полезных веществ [1]. Пряности усиленно воздействуют на желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), стимулируют секрецию желудочного сока, который в свою очередь раздражает стенки ЖКТ [2]. Благодаря этому увеличивается приток крови к стенкам желудка, а его слизистая оболочка лучше восстанавливается. Биологически активные вещества пряностей: алкалоиды, гликозиды, эфирные масла, терпеновые углеводороды (лимонена, карвона, фелантрена, терпинена, цинеола) и другие нутриенты являются катализаторами многих ферментативных процессов и таким образом активизируют обмен веществ в организме человека в целом. Благодаря капсаицину, содержащемуся в остром перце, снижается накопление холестерина на стенках сосудов [3]. Отмечено его антагонистическое отношение к грамотрицательным бактериям: *Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae* и виды *Proteus*, а также *Helicobacter pylori*, которые вызывают воспаление желудка. Они могут попасть в организм вместе с пищей [4].

Среди большого разнообразия зеленных овощных культур особое место занимает укроп пахучий (*Anethum graveolens L.*) [5] Своим характерным запахом укроп обязан эфирному маслу карвону, которое содержат его наземные части: плоды до 5%, а листья и стебли – 1,5–2,5%. Поскольку это ароматическое растение, его применяют для отдушки разных продуктов [6, 7].

Широкое распространение в кулинарной практике принадлежит тимьяну. За счет разнообразных терпеноидов (тимол, карвакрол, р-цимол, γ-терпинен, α-терпинеол, борнеол и цингиберен) [8], среди которых преобладает тимол и карвакрол – главные действующие вещества тимьяна, производные фенола, тимьян обладает антисептическими, антибактериальными и противовоспалительными свойствами [9].

Эфирное масло кориандра богато ценными летучими компонентами (линалоол, гераниол, геранилацетат), которые сообщают продуктам цветочный аромат [10]. Свежие зелёные листья сортов «Дези» и «Пешавари» содержат наибольшее количество спиртов и ацетатов с длиной углеродной цепи в шесть атомов, которые являются важными компонентами аромата, придающими ему характерную «зелёную нотку». Сорт «Гибрид» показал самую высокую активность в борьбе со свободными радикалами и содержал наибольшее количество антиоксидантов [11]. Терпеноиды и эфирные масла чёрного перца (пиперональ, гелиотропин), обуславливают сладковатый, восточный аспект запаха перца, а также пара- и мета-крезолы, придают медицинскую фенольную ноту. Эфирные масла, содержащие монотерпены, лимонен, α- и β-пинены, кариофиллен, мирцен, пара-цимен, линалоол, 1,8 – цинеол и другие придают продуктам перечный вкус и остроту. Пиперин черного перца и его активные компоненты обладают рядом потенциальных биологических свойств, в том числе антиоксидантными, противомикробными, противоопухолевыми, цитотоксическими [12]. Душистый перец богат эфирными маслами, которые кроме специфического аромата проявляют физиологическую активность. Главными компонентами эфирного масла душистого перца являются эвгенол, кариофиллен, цинеол, фелландрен [13]. Белый перец содержит эфирное масло (эвгенол, кариофиллен, мирцен), но его аромат и острота вкуса менее выражены, чем у чёрного перца, так как значительная часть вкусовых веществ теряется при удалении околоплодника [14]. Душистый перец (пимента) содержит до 4% эфирных масел. Главными

компонентами пиментового масла, которое из него получают, являются эвгенол, кариофиллен, цинеол, фелландрен. [15]. Сельдерей содержит β-селинен – терпеноид, который также найден в масле петрушки. Она также насыщена эфирным маслом, в состав которого входят апиол, миристицин, лимонен, фитол, фарнезол и другие летучие ароматические соединения (всего их известно около 60). В составе плодов тмина обнаружено 3–7% эфирного масла, главными компонентами которого являются лимонен (30%), карвон (40–60%), карвакрол – моноциклические монотерпены. Эфирное масло кардамона отличается от остального растительного сырья в основном концентрацией терпенов и их кислородосодержащих производных. Среди компонентов: α-терпинеол и α-терпинилацетат, лимонен, ментон, 1,8-цинеол (эвкалиптол) и β-фелландрен, мирцен, сабинен. В гвоздике, идентично с другими эфирными маслами специй, имеется ацетилэвгенол, бета-кариофиллен и ванилин. Также в ней есть тритерпеноиды – олеанолевая кислота, стигмастерол и кампестерол, и несколько сесквитерпенов [16]. Основную долю эфирного масла имбиря составляют тяжёлые сесквитерпены: зингиберен, бета-бисаболен, ar-куркумен, бета-сесквифелландрен, фарнезен, неролидол и другие. Также в составе есть цитраль, лимонен и линалоол, которые делают профиль имбиря похожим на цитрусовый. В состав эфирных масел шафрана и шалфея входит пинен и цинеол. Куркума богата турмеронами (более 60%). Также в состав входят сесквитерпеновые кетоны, цингиберен, борнеол и другие терпеноиды, а эстрагон в таком же количестве (60–70%) имеет эстрагол, кроме того, имеется комплекс ароматических веществ сабинен, мирцен, терпен, анисовый и метаоксикоричный альдегиды, оцимен, фелландрен и другие компоненты. Среди основных ингредиентов масла эстрагона присутствуют метилэвгенол, борнилацетат, бициклогермакрен и другие соединения [17].

Недавние исследования показали, что эфирные масла растений обладают антимикробными свойствами, которые могут снижать количество бактерий, вызывающих порчу пищевых продуктов, как in vitro, так и in vivo [15]. Более того, широкий спектр антимикробных свойств эфирных масел может способствовать сохранению свежести морепродуктов, что высоко ценится потребителями [18]. Бактерицидными и антисептическими свойствами обладают вещества, содержащиеся в эфирных маслах пряностей: циннамальдегид, эвгенол, эвкалиптол, куминальдегид, розмариновая кислота, розмаридифенол, карнозол, эпиросманол, карнозиновая кислота, розманол и изоросманол [19].

Антибактериальные свойства природных соединений специй (перец чили, кайенский, паприка) привлекают все большее внимание. Выявлено, что исследуемые соединения капсаицина и его производные оказывают как прямые, так и косвенные антибактериальные свойства in vitro в зависимости от применяемых концентраций и исследуемых штаммов бактерий; синергические антибактериальные эффекты в сочетании с определенными антибиотиками; модификацию резистентности путем ингибирования бактериальных эффлюксных насосов; ослабление экспрессии факторов вирулентности бактерий [20]; ослабление иммунопатологических реакций, вызванных патогеном. Следует отметить, что соединения капсаицина – перспективные антимикробные молекулы [21], которые могут дополнять или заменять лечение антибиотиками при бактериальных инфекциях [22]. Рядом исследований обоснована целесообразность использования в качестве микробных деконтаминантов фенхеля (*Foeniculum vulgare var. dulce*) и базилика обыкновенного (*Ocimum basilicum*). Повышенным бактерицидным действием обладают настои из фенхеля особенно относительно штамма Staphylococcus aureus, более слабый эффект установлен для *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis*. У настоя из базилика слабо выраженный эффект только для *Staphylococcus aureus* при разведении 1:2, в отношении остальных бактерий установлена нулевая активность [23].

Большинство консервантов, используемых в морепродуктах, основаны на химических добавках для продления срока годности и улучшения сенсорной привлекательности [23]. Среди химических консервантов, используемых в морепродуктах, бутилированный гидрокситолуол (ГОТ) выделяется как наиболее часто используемый вариант [24]. Использование ГОТ объясняется его мощными антиоксидантными свойствами и антимикробным действием [23]. Тем не менее, было показано, что ГОТ представляет риск для здравоохранения, включая его предрасположенность к токсическим и канцерогенным эффектам [25]. Из-за этих пагубных воздействий как на сенсорные качества свежих морепродуктов, так и на здоровье потребителей, органы по безопасности пищевых продуктов в некоторых зарубежных странах запретили использование этих веществ в производстве мясных продуктов [25]. Кроме того, как потребители, так и специалисты в этой области признали настоятельную важность исследования и внедрения «биоконсервантов» [26]. Эфирные масла и растительные экстракты были описаны Šojić B., Milošević S. и другими учеными (2023). Исследован биоактивный потенциал и применение богатых терпеноидами веществ, в качестве эффективных антиоксидантных и противомикробных агентов в мясе и мясных

продуктах [27]. Кроме введения в сырой фарш, Eshaghi R. и Mohsenzadeh M. (2024) предложили использовать бионанокомпозитные активные упаковочные пленки на основе карбоксиметилцеллюлозы, мирровой камеди, наночастиц TiO_2 и эфирного масла укропа для сохранения качества свежего мяса рыбы [28].

Одним из путей регулирования вкусовых характеристик рыбного сырья и повышения антибактериальных свойств пищевых систем является расширение ассортимента продуктов из нетрадиционных видов пищевого сырья с высоким содержанием биологически активных веществ (БАВ), позволяющих повышать неспецифическую резистентность организма к неблагоприятным факторам окружающей среды [29].

Дикорастущие пряно-ароматические растения центральных и южных регионов России, а также традиционные пряности являются альтернативным источником ценных пищевых и биологически активных веществ, имеющих разнообразную природу и вкусо-ароматический профиль, что позволяет использовать их в рецептурах рыбных фаршевых изделий.

Цель работы – изучение сочетаемости пряно-ароматического сырья и рыбного компонента фаршевых изделий, и влияние пряностей на сроки годности продукта.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели в качестве объектов исследования использовали семена и вегетативные части растений: базилик свежий, гвоздика молотая, душистый перец, имбирь молотый, кардамон сухой, кинза (кориандр) листья и семена, куркума молотая, лавровый лист, перец белый, красный, кайенский, черный горошек, петрушка сушеная, сельдерей, тимьян свежий и CO_2 экстракт, тмин молотый, укроп семена, шалфей молотый, шафран, эстрагон сушеный. Из рыбного сырья был выбран минтай свежемороженый, как наиболее часто используемый в предприятиях общественного питания, в том числе при организации питания различных социальных контингентов. В качестве контрольного образца – рецептура № 364 Сборника рецептур [30]. Технология приготовления полуфабрикатов и готовых кулинарных изделий включала следующие процессы: размораживание фарша из минтая в моечной ванне при температуре воды 20 °С; очистка лука; нарезка кубиком 0,5 × 0,5 см; смешивание с яйцом С1, молоком 3,2% жирности; пассерование лука на растительном масле; подготовка пряностей; перемешивание полученной смеси с фаршем из минтая, солью, специями (по 1 наименованию в концентрации 0,01 г на 100 г фарша); формирование рыбного полуфабриката овальной формы с заостренным кончиком, с использованием сухарей панировочных. Тепловую обработку биточков проводили в пароконвектомате при температуре 170 °С в течение 12 минут на режиме «жар + пар» при 15–20% влажности. Готовые изделия упаковывали в полиэтиленовую пленку в модифицированной газовой среде при 0 – 1° С и хранили до 10 суток. Пряно-ароматические добавки (специи), используемые в рыбных полуфабрикатах, приведены в таблице 1.

Определение физико-химических показателей эффективных добавок – стабилизаторов, структурообразователей, загустителей проводили с помощью методик, опубликованных в «Руководствах по методам исследований» [32]. Математическую обработку результатов исследований проводили, используя программный пакет Curve Expert Ver. 1.34. Методом подбора компонентов были выявлены перспективные сочетания для обогащения традиционных рецептур растительными компонентами пищи и методом планирования эксперимента созданы модельные структуры, на основании которых выявлены перспективные пряно-ароматические специи, наиболее оптимально сочетаемые с рыбой (минтаем).

Сенсорную оценку филе сырой рыбы, рыбных полуфабрикатов и готовых кулинарных изделий проводили дегустационные комиссии из десяти человек, прошедшие необходимое обучение и тестирование. Обучение считалось завершенным, когда участники уверенно освоили процесс оценки, а индивидуальные оценки находились в пределах одной единицы от среднего балла. Лабораторная оценка включала сервировку репрезентативных образцов филе рыбы, рыбных полуфабрикатов и готовых кулинарных изделий на фарфоровых тарелках на открытом воздухе, без указания способа обработки, по три образца на каждый полуфабрикат (готовое изделие). При наличии достаточного естественного освещения дегустационные комиссии использовали девятибалльную гедонистическую шкалу для оценки свежести, присваивая баллы от 1 до 9 каждому параметру на основе сенсорных критериев качества [33]. Оценка включала цвет, запах, внешний вид и текстуру, а для готовых изделий еще вкус и аромат. Общие сенсорные оценки качества использовались для классификации рыбного филе как «очень хорошее», «хорошее», «приемлемое», «неприемлемое» или «плохое» в соответствии со шкалой: 9 (чрезвычайно понравилось), 8 (очень понравилось), 7 (средне понравилось), 6 (слегка понравилось), 5 (ни то, ни другое), 4 (слегка не понравилось), 3 (средне не понравилось), 2 (очень не понравилось) и 1 (чрезвычайно не понравилось). Образцы оценивались в их естественном состоянии без дополнительной подготовки [34].

Таблица 1.

Пищевая ценность растительных добавок и специй, используемых в рыбных полуфабрикатах [31]

Table 1.

Nutritional value of herbal additives and spices used in semi-finished fish products [31]

Продукт/ Product	β-Каротин, мкг/ β-Carotene, mcg	β-Крипто-ксантин, мкг/ β-Crypto-xanthine, mcg	α-Токоферол, мг/ α-Tocopherol, mg	Витамин С, мг/ Vitamin C, mg	Селен, мкг/ Se, µg	Цинк, мг/Zn, mg	Медь, мг/ Copper, mg	Лютеин + зеаксантин, мкг/ Lutein + Zeaxanthin, mcg	18:1 Олеиновая, г/ 18:1 Oleic, g	18:2 линолевая, г/ 18:2 Linoleic, g	18:3 Линоленовая, г/ 18:3 Linolenic, g
Тимьян, свежий | Thyme, fresh	2851		7,48	160,1	1,74	1,81	0,555		0,081	0,085	0,447
Тимьян, сушеный | Thyme, dried	2264	33	1,03	50,0	4,6	6,18	0,86	1895	0,470	0,500	0,690
Кориандр, листья, сухой Coriander, leaves, dried	3407	175		566,7	29,3	4,72	1,786	2428	2,216	0,328	0
Кориандр семена | Coriander seeds			2,50	21,0	26,2	4,70	0,975		13,480	1,750	
Кинза (кориандр) листья Cilantro (coriander) leaves	3930	202		27,0	0,9	0,50	0,225	865	0,273	0,040	0
Душистый перец | Allspice			29,1	39,2	2,7	1,01	0,553		0,660	2,290	0,070
Перец, черный молотый Pepper, ground black	26162	6186	1,04	0,9	6,3	4,33	0,713	18944	1,603	7,314	0,453
Перец, черный горошек Pepper, black peppercorns	310	25	29,8	0	4,9	1,19	1,330	454	0,647	0,694	0,152
Перец, красный, кайенский Pepper, red, cayenne	21840	6252		76,4	8,8	2,48	0,373	13157	2,510	7,710	0,660
Перец, белый | Pepper, white			10,7	21,0	3,1	1,13	0,91				
Сельдерей | Celery	4500		0,5	38	0,4	0,13	0,350			0,018	0,079
Базилик, сушеный | Basil, dried	378	24		0,8	3,0	7,10	2,10	1150	1,067	0,199	0,300
Базилик, свежий | Basil, fresh	3142	46	7,48	18,0	0,3	0,81	0,385	5650	0,088	0,073	0,316
Лавровый лист | Bay leaf			2,50	46,5	2,8	3,70	0,416		1,500	1,240	1,050
Тмин, семя | Caraway, seed	206	16		21,0	12,1	5,50	0,91	454	7,035	3,122	0,150
Тмин молотый | Caraway, ground	762	0		7,7	5,2	4,80	3,33	448	13,618	3,103	0,176
Кардамон сухой | Cardamom, dried			8,82	21,0		7,47	0,383		0,850	0,310	0,120
Гвоздика, молотая | Clives, ground	45	103	3,33	0,2	7,2	2,32	0,368	0	0,990	2,657	0,585
Укроп семя | Dill seed				21,0	12,1	5,20	0,78		9,36	0,960	0,150
Укроп, сушеный | Dill, dried			0	50,0		3,30	0,49				
Имбирь, молотый | Ginger, ground	18	0	8,96	0,7	55,8	3,64	0,48	0	0,357	0,706	0,223
Петрушка, сушеная | Parsley, dried	1152	4		125,0	14,1	5,44	0,78	2428	0,761	1,248	1,876
Шафран | Saffron			7,48	80,8	5,6	1,09	0,328		0,390	0,754	1,242
Шалфей, молотый | Sage, ground	3485	109		32,4	3,7	4,70	0,757	1895	1,750	0,530	1,230
Чабер, молотый | Savory, ground				50,0	4,6	4,30	0,847				
Эстрагон, сушеный Tarragon, dried			4,43	50,0	4,4	3,90	0,677		0,361	0,742	2,955
Куркума, молотая | Turmeric, ground	0	0	0,80	0,7	6,2	4,50	1,30	0	0,131	0,672	0,084

Результаты и обсуждение

Анализ химического профиля пряно-ароматических растений, представленных в таблице 1, показал, что монотерпены преобладают в летучей фракции и составляют большую часть идентифицированных соединений. Тимьян, кориандр, различные виды перца (кроме белого), базилик, тмин, гвоздика, имбирь, петрушка, шафран, эстрагон и куркума обладают высокой антиоксидантной активностью.

Статистические результаты показали значительную взаимосвязь между обогащением рыбных полуфабрикатов и готовых кулинарных изделий порошкообразными специями в концентрации 0,01 г на 100 г продукта, указанными в табл. 1. и временем хранения, влияя на все оценочные физико-химические свойства и цвет ($p < 0,05$). Кроме того, на данные показатели значительное влияние оказал интервал хранения ($p < 0,05$).

Значения pH образцов рыбных полуфабрикатов значительно различались в разных образцах с добавками специй и времени хранения ($p < 0,001$) (таблица 2).

Таблица 2.

Образцы рыбных полуфабрикатов с добавками специй

Table 2.

Samples of semi-finished fish products with added spices

Образцы рыбных полуфабрикатов с добавками специй Samples of semi-finished fish products with added spices	pH					
Время, дни/Time, days	0	2	4	6	8	10
Биточек, Тимьян, свежий/ Cutlet, Thyme, fresh	7,48	7,46	7,42	7,52	7,75	7,85
Биточек, Тимьян, сушеный/ Cutlet, Thyme, dried	7,6	7,58	7,56	7,65	7,78	7,88
Биточек, Кориандр, листья, сухой/ Cutlet, Coriander, leaves, dried	7,44	7,42	7,4	7,6	7,77	7,8
Биточек, Кориандр семена/ Cutlet, Coriander seeds	7,8	7,78	7,74	7,85	7,88	7,9
Биточек, Кинза (кориандр) листья/ м Cilantro (coriander) leaves	7,7	7,68	7,64	7,72	7,83	7,9
Биточек, Душистый перец/ Cutlet, Allspice	7,78	7,7	7,68	8,32	8,11	8,2
Биточек, Перец, черный молотый/ Cutlet, Pepper, ground black	8,24	8,12	8,02	8,31	8,3	8,3
Биточек, Перец, черный горошек/ Cutlet, Pepper, black peppercorns	7,9	7,9	7,8	8,32	8,22	8,1
Биточек, Перец, красный, кайенский/ Cutlet, Pepper, red, cayenne	7,55	7,48	7,45	7,6	9,78	7,86
Биточек, Перец, белый/ Cutlet, Pepper, white	8,32	8,27	8,3	8,33	8,58	8,68
Биточек, Сельдерей/ Cutlet, Celery	7,7	7,68	7,64	7,7	7,75	7,8
Биточек, Базилик, сушеный/ Cutlet, Basil, dried	8,24	8,12	8,02	8,1	8,1	8,0
Биточек, Базилик, свежий/ Cutlet, Basil, fresh	7,8	7,75	7,7	7,8	7,85	7,9
Биточек, Лавровый лист/ Cutlet, Bay leaf	7,68	7,62	7,58	7,65	7,75	7,0
Биточек, Тмин, семя/ Cutlet, Caraway, seed	7,8	7,78	7,74	7,8	7,85	8,0
Биточек, Тмин молотый/ Cutlet, Caraway, ground	8,21	8,15	8,1	8,15	8,1	8,0
Биточек, Кардамон сухой/ Cutlet, Cardamom, dried	7,8	7,78	7,74	7,79	7,79	7,8
Биточек, Гвоздика, молотая/ Cutlet, Clives, ground	8,2	8,1	8,0	8,15	8,1	8,0
Биточек, Укроп семя/ Cutlet, Dill seed	7,6	7,55	7,5	7,68	7,75	7,87
Биточек, Укроп, сушеный/ Cutlet, Dill, dried	7,65	7,6	7,5	7,65	7,78	7,87
Биточек, Имбирь, молотый/ Cutlet, Ginger, ground	8,27	8,15	8,02	8,1	8,1	8,0
Биточек, Петрушка, сушеная/ Cutlet, Parsley, dried	7,5	7,45	8,4	7,45	7,65	7,8
Биточек, Шафран/ Cutlet, Saffron	7,53	7,48	7,43	7,5	7,75	7,9
Биточек, Шалфей, молотый/ Cutlet, Sage, ground	7,7	7,68	7,64	7,75	7,82	7,89
Биточек, Чабер, молотый/ Cutlet, Savory, ground	7,6	7,55	7,5	7,7	7,8	7,87
Биточек, Эстрагон, сушеный/ Cutlet, Tarragon, dried	7,6	7,55	7,5	7,7	7,74	7,78
Биточек, Куркума, молотая/ Cutlet, Turmeric, ground	8,23	8,15	8,02	8,15	8,1	8,0
Биточек, контроль/ Cutlet, Control	8,37	8,2	8,12	8,25	8,29	8,32

Продолжительность хранения рыбных полуфабрикатов с добавлением специй позволила установить определенную зависимость качества продукта от вида специй, причем концентрация специй во всех образцах была одинаковой и составляла 0,01 г на 100 г продукта. Среди свежеприготовленных образцов с высокими значениями pH был контрольный образец, в который специи не добавлялись (8.37), а также образцы с куркумой, имбирем, гвоздикой, тмином, базиликом, белым и черным перцем в диапазоне 8,21–8,32. Минимальные значения pH биточков свежеприготовленных отмечены у образцов с кориандром, тимьяном, перцем красным и кайенским, петрушкой, шафраном (7,44–7,55). Хранение полуфабрикатов на четвертый день показало небольшое снижение pH видимо за счет потерь массы. Наибольшие показатели pH наблюдали у контрольного образца (8,12), а также у образцов полуфабрикатов биточков с белым перцем, имбирем и куркумой (8,02–8,3), а наименьшие показатели, которые заметно отличались от контроля, были с кориандром, тимьяном, красным и кайенским перцем, шафраном и укропом (стебли сушеные измельченные и семя) в интервале от 7,4 до 7,5. Однако на шестой день хранения во всех образцах наметилась тенденция к снижению свежести, которая отразилась на незначительном увеличении pH в пределах 0,5–1,0%. В последующие четыре дня pH изменялся от нейтральной в слабо щелочную сторону и в контрольном образце достигла 8,32. Было принято решение не продолжать хранение. Таким образом, установлен максимальный срок хранения полуфабрикатов с добавлением пряностей – 10 суток без изменений внешних признаков и pH незначительно отличающегося от свежеприготовленных образцов.

Далее проводили исследование с готовыми образцами биточков, которые хранили при тех же условиях, что и полуфабрикаты. Изменение pH биточков со специями приведено на рисунке 1.

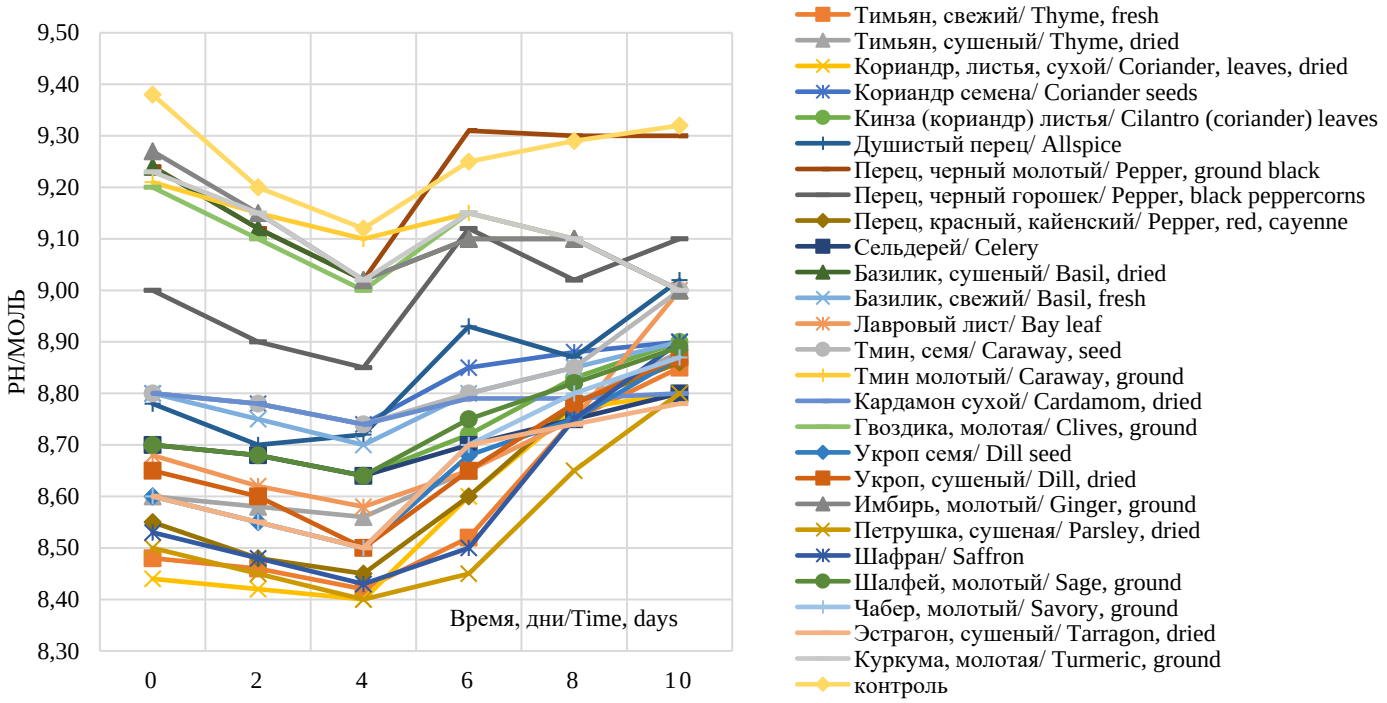


Рисунок 1. Изменение значение pH при хранении рыбных биточков со специями
Figure 1. Change in pH during storage of fish cakes with spices

В нулевой день самый высокий pH наблюдался в контрольном образце (9,38), за ним следовали образец с имбирем (9,27), сушеным базиликом и черным перцем (9,24), молотым перцем (9,21) и гвоздикой (9,2), тогда как самый низкий pH был зарегистрирован в образцах с кориандром (измельченные листья, 8,44), тимьяном (8,48), петрушкой (8,5). К четвертому дню значения pH оставались значительно разными, причем образцы, с добавками гвоздики, базилика, имбиря, черного перца, куркумы и тмина (9,0–9,1), демонстрировали самый высокий pH (9,10), а образцы, с кориандром и тмином, показали более низкий pH (8,40–8,42) ($p < 0,05$). На шестой день хранения все образцы с добавками пряностей, особенно с петрушкой, шафраном, тимьяном свежим, имели более низкие значения pH (8,45–8,52), чем контрольный образец и образцы с душистым, белым и черным перцем, гвоздикой, тмином и куркумой (9,00–9,33) ($p < 0,05$). К десятому дню контрольный образец и образцы с белым, душистым и черным перцем, базиликом, лавровым листом, тмином и гвоздикой имели самые высокие значения pH (9,00–9,68 соответственно), в то время как образцы с добавками сельдерея, красного перца, тимьяна и кориандра, показали значительно более низкий pH (8,8–8,86) ($p < 0,05$), что указывает на лучшую сохранность. Однако на 10 день контрольный образец и все образцы с добавлением специй показали плавное увеличение, что указывает на начало ухудшения качества, незначительное прогрессирование порчи. Можно отметить, что добавка специй поддерживала значительно более низкий pH, что подтверждает их эффективность в сохранении качества рыбных готовых изделий.

Заключение

Анализ наиболее распространенных пряностей, используемых в кулинарной практике, показал, что из 20 наименований с концентрацией 0,01 г на 100 г образца наилучшие результаты были достигнуты при использовании кориандра и тимьяна. Причем разница в степени измельчения и состоянии (свежий, сушеный, листья, семена) небольшая.

Установлено, что рыбные полуфабрикаты и готовые кулинарные изделия с пряностями рекомендуется хранить в холодильных условиях в охлажденном состоянии не более 10 суток. Все изделия, подвергнутые хранению, должны быть упакованы в полиэтиленовую пленку в модифицированной газовой среде. Режим хранения: температура от 0 до -1 °С и продолжительность хранения – до 10 суток.

Разработанные образцы рыбных биточков со специями, подвергнутые хранению в течение 10 суток, соответствуют требованиям СанПин 2.3/2.4.3590–20.

Литература

1 Березина Н.А., Хмелева Е.В., Евдокимова О.В., Самофалова Л.А. Применение сои и продуктов ее переработки в перерабатывающей и пищевой промышленности // Биология в сельском хозяйстве. 2023. № 3 (40). С. 26–37.

2 Rani J., Kaur P., Chuwa C. Nutritional benefits of herbs and spices to the human beings // Annals of Phytomedicine: An International Journal. 2023. V. 12. № 1. P. 187–197. doi: 10.54085/ap.2023.12.1.20

3 Острые специи против инфекций. Роспотребнадзор. Центр гигиены и эпидемиологии Челябинской области, 16.01.2025. URL: https://fbuz74.ru/about/news/4644/ (дата обращения: 08.11.2025).

4 Острая еда. За и против. ФГБУ НМИЦ терапии и профилактической медицины Минздрава РФ, 07.11.2025. URL: https://gnicpm.ru/articles/zdorovyj-obraz-zhizni/ostraya-eda-za-i-protiv.html (дата обращения: 09.11.2025).

5 Чернова М.М., Маслакова А.А. Актуальные вопросы современной селекции, биотехнологии и ботаники // Актуальные вопросы современной селекции, биотехнологии и ботаники: мат. конф. М.: РГАУ, 2024. С.250

6 Ткачева М.И. Укроп и петрушка как биологически активная добавка витамина К к пище // Эндокринология: Новости. Мнения. Обучение. 2022. № 4 (41). С. 132–135.

7 Елисеева Т., Тарантул А. Укроп (лат. Anéthum) // Журнал здорового питания и диетологии. 2020. № 12. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ukrop-lat-an-thum (дата обращения: 23.10.2025).

8 Ibraeva M., Oztürk M. Phytochemical study of the composition of plants of the genus Thymus Serpyllum L. // Yessenov Science Journal. 2024. V. 47. № 2. P. 5. doi: 10.56525/ALET1432

9 Тимофеев Н.П. Фитобиотики в мировой практике: виды растений и действующие вещества, эффективность и ограничения, перспективы (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021. Т. 22. № 6. С. 804–825. doi: 10.30766/2072-9081.2021.22.6.804-825

10 Дмитриев К.О., Бредихин С.А., Нугманов А.Х.Х., Осмоловский П.Д. Сравнительный анализ выхода и химического состава эфирного масла из плодов кориандра посевного // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 74. № 4. С. 16–24.

11 Abbas A., Anwar F., Ahmad N. et al. Characterization of Bioactives and Nutra-Pharmaceutical Potential of Supercritical Fluid and Hydro-Distilled Extracted Coriander Leaves Essential Oil // Dose-Response. 2022. V. 20. № 4. P. 15593258221130749. doi: 10.1177/15593258221130749

12 Pakiyasoti E.V., Balachandran S., Jans E.R. Effect of storage (in small packages) on the essential oil and piperine contents of ground black pepper // Journal of the National Science Council of Sri Lanka. 1983. V. 11. P. 111–122.

13 Ashokkumar K., Murugan M., Dhanya M.K. et al. Phytochemistry and therapeutic potential of black pepper [Piper nigrum (L.)] essential oil and piperine: a review // Clinical Phytoscience. 2021. V. 7. P. 52. doi: 10.1186/s40816-021-00292-2

14 Мельникова С.В. Пряности // Биология. 2001. № 11. С. 1–4.

15 Schorr R.R., Ballesteros Garcia M.J., Petermann D. et al. Eugenol, isoeugenol, thymol, carvacrol, and ester derivatives as an ecofriendly option to control Glomerella leaf spot and bitter rot on apple // Plants. 2024. V. 13. № 22. P. 3196. doi: 10.3390/plants13223196

16 Wang W., Zhang Y., Yang Z., He Q. Effects of incorporation with clove (Eugenia caryophyllata) essential oil (CEO) on overall performance of chitosan as active coating // International Journal of Biological Macromolecules. 2021. V. 166. P. 578–586. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.10.221

17 Pop D.M., Timar M.C., Varodi A.M., Beldean E.C. Evaluation of Clove (Eugenia caryophyllata) Essential Oil as a Potential Alternative Antifungal Wood Protection System for Cultural Heritage Conservation // Maderas: Ciencia y Tecnología. 2022. V. 24. P. 411. doi: 10.4067/S0718-221X2022000100411 (Примечание: удален дубликат №18)

18 Темердашев З.А., Милевская В.В., Рябоконь Л.П. и др. Идентификация и определение компонентов эфирных масел шалфея лекарственного (Salvia officinalis L.), выделенных различными экстракционными способами // Журнал аналитической химии. 2020. Т. 75. № 11. С. 1030–1039. doi: 10.31857/S0044450220110138

19 Issifu I., Deffor E.W., Deyshappriya N.P.R. et al. Drivers of seafood consumption at different geographical scales // Journal of Sustainability Research. 2022. V. 4. № 3. P. e220016. doi: 10.20900/jsr20220016

20 Baptista R.C., Horita K.N., Sant'Ana A.S. Natural products with preservatives for enhancing microbiological safety and extending shelf life of seafood: a review // Food Research International. 2020. V. 127. P. 108762. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108762

21 Oedemi B.O., Kocia E.M., Stapleton P.D., Gibbons S. Capsaicin and gingerol analogs inhibit the growth of efflux-resistant bacteria and the conjugative transfer of R-plasmids // Journal of Ethnopharmacology. 2019. V. 245. P. 111871. doi: 10.1016/j.jep.2019.111871

22 Wang H., Yu L., Li F. et al. Synthesis of capsaicin-containing amide derivatives and their antioxidant and antibacterial activities // Journal of Food Biochemistry. 2019. V. 43. № 12. P. e13061. doi: 10.1111/jfbc.13061

23 Füchtbauer S., Mousavi S., Bereswill S., Heimesaat M.M. Antibacterial properties of capsaicin and its derivatives and their potential to fight antibiotic resistance – A literature survey // European Journal of Microbiology and Immunology. 2021. V. 11. № 1. P. 10–17. doi: 10.1556/1886.2021.00003

24 Рахмонов К.С., Баракаев Н.Р. Влияние пряно-ароматических растений на микробиологическую стабильность хлеба при хранении // Universum: технические науки. 2025. № 5 (134). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20114 (дата обращения: 25.03.2026).

25 Mujovic M., Sojić B., Peulić T. et al. Effect of dill (Anethum graveolens) essential oil and lipid extracts as novel antioxidants and antimicrobials on beef hamburger quality // Foods. 2024. V. 13. № 6. P. 896. doi: 10.3390/foods13060896

26 Blundell R., Shah M.A., Azzopardi J.I. et al. Butylated hydroxytoluene // Antioxidant Effects on Health: The Light and the Dark Side. Amsterdam: Elsevier, 2022. P. 195–200. doi: 10.1016/B978-0-12-819096-8.00038-0

27 Tayel A., Hassanin F.S., Edris S.N. et al. Preservative Potential of Anethum graveolens Essential Oil on Fish Fillet Quality and Shelf Life During Refrigerated Storage // Foods. 2025. V. 14. № 9. P. 1591. doi: 10.3390/foods14091591

28 Šojić B., Milošević S., Savanović D. et al. Isolation, bioactive potential, and application of terpenoid-rich essential oils and extracts as effective antioxidant and antimicrobial agents in meat and meat products // Molecules. 2023. V. 28. № 5. P. 2293. doi: 10.3390/molecules28052293

29 Eshaghi R., Mohsenzadeh M., Ayala-Zavala J.F. Bionanocomposite active packaging films based on carboxymethyl cellulose, myrrh gum, TiO_2 nanoparticles, and dill essential oil for preserving the fresh meat quality of fish (Cyprinus carpio) // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. V. 263. P. 129991. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129991

30 Бутова С.В., Шахова М.Н., Воронцов В.В., Королькова Н.В. Исследование некоторых биологически активных веществ, обладающих антиоксидантной активностью, в пряно-ароматических растениях // Производство и переработка сельскохозяйственной продукции: мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 23–25 ноября 2022 г. Воронеж: Воронежский ГАУ, 2022. С. 169–177.

31 Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания. СПб.: ПРОФИКС, 2003. 408 с.
32 USDA SR27. URL: http://1cp.ru/sr27/ (дата обращения: 25.01.2026).
33 Карпухина В. Целительные специи. Пряности. Приправы. От 100 болезней. М.: АСТ, 2014. 256 с.
34 Матисон В.А., Арутюнова Н.И., Горячева Е.Д. Применение дескрипторно-профильного метода для оценки качества продуктов питания // Пищевая промышленность. 2015. № 5. С. 52–59.
35 Mohammadi S., Sahari M.A., Mehdipour Biregani Z. Combination effects of potassium lactate and sodium diacetate on the chemical and microbial attributes of hamburger during the frozen storage // Journal of Food and Bioprocess Engineering. 2023. V. 6. № 1. С. 26–33.

References

1 Berezina N.A., Khmeleva E.V., Evdokimova O.V., Samofalova L.A. Application of Soy and Its Processed Products in the Processing and Food Industry. Biology in Agriculture. 2023. no. 3 (40). pp. 26–37. (in Russian).
2 Rani J., Kaur P., Chuwa C. Nutritional benefits of herbs and spices to the human beings. Annals of Phytomedicine: An International Journal. 2023. vol. 12. no. 1. pp. 187–197. doi: 10.54085/ap.2023.12.1.20.
3 Hot Spices Against Infections. Rospotrebnadzor. Center for Hygiene and Epidemiology of the Chelyabinsk Region, January 16, 2025. Available at: https://fbuz74.ru/about/news/4644/ (accessed: 08.11.2025) (in Russian).
4 Spicy Food. Pros and Cons. National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, November 7, 2025. Available at: https://gnicpm.ru/articles/zdorovyj-obraz-zhizni/ostraya-eda-za-i-protiv.html (accessed: 09.11.2025) (in Russian).
5 Chernova M.M., Maslakova A.A. Current Issues of Modern Breeding, Biotechnology and Botany. In: Current Issues of Modern Breeding, Biotechnology and Botany: Conference Proceedings. Moscow: RSAU, 2024. p. 250. (in Russian).
6 Tkacheva M.I. Dill and Parsley as a Biologically Active Food Supplement of Vitamin K. Endocrinology: News. Opinions. Training. 2022. no. 4 (41). pp. 132–135. (in Russian).
7 Eliseeva T., Tarantul A. Dill (lat. Anéthum). Journal of Healthy Nutrition and Dietetics. 2020. no. 12. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/ukrop-lat-an-thum (accessed: 23.10.2025) (in Russian).
8 Ibraeva M., Oztürk M. Phytochemical study of the composition of plants of the genus Thymus Serpyllum L. Yessenov Science Journal. 2024. vol. 47. no. 2. article 5. doi: 10.56525/ALET1432.
9 Timofeev N.P. Phytobiotics in World Practice: Plant Species and Active Ingredients, Efficiency and Limitations, Prospects (Review). Agricultural Science of the Euro-North-East. 2021. vol. 22. no. 6. pp. 804–825. doi: 10.30766/2072-9081.2021.22.6.804-825 (in Russian).
10 Dmitriev K.O., Bredikhin S.A., Nugmanov A.Kh.Kh., Osmolovsky P.D. Comparative Analysis of the Yield and Chemical Composition of Essential Oil from Coriander Seeds. Scientific Proceedings of Dalrybvtuz. 2025. vol. 74. no. 4. pp. 16–24. (in Russian).
11 Abbas A., Anwar F., Ahmad N. et al. Characterization of Bioactives and Nutra-Pharmaceutical Potential of Supercritical Fluid and Hydro-Distilled Extracted Coriander Leaves Essential Oil. Dose-Response. 2022. vol. 20. no. 4. article 15593258221130749. doi: 10.1177/15593258221130749.
12 Pakiyasoti E.V., Balachandran S., Jans E.R. Effect of storage (in small packages) on the essential oil and piperine contents of ground black pepper. Journal of the National Science Council of Sri Lanka. 1983. vol. 11. pp. 111–122.
13 Ashokkumar K., Murugan M., Dhanya M.K. et al. Phytochemistry and therapeutic potential of black pepper [Piper nigrum (L.)] essential oil and piperine: a review. Clinical Phytoscience. 2021. vol. 7. article 52. doi: 10.1186/s40816-021-00292-2.
14 Melnikova S.V. Spices. Biology. 2001. no. 11. pp. 1–4. (in Russian).
15 Schorr R.R., Ballesteros Garcia M.J., Petermann D. et al. Eugenol, isoeugenol, thymol, carvacrol, and ester derivatives as an ecofriendly option to control Glomerella leaf spot and bitter rot on apple. Plants. 2024. vol. 13. no. 22. article 3196. doi: 10.3390/plants13223196.
16 Wang W., Zhang Y., Yang Z., He Q. Effects of incorporation with clove (Eugenia caryophyllata) essential oil (CEO) on overall performance of chitosan as active coating. International Journal of Biological Macromolecules. 2021. vol. 166. pp. 578–586. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.10.221.
17 Pop D.M., Timar M.C., Varodi A.M., Beldean E.C. Evaluation of Clove (Eugenia caryophyllata) Essential Oil as a Potential Alternative Antifungal Wood Protection System for Cultural Heritage Conservation. Maderas: Ciencia y Tecnología. 2022. vol. 24. article 411. doi: 10.4067/S0718-221X2022000100411.
18 Temerdashev Z.A., Milevskaya V.V., Ryabokon L.P. et al. Identification and Determination of Components of Essential Oils of Salvia officinalis L. Extracted by Various Methods. Journal of Analytical Chemistry. 2020. vol. 75. no. 11. pp. 1030–1039. doi: 10.31857/S0044450220110138 (in Russian).
19 Issifu I., Deffor E.W., Deyshappriya N.P.R. et al. Drivers of seafood consumption at different geographical scales. Journal of Sustainability Research. 2022. vol. 4. no. 3. article e220016. doi: 10.20900/jsr20220016.
20 Baptista R.C., Horita K.N., Sant'Ana A.S. Natural products with preservatives for enhancing microbiological safety and extending shelf life of seafood: a review. Food Research International. 2020. vol. 127. article 108762. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108762.
21 Oedemi B.O., Kocia E.M., Stapleton P.D., Gibbons S. Capsaicin and gingerol analogs inhibit the growth of efflux-resistant bacteria and the conjugative transfer of R-plasmids. Journal of Ethnopharmacology. 2019. vol. 245. article 111871. doi: 10.1016/j.jep.2019.111871.
22 Wang H., Yu L., Li F. et al. Synthesis of capsaicin-containing amide derivatives and their antioxidant and antibacterial activities. Journal of Food Biochemistry. 2019. vol. 43. no. 12. article e13061. doi: 10.1111/jfbc.13061.
23 Füchtbauer S., Mousavi S., Bereswill S., Heimesaat M.M. Antibacterial properties of capsaicin and its derivatives and their potential to fight antibiotic resistance – A literature survey. European Journal of Microbiology and Immunology. 2021. vol. 11. no. 1. pp. 10–17. doi: 10.1556/1886.2021.00003.
24 Rakhmonov K.S., Barakaev N.R. Influence of Spicy-Aromatic Plants on the Microbiological Stability of Bread During Storage. Universum: Technical Sciences. 2025. no. 5 (134). Available at: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20114 (accessed: 25.01.2026) (in Russian).
25 Mujovic M., Sojić B., Peulić T. et al. Effect of dill (Anethum graveolens) essential oil and lipid extracts as novel antioxidants and antimicrobials on beef hamburger quality. Foods. 2024. vol. 13. no. 6. article 896. doi: 10.3390/foods13060896.
26 Blundell R., Shah M.A., Azzopardi J.I. et al. Butylated hydroxytoluene. In: Antioxidant Effects on Health: The Light and the Dark Side. Amsterdam: Elsevier, 2022. pp. 195–200. doi: 10.1016/B978-0-12-819096-8.00038-0.

27 Tayel A., Hassanin F.S., Edris S.N. et al. Preservative Potential of Anethum graveolens Essential Oil on Fish Fillet Quality and Shelf Life During Refrigerated Storage. Foods. 2025. vol. 14. no. 9. article 1591. doi: 10.3390/foods14091591.

28 Šojić B., Milošević S., Savanović D. et al. Isolation, bioactive potential, and application of terpenoid-rich essential oils and extracts as effective antioxidant and antimicrobial agents in meat and meat products. Molecules. 2023. vol. 28. no. 5. article 2293. doi: 10.3390/molecules28052293.

29 Eshaghi R., Mohsenzadeh M., Ayala-Zavala J.F. Bionanocomposite active packaging films based on carboxymethyl cellulose, myrrh gum, TiO_2 nanoparticles, and dill essential oil for preserving the fresh meat quality of fish (Cyprinus carpio). International Journal of Biological Macromolecules. 2024. vol. 263. article 129991. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129991.

30 Butova S.V., Shakhova M.N., Vorontsov V.V., Korolkova N.V. Study of Some Biologically Active Substances with Antioxidant Activity in Spicy-Aromatic Plants. In: Production and Processing of Agricultural Products: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Voronezh, November 23–25, 2022. Voronezh: Voronezh State Agricultural University, 2022. pp. 169–177. (in Russian).

31 Collection of Recipes for Dishes and Culinary Products for Public Catering Establishments. Saint Petersburg: PROFIX, 2003. 408 p. (in Russian).

32 USDA SR27. Available at: http://1cp.ru/sr27/ (accessed: 25.03.2026) (in Russian).

33 Karpukhina V. Healing Spices. Seasonings. Condiments. For 100 Diseases. Moscow: AST, 2014. 256 p. (in Russian).

34 Matison V.A., Arutyunova N.I., Goryacheva E.D. Application of the Descriptive-Profile Method for Assessing the Quality of Food Products. Food Industry. 2015. no. 5. pp. 52–59. (in Russian).

35 Mohammadi S., Sahari M.A., Mehdipour Biregani Z. Combination effects of potassium lactate and sodium diacetate on the chemical and microbial attributes of hamburger during the frozen storage. Journal of Food and Bioprocess Engineering. 2023. vol. 6. no. 1. pp. 26–33.

Сведения об авторах

Анна Т. Васюкова д.т.н., профессор, кафедра биотехнологий и продовольственной безопасности, Российский государственный университет народного хозяйства имени В.И. Вернадского, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50, Балашиха, Московская область, 143907, Россия, vasyukova-at@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-7374-4145

Константин В. Кривошонок врач, Центр гигиенического образования населения Роспотребнадзора, 1 й Смоленский переулок, дом 9, стр. 1, Москва, 121099, Россия, krivoshonok@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-6360-6964

Анатолий Р. Эдварс аспирант, кафедра индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Российский биотехнологический университет, ул. Волоколамское шоссе, д. 11, Москва, 125080, Россия, aedvars@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0005-8778-717X

Николай М. Портнов научный сотрудник, Федеральный центр мониторинга питания обучающихся, ул. Радио, д. 10А, г. Москва, 105005, Россия, detsoft@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9520-8928

Валерий И. Карпов д.т.н., профессор, Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, Научный городок, корпус 1, Лобня, Московская обл., 141055, Россия, belenokaleksis@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0422-4936

Алексей И. Беленков д.с/х.н., профессор, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, vikarp@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6338-0467

Information about authors

Anna T. Vasyukova Dr. Sci. (Engin.), professor, biotechnology and food security department, Vernadsky Russian State University of National Economy, 50 Shosse Entuziastov, Balashikha, Moscow Region, 143907, Russia, vasyukova-at@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-7374-4145

Konstantin V. Krivoshonok physician, center for hygienic education of the population of rospotrebnadzor, 1st Smolensky Lane, Building 9, Building 1, Moscow, 121099, Russia, krivoshonok@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-6360-6964

Anatoly R. Edwards Cand. Sci. (Econ.), engineer, food, hotel and service industries department, Russian Biotechnology University, Volokolamskoe Shosse St., 11, Moscow, 125080, Russia, aedvars@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0005-8778-717X

Nikolay M. Portnov Researcher, federal center for monitoring student nutrition, 10A Radio St., Moscow, 105005, Russia, detsoft@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9520-8928

Valery I. Karpov Dr. Sci. (Engin.), professor, Federal Scientific Center for Forage Production and Agroecology named after V.R. Williams, Science City, Building 1, Lobnya, Moscow Region, 141055, Russia, belenokaleksis@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0422-4936

Alexey I. Belenkov Dr. Sci. (Agric.), professor, Moscow State University of Technology and Management. K.G. Razumovsky, st. Zemlyanoy Val, 73, Moscow, 109004, Russia, vikarp@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6338-0467

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/01/2026	**После редакции** 18/01/2026	**Принята в печать** 10/02/2026

Received 11/01/2026	**Accepted in revised** 18/01/2026	**Accepted** 10/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-77-84 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.655.016 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Влияние процесса прогрева при выпечке пшенично-тритикалевых полуфабрикатов высокой степени готовности на качество хлеба

Александр В. Быков [1] bykov@mgupp.ru 0000-0002-5480-4237
Наталья В. Лабутина [1] labutina@mgupp.ru 0000-0002-9810-8516
Элла О. Герасимова [1] gerasimovaeo@mgupp.ru 0000-0003-2714-4306
Наталья С. Быкова [1] anikina02@list.ru 0009-0006-9301-6862

1 Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия

Аннотация. Использование замороженных полуфабрикатов высокой степени готовности в производстве хлеба и хлебобулочных изделий формирует одно из приоритетных и стратегически значимых направлений устойчивого развития современной хлебопекарной промышленности, с учетом производственных, логистических и экономических факторов. Применение данной технологии обеспечивает высокую операционную гибкость производственных мощностей различного масштаба, позволяя своевременно пополнять ассортимент продукции в соответствии с динамикой рыночного спроса. Заключительным этапом, определяющим качество хлеба из полуфабрикатов высокой степени готовности, является выпечка. Во время выпечки протекает совокупность взаимосвязанных теплофизических и биохимических процессов. Однако научная база, описывающая процесс прогрева и определяющая рациональные параметры выпечки полуфабрикатов высокой степени готовности, остается неполной и требует систематического подхода. В работе представлены результаты экспериментального исследования, направленного на изучение влияния различных соотношений пшеничной и тритикалевой муки в помольной смеси на температурные режимы внутренних слоев при выпечке пшенично-тритикалевого хлеба из полуфабрикатов высокой степени готовности. Были установлены начало и продолжительность теплофизических процессов, в ходе которых происходит формирование мякиша и образование корки. Для определения качества пшенично-тритикалевого хлеба полученные полуфабрикаты допекали в течение 5 минут при температуре (230 ± 5) °С. Осуществлен анализ полученных образцов пшенично-тритикалевого хлеба по органолептическим и физико-химическим показателям. В результате исследований установлено, что соотношение пшеничной и тритикалевой муки в помольной смеси 50/50 является оптимальным для получения готового хлеба высокого качества.

Ключевые слова: полуфабрикаты высокой степени готовности, пшенично-тритикалевый хлеб, процесс прогрева, теплофизические процессы, качество хлеба.

The effect of the heating process on the quality of high-grade wheat-triticale semi-finished products during baking

Alexander V. Bykov [1] bykov@mgupp.ru 0000-0002-5480-4237
Natalia V. Labutina [1] labutina@mgupp.ru 0000-0002-9810-8516
Ella O. Gerasimova [1] gerasimovaeo@mgupp.ru 0000-0003-2714-4306
Natalia S. Bykova [1] anikina02@list.ru 0009-0006-9301-6862

1 Russian Biotechnological University, Volokolamskoe Shosse, 11 Moscow, 125080, Russia

Abstract. The use of frozen semi-finished products with a high degree of readiness in the production of bread and bakery products forms one of the priority and strategically significant directions for the sustainable development of the modern bakery industry, taking into account production, logistical and economic factors. The use of this technology provides high operational flexibility of production facilities of various scales, allowing timely replenishment of the product range in accordance with the dynamics of market demand. The final stage that determines the quality of bread from semi-finished products of a high degree of readiness is baking. A set of interrelated thermophysical and biochemical processes takes place during baking. However, the scientific base describing the heating process and determining the rational parameters of baking semi-finished products with a high degree of readiness remains incomplete and requires a systematic approach. The paper presents the results of an experimental study aimed at studying the effect of different ratios of wheat and triticale flour in a grinding mixture on the temperature conditions of the inner layers when baking wheat-triticale bread from semi-finished products with a high degree of readiness. The beginning and duration of thermophysical processes, during which crumb formation and crust formation occur, were established. To determine the quality of wheat-triticale bread, the obtained semi-finished products were baked for 5 minutes at a temperature of (230 ± 5) ° C. The analysis of the obtained wheat-triticale bread samples according to organoleptic and physico-chemical parameters was carried out. Research has shown that a 50/50 ratio of wheat and triticale flour in the grinding mixture is the most optimal for producing high-quality bread.

Keywords: high-grade semi-finished products, wheat-triticale bread, heating process, thermophysical processes, bread quality.

Для цитирования
Быков А.В., Лабутина Н.В., Герасимова Э.О., Быкова Н.С. Влияние процесса прогрева при выпечке пшенично-тритикалевых полуфабрикатов высокой степени готовности на качество хлеба // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 77–84. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-77-84

For citation
Bykov A.V., Labutina N.V., Gerasimova E.O., Bykova N.S. The effect of the heating process on the quality of high-grade wheat-triticale semi-finished products during baking. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 77–84. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-77-84

© 2026, Быков А.В. и др. / Bykov A.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В настоящее время в России большой популярностью пользуется технология производства хлеба и хлебобулочных изделий из замороженных полуфабрикатов высокой степени готовности. Использование зерна из озимой тритикале способствует расширению ассортимента, а также повышению пищевой ценности готовых изделий. Помимо этого, полученная мука из зерна озимой тритикале оказывает положительное влияние при криоструктурировании полуфабрикатов высокой степени готовности. Ключевым элементом реализации данной технологии является этап выпечки, в результате которого формируются реологические свойства теста и в значительной степени определяются показатели качества готового изделия [1, 3, 8, 10]. Целью исследований является определение рациональных параметров выпечки пшенично-тритикалевого хлеба из замороженных полуфабрикатов высокой степени готовности. Реализация поставленной цели предусматривала решение комплекса задач, направленных на изучение влияния продолжительности выпечки на закономерности прогрева полуфабрикатов, предназначенных для замораживания.

Материалы и методы

Для изучения процесса прогрева пшенично-тритикалевых полуфабрикатов высокой степени готовности были выполнены пробные лабораторные выпечки, при различных соотношениях пшеничной и тритикалевой муки в помольных смесях. Экспериментальные исследования проводили при одностадийной выпечке образцов пшенично-тритикалевого хлеба при температуре (230 ± 5) °С. В качестве объектов исследования использовали тестовые заготовки, приготовленные из помольных смесей с различным соотношением пшеничной и тритикалевой муки – 50/50, 60/40, 70/30 и 80/20. В качестве контрольных образцов исследовали пробы, изготовленные соответственно из пшеничной муки (контроль 1) и тритикалевой муки (контроль 2). Регистрацию температуры выпекаемых тестовых заготовок осуществляли с применением термопар. Полученные образцы хлеба анализировали по органолептическим и физико-химическим показателям в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Результаты

Для характеристики процесса прогрева при выпечке пшенично-тритикалевых полуфабрикатов высокой степени готовности фиксировали изменения температуры в различных слоях выпекаемых полуфабрикатов, предназначенных для последующего замораживания. На основании полученных данных были построены графические зависимости, позволяющие установить начало и продолжительность теплофизических процессов, сопровождающихся формированием мякиша и образованием корки [5, 6, 9].

На рисунках 1 и 2 представлены графики изменения температуры при выпечке контроля 1 и контроля 2 соответственно.

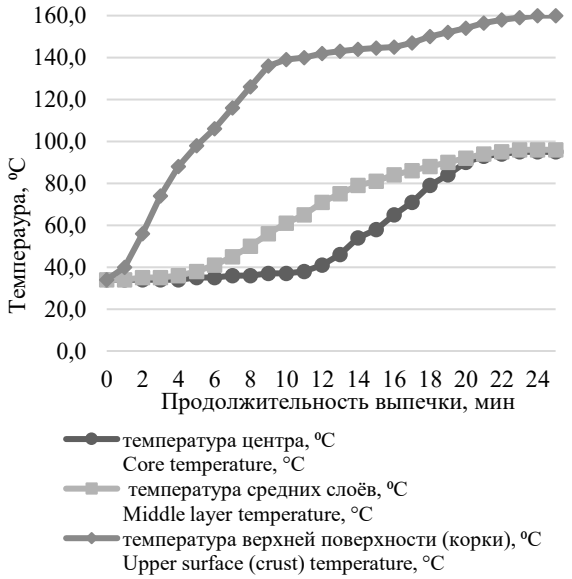


Рисунок 1. Изменение температуры от продолжительности выпечки пшеничного хлеба

Figure 1. Temperature changes from the duration of baking wheat bread

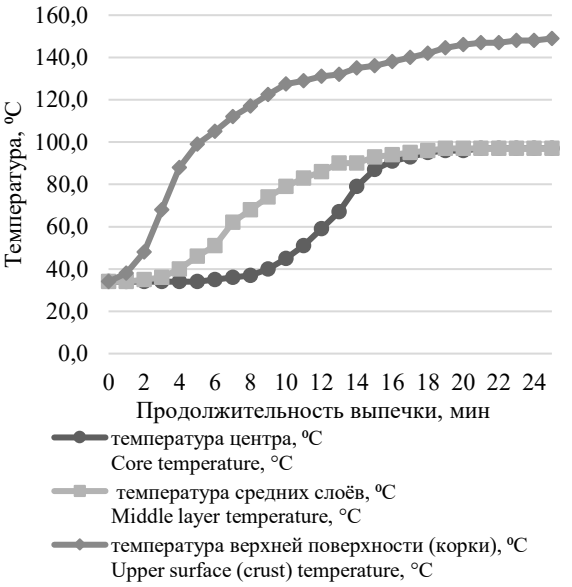


Рисунок 2. Изменение температуры от продолжительности выпечки тритикалевого хлеба

Figure 2. Temperature changes due to the baking time of triticale bread

В процессе выпечки наблюдается незначительное отличие скорости прогрева контрольных образцов. Происходит увеличение продолжительности наступления момента образования корки у образца из муки тритикале примерно на 1 минуту. Это влияет на момент уравнивания температуры внутренних слоев, который также наступает у образца из муки тритикале на 1–1,5 минуты позже. В целом процесс прогрева протекает одинаково.

На рисунках 3, 4, 5, 6 представлены температурные кривые, отражающие изменение температуры в ходе выпечки пшенично-тритикалевых полуфабрикатов при различных соотношения пшенично-тритикалевой муки в помольных смесях. Анализ полученных данных показал, что изменение соотношения не оказывает значимого влияния на продолжительность теплофизических процессов, происходящих при выпечке.

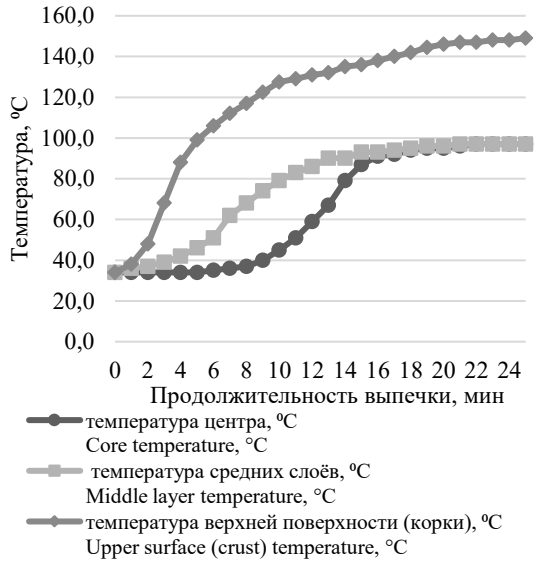


Рисунок 3. Изменение температуры от продолжительности выпечки пшенично-тритикалевого хлеба при соотношениях муки в помольных смесях 80/20

Figure 3. Temperature change from the baking time of wheat-triticale bread at flour ratios in grinding mixtures of 80/20

Начало момента достижения температуры верхней поверхности 100 °С, у рассматриваемых образцов наступает почти одновременно, с разницей у образцов с соотношением муки 80/20 и 50/50 не более 1 минуты. Температура внутренних слоев уравнивается на 20–21 минуте и достигает 95–96 °С. Для обеспечения высокого качества полуфабрикатов, предназначенных для замораживания, выпечку целесообразно завершать на 23–24 минуте, при условии стабилизации температуры во внутренних слоях изделия в течение 2–3 минут [5, 6, 9].

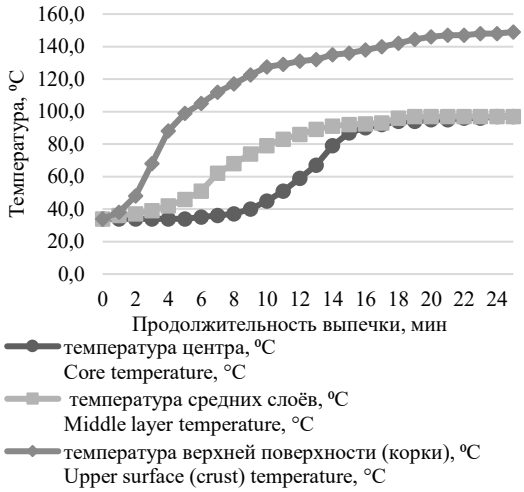


Рисунок 4. Изменение температуры от продолжительности выпечки пшенично-тритикалевого хлеба при соотношениях муки в помольных смесях 70/30

Figure 4. Temperature change from the baking time of wheat-triticale bread at flour ratios in grinding mixtures of 70/30

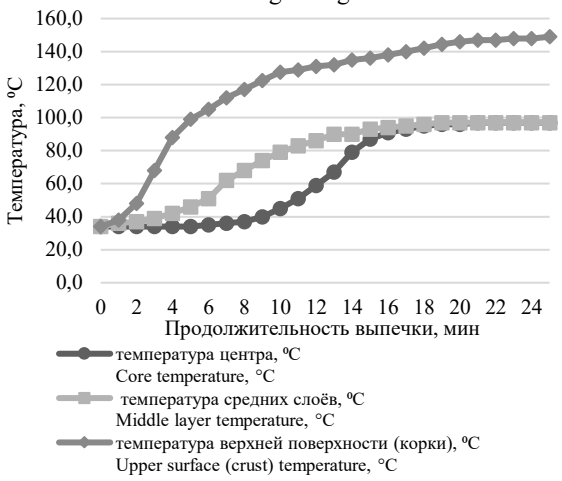


Рисунок 5. Изменение температуры от продолжительности выпечки пшенично-тритикалевого хлеба при соотношениях муки в помольных смесях 60/40

Figure 5. Temperature change from the baking time of wheat-triticale bread at flour ratios in grinding mixtures of 60/40

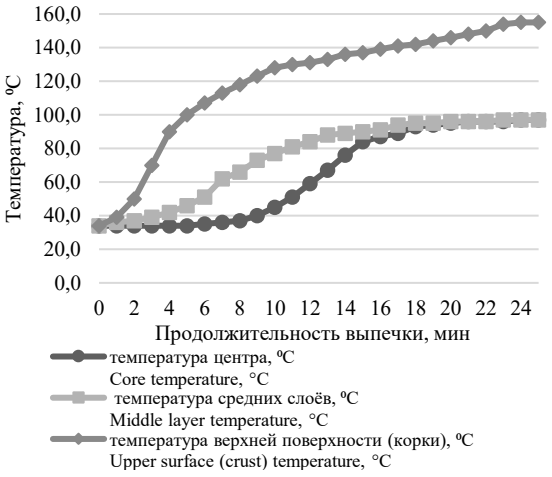


Рисунок 6. Изменение температуры от продолжительности выпечки пшенично-тритикалевого хлеба при соотношениях муки в помольных смесях 50/50

Figure 6. Temperature change from the baking time of wheat-triticale bread at flour ratios in grinding mixtures of 50/50

Таблица 1.

Скорости изменения температуры от продолжительности выпечки

Table 1.

The rate of temperature change from the duration of baking

Наименование исследуемого слоя, °С / мин Name of the studied layer, °С / min	Контроль 1 (из пшеничной муки) Control 1 (from wheat flour)	Контроль 2 (из тритикалевой муки) Control 2 (from triticale flour)	80/20	70/30	60/40	50/50
Верхняя поверхность (корка) Upper surface (crust)	2,5	2,2	2,5	2,5	2,5	2,5
Средние слои Middle layers	3,5	4,5	2,5	3,4	3,4	3,4
Центральные слои Central layers	7,4	3,2	7,4	7,4	7,4	6,9

По графикам изменения температуры от продолжительности выпечки были определены скорости роста температуры после момента начала образования корки до момента уравнивания температуры внутренних слоев путем линейной аппроксимации. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунках 6, 7, 8, 9, 10, 11.

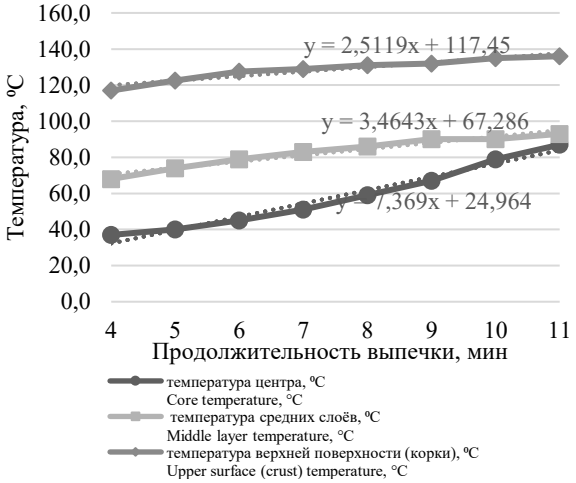


Рисунок 7. Изменение скорости роста температуры пшеничного хлеба

Figure 7. Change in the rate of temperature increase of wheat bread

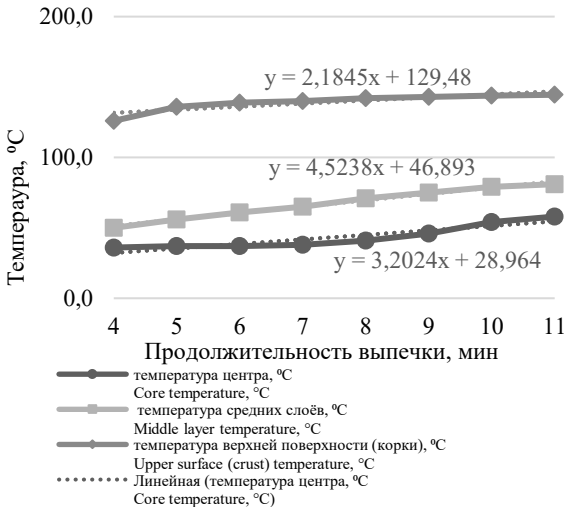


Рисунок 8. Изменение скорости роста температуры тритикалевого хлеба

Figure 8. Change in the rate of temperature increase of triticale bread



Рисунок 9. Изменение скорости роста температуры пшенично-тритикалевого хлеба при соотношениях муки в помольных смесях 80/20

Figure 9. Change in the rate of temperature increase of wheat-triticale bread at flour ratios in grinding mixtures of 80/20

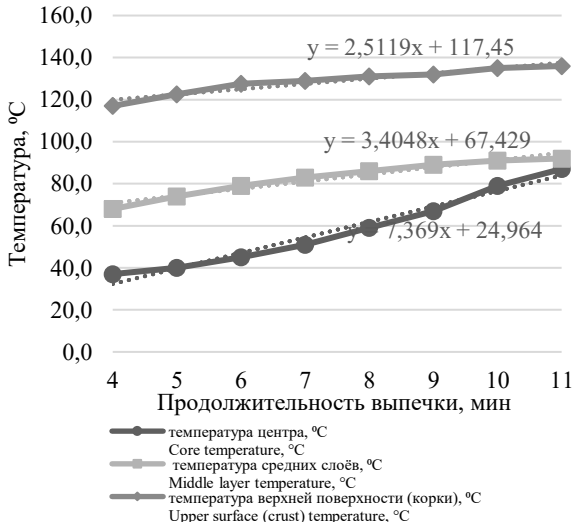


Рисунок 10. Изменение скорости роста температуры пшенично-тритикалевого хлеба при соотношениях муки в помольных смесях 70/30

Figure 10. Change in the rate of temperature increase of wheat-triticale bread at flour ratios in grinding mixtures of 70/30

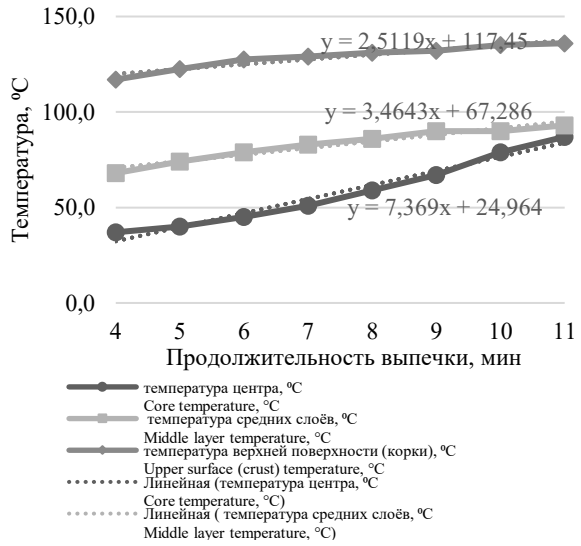


Рисунок 11. Изменение скорости роста температуры пшенично-тритикалевого хлеба при соотношениях муки в помольных смесях 60/40

Figure 11. Change in the rate of temperature increase of wheat-triticale bread at flour ratios in grinding mixtures of 60/40

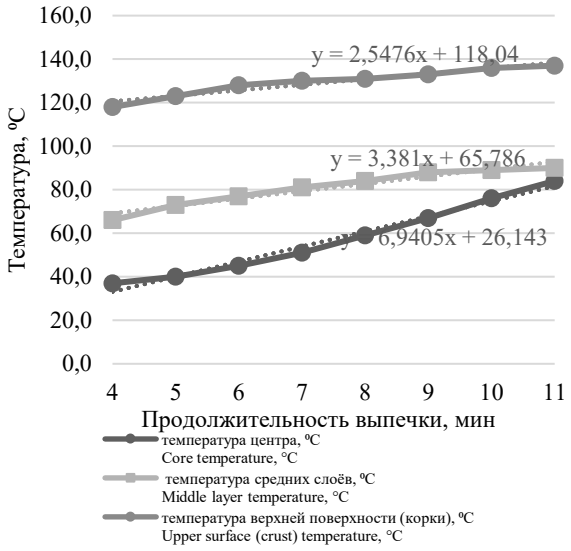


Рисунок 12. Изменение скорости роста температуры пшенично-тритикалевого хлеба при соотношениях муки в помольных смесях 50/50

Figure 12. Change in the rate of temperature increase of wheat-triticale bread with flour ratios in grinding mixtures of 50/50

Полученные результаты позволили сделать вывод, что изменение соотношения пшеничной и тритикалевой муки в помольных смесях оказывает минимальное влияние на продолжительность процесса выпечки.

Для определения качества пшенично-тритикалевого хлеба после размораживания допекали полуфабрикаты в течение 5 минут при температуре (230 ± 5) °С. Данные по влиянию различного количества тритикалевой муки на органолептические и физико-химические показатели качества хлеба представлены на рисунке 12 и в таблице 2.

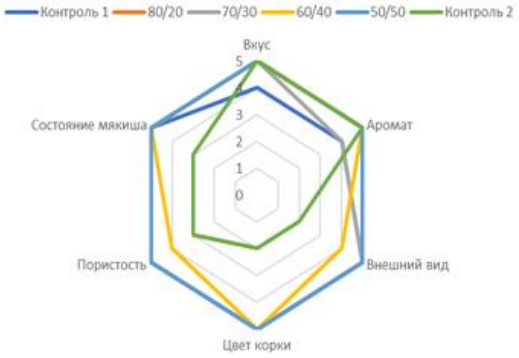


Рисунок 13. Органолептические показатели качества пшенично-тритикалевого хлеба

Figure 13. Organoleptic quality indicators of wheat-triticale bread

Образцы хлеба, полученные из пшеничной муки, а также из пшенично-тритикалевых помольных смесей при всех исследуемых соотношениях, характеризовались правильной формой и ровной поверхностью без признаков подрывов и трещин. Корка имела равномерную золотисто-коричневую окраску. Мякиш отличался однородным цветом, без визуальных признаков непромеса. Пористость исследуемых образцов была равномерной, при этом преобладали поры мелкого и среднего размера. Образцы хлеба, полученные из тритикалевой муки, существенно отличались по органолептическим показателям. Изделие соответствовало форме используемой для выпечки, однако не характеризовалось выраженной выпуклостью корки. На поверхности отсутствовали трещины и подрывы, при этом отмечалось наличие пузырей. Корка имела серовато-коричневую окраску, а мякиш был полностью пропечённым и эластичным, без следов непромеса, при этом пористость отличалась крупными и неравномерно распределёнными порами [4].

Установлены закономерности изменения органолептических и физико-химических показателей качества хлеба в зависимости от соотношения пшеничной и тритикалевой муки в помольных смесях. Полученные результаты показывают, что применение тритикалевой муки в количестве от 20 до 50% способствует улучшению показателей качества хлеба. Удельный объём и пористость оставались практически неизменными по сравнению с контролем.

Следует отметить, что при этом происходило улучшение органолептических показателей хлеба. Хлеб с добавлением тритикалевой муки имел более выраженный вкус и аромат, лучшую разжёвываемость мякиша.

Таблица 2.

Физико-химические показатели качества пшенично-тритикалевого хлеба

Table 2.

Physico-chemical quality indicators of wheat-triticale bread

Показатель Naming of the indicator	Контроль 1 (из пшеничной муки) Control 1 (made from wheat flour)	Контроль 2 (из тритикалевой муки) Control 2 (made from triticale flour)	80/20	70/30	60/40	50/50
Влажность, % Humidity, %	41,0	42,0	41,6	41,8	41,4	42,2
Кислотность, град Acidity, degree	3,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,2
Пористость, % Porosity, %	82,2	73,4	83,6	81,1	82,8	84,0
Удельный объём, $см^3/г$ Specific volume, cm3/g	3,35	2,56	3,63	3,52	3,48	3,62
Деформация общая, мм Total deformation, mm	26,94	9,33	18,91	16,58	23,75	20,38
Деформация пластическая, мм Plastic deformation, mm	18,29	6,07	12,34	11,44	17,90	15,01
Деформация упругая, мм Elastic deformation, mm	8,65	3,26	6,57	5,14	5,85	5,37

Заключение

Анализ полученных данных свидетельствует о влиянии соотношения пшеничной и тритикалевой муки в помольных смесях на физико-химические и органолептические показатели качества готового хлеба из замороженных полуфабрикатов высокой степени готовности. Установленные рациональные режимы прогрева в зависимости от температуры в пекарной камере позволяют прогнозировать качество готового хлеба. При проведении выпечки с применением установленных рациональных режимов процесса прогрева полуфабрикатов высокой степени готовности, наилучшими показателями обладали образцы хлеба с соотношением пшенично-тритикалевой муки в помольной смеси 50/50.

Литература

1 Быков А.В., Дубенко Е.И., Буздаков Д.Р. и др. Исследование процессов замораживания и размораживания при производстве хлеба из пшенично-тритикалевых полуфабрикатов высокой степени готовности: систематический обзор // Хлебопродукты. 2023. № 6. С. 30–37.

2 Быков А.В., Лабутина Н.В., Кузьмич М.А., Кузьмич Л.С. Исследование влияния свойств муки на качество пшенично-тритикалевого хлеба из замороженных полуфабрикатов // Хлебопродукты. 2024. № 11. С. 58–63.

3 Дранников А.В., Полянский К.К., Домбровская Я.П., Дерканосова А.А., Колесник М.С. Разработка технологии пшенично-тритикалевого хлеба, устойчивого к микробиологической порче // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 1. С. 56–62. doi: 10.20914/2310-1202-2024-1-56-62

4 Дулов М.И. Органолептические и физико-химические показатели качества хлеба из муки пшеничной первого сорта с применением муки для детского и диетического питания из биоактивированного зерна овса голозерного // Инновационное развитие науки и образования. 2019. С. 113–121.

5 Герасимова Э.О. Влияние добавления жировых продуктов растительного происхождения и муки из семян чиа на процесс прогрева при выпечке ржано-пшеничного формового хлеба из замороженных полуфабрикатов высокой степени готовности // Научные труды КубГТУ. 2019. С. 318–327.

6 Герасимова Э.О., Лабутина Н.В., Зудина Н.В., Козлов И.Д. Влияние режима выпечки на протекание теплофизических процессов при производстве ржано-пшеничного хлеба из полуфабрикатов высокой степени готовности // Пищевые технологии будущего: инновационные идеи, научный поиск, креативные решения. М.: Буки-Веди, 2019. С. 318–327.

7 Terentyev S.E., Labutina N.V. Features of technology for producing bread and bakery products from frozen semi-finished products // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 979. № 1. P. 012025. doi: 10.1088/1755-1315/979/1/012025

8 Kandrokov R.K., Antropov D.Y., Anurov A.N. The Use of Fruit and Berry Raw Materials in the Technology of Production of Bakery Products from Frozen Semi-Finished Products // Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. 2022. V. 44. № 3. P. 35509–35513. doi: 10.26717/BJSTR.2022.44.007043

9 Лялин А.В., Феськов О.А., Стрелюхина А.Н., Новикова Ж.В. Исследование параметров процесса замораживания тестовых заготовок и хлебобулочных изделий различной степени готовности // Хлебопечение России. 2024. Т. 68. № 1. С. 63–77.

10 Васильева Н.К., Мороз Н.Ю., Шевчук Д.С., Маркова М.С. Анализ рынка хлебобулочных изделий: региональный аспект // Вестник Академии знаний. 2025. № 1 (66). С. 114–120.

11 Алексюткина О.А., Савкин В.И. Современные проблемы и перспективы развития зернопродуктового подкомплекса: структурно-функциональная архитектура бизнес-процессов // Вестник аграрной науки. 2025. № 2 (113). С. 37–46.

12 Belyaev A.I., Pugacheva A.M., Taranova E.S. et al. The use of processed gourds products to improve properties of bakery products // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1052. № 1. P. 012007. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012007

13 Sadeghi A., Ebrahimi M., Assadpour E., Jafari S.M. Recent advances in probiotic breads; a market trend in the functional bakery products // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. V. 64. № 33. P. 13163–13174. doi: 10.1080/10408398.2023.2258205

14 Shikhova O., Golubeva S., Shilova I. et al. Analysis of market prospects for bakery products based on the ranking of bakery producers in the region // BIO Web of Conferences. 2022. V. 52. P. 00053. doi: 10.1051/bioconf/20225200053

15 Mesta-Corral M., Gómez-García R., Balagurusamy N. et al. Technological and Nutritional Aspects of Bread Production: An overview of current status and future challenges // Foods. 2024. V. 13. № 13. P. 2062. doi: 10.3390/foods13132062

16 Olakanmi S.J., Bharathi V.S., Jayas D.S., Paliwal J. Innovations in nondestructive assessment of baked products: Current trends and future prospects // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2024. V. 23. № 4. P. e13385. doi: 10.1111/1541-4337.13385

17 Siddiqui S.A., Mahmud M.C., Abdi G. et al. New alternatives from sustainable sources to wheat in bakery foods: Science, technology, and challenges // Journal of Food Biochemistry. 2022. V. 46. № 9. P. e14185. doi: 10.1111/jfbc.14185

18 Šmídová Z., Rysová J. Gluten-free bread and bakery products technology // Foods. 2022. V. 11. № 3. P. 480. doi: 10.3390/foods11030480

19 Terentyev S.E., Goncharova N.Z., Vorobeva E.S. High technologies for the therapeutic bread production with the use of triticale flour // AIP Conference Proceedings. 2022. V. 2661. № 1. P. 060002. doi: 10.1063/5.0107591

20 Kh K.R. Effects of triticale flour on the quality of honey cookies // Foods and Raw Materials. 2023. V. 11. № 2. P. 215–222. doi: 10.21603/2308-4057-2023-2-567

References

1 Bykov A.V., Dubenko E.I., Buzdakov D.R. et al. Study of Freezing and Thawing Processes in the Production of Bread from Wheat-Triticale Semi-Finished Products of High Readiness: A Systematic Review. Khleboprodukty. 2023. no. 6. pp. 30–37. (in Russian).

2 Bykov A.V., Labutina N.V., Kuzmich M.A., Kuzmich L.S. Study of the Influence of Flour Properties on the Quality of Wheat-Triticale Bread from Frozen Semi-Finished Products. Khleboprodukty. 2024. no. 11. pp. 58–63. (in Russian).

3 Drannikov A.V., Polyansky K.K., Dombrovskaya Ya.P., Derkanosova A.A., Kolesnik M.S. Development of Technology for Wheat-Triticale Bread Resistant to Microbiological Spoilage. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 1. pp. 56–62. doi: 10.20914/2310-1202-2024-1-56-62 (in Russian).

4 Dulov M.I. Organoleptic and Physico-Chemical Quality Indicators of Bread Made from First-Grade Wheat Flour with the Use of Flour for Baby and Dietary Nutrition from Bioactivated Naked Oat Grain. Innovative Development of Science and Education. 2019. pp. 113–121. (in Russian).

5 Gerasimova E.O. Influence of Adding Vegetable Fat Products and Chia Seed Flour on the Heating Process During Baking of Rye-Wheat Pan Bread from Frozen Semi-Finished Products of High Readiness. Scientific Works of KubSTU. 2019. pp. 318–327. (in Russian).

6 Gerasimova E.O., Labutina N.V., Zudina N.V., Kozlov I.D. Influence of Baking Mode on the Course of Thermophysical Processes in the Production of Rye-Wheat Bread from Semi-Finished Products of High Readiness. In: Food Technologies of the Future: Innovative Ideas, Scientific Search, Creative Solutions. Moscow: Buki-Vedi, 2019. pp. 318–327. (in Russian).

7 Terentyev S.E., Labutina N.V. Features of technology for producing bread and bakery products from frozen semi-finished products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. vol. 979. no. 1. article 012025. doi: 10.1088/1755-1315/979/1/012025.

8 Kandrokov R.K., Antropov D.Y., Anurov A.N. The Use of Fruit and Berry Raw Materials in the Technology of Production of Bakery Products from Frozen Semi-Finished Products. Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. 2022. vol. 44. no. 3. pp. 35509–35513. doi: 10.26717/BJSTR.2022.44.007043.

9 Lyalin A.V., Feskov O.A., Strelukhina A.N., Novikova Zh.V. Study of the Parameters of the Freezing Process of Dough Pieces and Bakery Products of Various Degrees of Readiness. Baking in Russia. 2024. vol. 68. no. 1. pp. 63–77. (in Russian).

10 Vasilyeva N.K., Moroz N.Yu., Shevchuk D.S., Markova M.S. Analysis of the Bakery Products Market: Regional Aspect. Bulletin of the Academy of Knowledge. 2025. no. 1 (66). pp. 114–120. (in Russian).

11 Aleksyutkina O.A., Savkin V.I. Modern Problems and Prospects for the Development of the Grain Products Subcomplex: Structural and Functional Architecture of Business Processes. Bulletin of Agrarian Science. 2025. no. 2 (113). pp. 37–46. (in Russian).

12 Belyaev A.I., Pugacheva A.M., Taranova E.S. et al. The use of processed gourds products to improve properties of bakery products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. vol. 1052. no. 1. article 012007. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012007.

13 Sadeghi A., Ebrahimi M., Assadpour E., Jafari S.M. Recent advances in probiotic breads; a market trend in the functional bakery products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. vol. 64. no. 33. pp. 13163–13174. doi: 10.1080/10408398.2023.2258205.

14 Shikhova O., Golubeva S., Shilova I. et al. Analysis of market prospects for bakery products based on the ranking of bakery producers in the region. BIO Web of Conferences. 2022. vol. 52. article 00053. doi: 10.1051/bioconf/20225200053.

15 Mesta-Corral M., Gómez-García R., Balagurusamy N. et al. Technological and Nutritional Aspects of Bread Production: An overview of current status and future challenges. Foods. 2024. vol. 13. no. 13. article 2062. doi: 10.3390/foods13132062.

16 Olakanmi S.J., Bharathi V.S., Jayas D.S., Paliwal J. Innovations in nondestructive assessment of baked products: Current trends and future prospects. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2024. vol. 23. no. 4. Article e13385. doi: 10.1111/1541-4337.13385.

17 Siddiqui S.A., Mahmud M.C., Abdi G. et al. New alternatives from sustainable sources to wheat in bakery foods: Science, technology, and challenges. Journal of Food Biochemistry. 2022. vol. 46. no. 9. article e14185. doi: 10.1111/jfbc.14185.

18 Šmídová Z., Rysová J. Gluten-free bread and bakery products technology. Foods. 2022. vol. 11. no. 3. article 480. doi: 10.3390/foods11030480.

19 Terentyev S.E., Goncharova N.Z., Vorobeva E.S. High technologies for the therapeutic bread production with the use of triticale flour. AIP Conference Proceedings. 2022. vol. 2661. no. 1. article 060002. doi: 10.1063/5.0107591.

20 Kh K.R. Effects of triticale flour on the quality of honey cookies. Foods and Raw Materials. 2023. vol. 11. no. 2. pp. 215–222. doi: 10.21603/2308-4057-2023-2-567.

Сведения об авторах

Александр В. Быков доцент, кафедра промышленной инженерии, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) , Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия, bykov@mgupp.ru
https://orcid.org/0000-0002-5480-4237

Наталья В. Лабутина д.т.н., профессор, зав. научно-исследовательской кафедры сквозных технологий хлеба и хлебобулочных изделий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия, labutina@mgupp.ru
https://orcid.org/0000-0002-9810-8516

Элла О. Герасимова к.т.н., и.о. зав. кафедрой физико-математических дисциплин, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия, gerasimovaeo@mgupp.ru
https://orcid.org/0000-0003-2714-4306

Наталья С. Быкова магистрант, кафедра пищевой безопасности, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия, anikina02@list.ru
https://orcid.org/0009-0006-9301-6862

Information about authors

Alexander V. Bykov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, industrial engineering department, Russian Biotechnological University, Volokolamskoe Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, bykov@mgupp.ru
https://orcid.org/0000-0002-5480-4237

Natalia V. Labutina Dr. Sci. (Engin.), professor, Head of the Research Department of End-to-end Technologies of bread and bakery Products, Russian Biotechnological University, Volokolamskoe Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, labutina@mgupp.ru
https://orcid.org/0000-0002-9810-8516

Ella O. Gerasimova Cand. Sci. (Engin.), Acting Head of the Department of Physico-mathematical Disciplines, Russian Biotechnological University, Volokolamskoe Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, gerasimovaeo@mgupp.ru
https://orcid.org/0000-0003-2714-4306

Natalia S. Bykova master's student, food safety department, Russian Biotechnological University, Volokolamskoe Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, anikina02@list.ru
https://orcid.org/0009-0006-9301-6862

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 13/01/2026 **После редакции** 26/01/2026 **Принята в печать** 17/02/2026

Received 13/01/2026 **Accepted in revised** 26/01/2026 **Accepted** 17/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-85-90 Оригинальная статья/Research article
УДК 347.7(346.548) Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

К вопросу о правовых аспектах пищевых нанотехнологий

Нана А. Хузина [1] na.huzina@mail.ru 0009-0006-2298-724X
Константин К. Полянский [1, 2] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466
Анна А. Дерканосова [2] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Александра И. Хузина [3] alyhuzina@mail.ru 0009-0000-8653-6815

1 Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса 67А, г. Воронеж, 394030, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
3 Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Россия

Аннотация. Нанотехнологии в пищевой промышленности представляют собой одно из наиболее перспективных и одновременно дискуссионных направлений развития отрасли, открывающее широкие возможности для повышения качества, безопасности и сохранности продуктов питания. В статье рассматриваются правовые аспекты применения нанотехнологий в пищевой промышленности, особое внимание уделяется вопросам использования наноупаковки и наноматериалов, контактирующих с пищевыми продуктами. Авторами проанализированы современные достижения в области создания активной, умной и антимикробной упаковки, приведены примеры отечественных и зарубежных разработок, включая применение наночастиц оксида меди, мембранных технологий и природных добавок, таких как экстракт бересты. В работе систематизированы преимущества использования наноупаковки: продление сроков годности, повышение уровня защиты от микробиологической порчи, оптимизация логистических процессов и снижение потерь продукции. На основе анализа научной литературы и нормативно-правовых источников выявлены ключевые проблемы, препятствующие широкому внедрению нанотехнологий в отечественную пищевую индустрию. К их числу авторы относят отсутствие специализированного законодательного регулирования, недостаточную разработанность методов стандартизации и сертификации наноматериалов, высокую стоимость производства, а также необходимость дополнительных исследований токсикологического воздействия наночастиц на организм человека и окружающую среду. Особое внимание уделено анализу действующей нормативной базы Евразийского экономического союза, в частности Техническому регламенту ТР ТС 005/2011 «О безопасности упаковки» и Методическим рекомендациям МР 1.2.0023-11, регламентирующим контроль наноматериалов в пищевой продукции. Обоснована необходимость принятия Федерального закона «О продовольственной безопасности Российской Федерации», который позволил бы создать целостную систему правового регулирования в данной сфере. Результаты исследования могут быть использованы при совершенствовании законодательства, а также в практической деятельности организаций, занимающихся разработкой и внедрением инновационных упаковочных материалов для пищевой промышленности.

Ключевые слова: нанотехнологии, наноупаковка, правовое регулирование, безопасность продуктов, технический регламент, продовольственная безопасность.

On the legal aspects of food nanotechnology

Nana A. Khuzina [1] na.huzina@mail.ru 0009-0006-2298-724X
Konstantin K. Polyansky [1, 2] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466
Anna A. Derkanosova [2] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Alexandra I. Khuzina [3] alyhuzina@mail.ru 0009-0000-8653-6815

1 Voronezh branch of the Plekhanov Russian University of Economics, Karl Marx 67A, Voronezh, 394030, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
3 Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Timiryazev 8, Voronezh, 394087, Russia

Abstract. Nanotechnology in the food industry represents one of the most promising and simultaneously controversial areas of industrial development, opening up broad opportunities for improving the quality, safety, and preservation of food products. The article examines the legal aspects of the application of nanotechnology in the food industry, with special attention paid to the use of nanopackaging and nanomaterials that come into contact with food products. The authors analyze current achievements in the development of active, smart, and antimicrobial packaging, providing examples of domestic and foreign developments, including the use of copper oxide nanoparticles, membrane technologies, and natural additives such as birch bark extract. The paper systematizes the advantages of using nanopackaging: extending shelf life, increasing protection against microbiological spoilage, optimizing logistics processes, and reducing product losses. Based on an analysis of scientific literature and regulatory sources, the authors identify key problems hindering the widespread implementation of nanotechnology in the domestic food industry. These include the lack of specialized legislative regulation, insufficient development of standardization and certification methods for nanomaterials, high production costs, and the need for additional research into the toxicological effects of nanoparticles on human health and the environment. Particular attention is paid to the analysis of the current regulatory framework of the Eurasian Economic Union, in particular Technical Regulation TR CU 005/2011 "On Packaging Safety" and Methodological Recommendations MR 1.2.0023-11, which regulate the control of nanomaterials in food products. The necessity of adopting a Federal Law "On Food Security of the Russian Federation" is substantiated, which would create a comprehensive system of legal regulation in this area. The results of the study can be used in improving legislation, as well as in the practical activities of organizations involved in the development and implementation of innovative packaging materials for the food industry.)

Keywords: nanotechnology, nanopackaging, legal regulation, food safety, technical regulation, food security.

Для цитирования
Хузина Н.А., Полянский К.К., Дерканосова А.А., Хузина А.И. К вопросу о правовых аспектах пищевых нанотехнологий // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 85–90. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-85-90

For citation
Khuzina N.A., Polyansky K.K., Derkanosova A.A., Khuzina A.I. On the legal aspects of food nanotechnology. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 85–90. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-85-90

© 2026, Хузина Н.А. и др. / Khuzina N.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Нанотехнологии, если говорить более доступными для понимания словами, это «наука о малом» – манипулирование отдельными атомами и молекулами для получения новых материалов, лекарств, электроники и других объектов с заданными свойствами для улучшения качества жизни. Пищевые нанотехнологии – это использование материалов и процессов на атомно-молекулярном уровне для улучшения качества продуктов, их упаковки, безопасности и срока годности, включая создание «умных» упаковок, «нано» – добавок для вкуса и питательных веществ, а также нанокапсулирование для лучшей доставки витаминов. Что касается умных упаковок их еще именуют нанокомпозитами (например, с наноглиной), которые улучшают барьерные свойства, не давая кислороду проникать внутрь и газам выходить наружу, продлевая свежесть напитков и продуктов.

На самом деле уже не одно столетие используются нанотехнологии в пищевой отрасли. «Первые публикации относительно нанотехнологий в пищевых отраслях появились в конце XX – начале XXI вв. На мировом рынке имеются пищевые продукты с маркировкой «нано». Однако в учебных источниках по товароведению и экспертизе продовольственных товаров, в производственных технологиях не имеется информации о применении нанотехнологий в пищевой промышленности и свойствах продуктов, полученных с их применением» [1].

Например, в отечественной пищевой промышленности долгое время ведутся активные исследования по созданию пилотных установок, на которых осуществляется отработка технологии производства творожных продуктов взамен традиционной [2]. Отметим, что ряд отечественных ученых, таких как, В.В. Литвяк, А.А. Копыльцов, В.В. Ананских, В.А. Лялин, М.С. Золотарева, И.А. Евдокимов, О.Б. Федотова, Б.В. Чаблин и другие, внесли значительный вклад в исследование применения нанотехнологий в пищевой промышленности.

Функциональность нанопродуктов очень разнообразна. Нанокапсулы способны доставлять потребляемые лекарства к тем органам, которые в этом больше всего нуждаются. Уже сегодня разработчики указывают на наносенсоры, которые потребителю говорят, когда еда пришла в негодность. А вот нанофильтры способны выводить из молочной продукции микроорганизмы. Нанопродукты могут предоставлять питательные вещества прямо в клетку, чего невозможно достичь с привычной едой.

Создание продуктов с включением наночастиц распространено во многих странах, при этом производители могут не указывать такую информацию в перечне ингредиентов. Ведь закона, обязывающего прописывать наличие наночастиц, пока нет. Поскольку вопрос использования наночастиц в продуктах питания остается открытым, ученые сосредоточились на создании наноупаковок. Компания по изготовлению пива из Британии SUBMiller, которая производит пластик для бутылок, использует для этого материала наночастицы. Таким образом, частички заполняют между молекулами все имеющееся пространство, не давая кислороду проникнуть, а диоксиду углерода выйти из бутылки. Пиво в итоге дольше хранится, сохраняя при этом вкус и аромат [3].

Среди стран, на потребительском рынке которых имеются продукты с маркировкой «нано», лидируют США (126 наименований), далее следует продукция компаний Азиаткого региона (42) и Европы (35), продукция всех остальных стран представлена только 7 наименованиями. По количеству патентов в данной области-КНР и Южная Корея [4].

Одним из ведущих направлений применения нанотехнологий в пищевой промышленности, наряду с безопасностью и качеством продуктов, является упаковка и сохранение продуктов. К преимуществам и выгодам наноупаковки относятся: продление срока годности, повышения безопасности, оптимизация транспортировки и хранение. Данные преимущества достигаются за счет тех материалов, из которых изготовлены наноупаковки. Например, нанопокрытия и нанокомпозиты используются для увеличения сроков хранения, антибактериальной защиты (покрытия включают серебро, диоксид титана, керамические добавки), антимикробные добавки используются для борьбы с бактериями и грибками.

В научной литературе часто используются такие термины как «Активная упаковка», «Умная упаковка», «Антимикробная упаковка», на наш взгляд, все перечисленное относится к наноупаковкам. Например, отмечается, что антимикробная упаковка состоит из материалов, которые содержат в ее структуре или покрытии вещества с антимикробной «активностью» (натуральные и синтетические) – т. е. органические кислоты (сорбиновая, янтарная), эфирные масла, наноагенты (например, серебро), бактериоцидные пептиды (нисины), ферменты и пр. [5]

В то же время, необходимо отметить исследования выдающихся Российских ученых в области инновационных разработок в пищевой промышленности, в частности упаковки.

В литературе отмечается, что одним из инновационных способов влияния на безопасность продуктов питания является ввод в упаковочный материал добавок, обладающих антимикробной и антиоксидантной активностью. Это позволяет обеспечить дополнительную защиту от микробиологического риска за счет снижения роста поверхностной микрофлоры. Авторы предлагают наиболее перспективные для повсеместного распространения природные добавки, вызывающие особый интерес в связи с их высокой функциональностью и доступностью. В рамках исследовательских работ по изучению возможности получения полимерных изделий с антибактериальными свойствами, проводимых в ГНУ ВНИМИ Россельхозакадемии (ныне РАН), в качестве природной добавки для упаковочных материалов было предложено использование экстракта бересты [6].

В то же время наноупаковка, как и обычная упаковка продукта, нуждается в цифровизации. В конечном итоге потребитель четко будет иметь представления не только о содержимом продукте, но и какие материалы используются для хранения. Тем более, что концептуальные подходы к системе качества продуктов на основе цифровых технологий в настоящий момент являются серьезной темой для обсуждения в научной литературе [7].

Умная упаковка – это прекрасная возможность для покупателя получить достоверную информацию о приобретаемом продукте непосредственно в торговых точках. Посредством специального мобильного приложения, установленного на смартфон, можно просмотреть все до мелочей: в каком регионе был собран урожай, в каких условиях выращен, где переработан [8].

Использование наноупаковки в пищевой промышленности стремительно набирает обороты, обещая улучшение качества и безопасности продуктов, сокращение потерь и экологическую устойчивость. Несмотря на существующие трудности, индустрия ожидает значительный рост в ближайшие годы, особенно в сегменте активной и интеллектуальной упаковки.

В настоящее время в России имеются определенные достижения в данной области. Упаковку для пищевой промышленности, которая обладает бактерицидными и антигрибковыми свойствами, создали ученые СКФУ. По их словам, это стало возможно благодаря новому способу синтеза наночастиц оксида меди. Эта разработка позволит добиться увеличения срока хранения продуктов. Результаты исследования опубликованы в Scientific Reports. Оксид меди (CuO) – это полупроводник, который обладает рядом полезных свойств: высокотемпературной сверхпроводимостью, спиновой динамикой и корреляционными эффектами. [9].

Примером использования мембранной технологии является комплексная переработка молочной сыворотки и обезжиренного молока (ПАО Молочный комбинат «Воронежский», Молочный комбинат «Ставропольский»). Упаковочные материалы также подвергаются дополнительным исследованиям на токсичность (ВНИМИ), в связи с проникновением наночастиц в организм человека и отрицательного воздействия на него [10].

Таким образом в данном вопросе существуют проблемы и ограничения. При создании наноупаковок необходимо проводить тщательные исследования, чтобы убедиться, что наночастицы не наносят вреда окружающей среде и здоровью потребителя. Для таких исследований необходимы лаборатории, где также будут проводится тестирования и научные апробации. Например, на сегодняшний день используются методы электронной микроскопии, масс-спектрометрии, атомно-эмиссионной спектрометрии и другие физико-химические методы для выявления и количественного определения наноматериалов. Применение указанных методов осуществляется на основании инструкций и правил, действующих в соответствующих организациях.

Помимо этого, необходимо одобрение наноупаковки компетентными организациями на безопасность и соответствие санитарным нормам. Также надо учитывать тот факт, что производство наноупаковочных материалов обходится дороже стандартных аналогов, что ограничивает их массовое внедрение.

Для регулирования вопросов разработки и промышленных решений применения нанотехнологий в пищевой промышленности нужны серьезные правовые решения в виде законодательных актов. Поскольку любые вопросы пищевой промышленности – это здоровье нации, а нанотехнологии – будущее развитых и цивилизованных стран, то уже сегодня надо обратить внимание на регулирование таких вопросов как создание, тестирование, научная апробация и одобрение современных достижений в пищевой промышленности.

Правовые меры, обязывающие соблюдать четкие требования к пищевой продукции, к сырью для ее изготовления, к условиям ее создания, оборота и реализации, должны стать эффективными способами снижения рисков причинения вреда жизни или здоровью населения страны, повышению качества жизни и ее продолжительности [11].

Если говорить о правовом регулировании безопасности упаковки в пищевой промышленности, то необходимо отметить, что в единый

перечень продукции (товаров), подлежащей государственному санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) на таможенной границе и таможенной территории Евразийского экономического союза согласно п. 16. входят материалы, изделия и оборудование, контактирующие с пищевыми продуктами (в ред. решения Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 828, решения Совета Евразийской экономической комиссии от 02.12.2015 № 82) [12]. В тоже время, согласно указанному документу, в перечень продукции (товаров), подлежащей государственной регистрации не входят упаковки (упаковочные средства), предназначенные для контакта с пищевыми продуктами.

Технический регламент Таможенного союза 005/2011 «О безопасности упаковки» – это ключевой регламент ЕАЭС, устанавливающий обязательные требования безопасности ко всем видам упаковки (потребительской, транспортной, производственной), включая материалы и укупорочные средства, для защиты здоровья человека, окружающей среды и обеспечения свободного оборота на территории союза, подтверждение соответствия происходит через обязательное декларирование, а маркировка информирует о возможности переработки. Регламент актуален, не заменён и требует прохождения испытаний для подтверждения гигиенических, механических и химических показателей, особенно при контакте с пищевыми продуктами, детскими товарами и косметикой. Цель создания данного документа – обеспечить безопасность упаковки для здоровья, предотвратить обман потребителя и защитить природу, разрешая свободное обращение упаковки в ЕАЭС.

В указанном нормативном акте определены требования к безопасности упаковки. К ним относим: а) санитарно-гигиенические – важны для упаковки, контактирующей с пищевыми продуктами, косметикой, детскими товарами (недопустимо использование вторичного сырья для детского питания); б) физико-механические – герметичность, прочность, химическая стойкость, устойчивость к перепадам температур; в) безопасное вскрытие.

Технический регламент включает и потенциально наносодержащие материалы. Регулирует безопасность материалов по их химическим свойствам, механической стойкости, герметичности, проницаемости и экологической безопасности (утилизируемости), а не конкретно наночастицы. Вопросы нанотехнологий в упаковке регулируются другими, более специализированными документами и стандартами, например, ТР ТС 005/2011 требует подтверждения безопасности материалов в контакте с пищевыми продуктами, что автоматически затрагивает и новые материалы, включая наноматериалы, по общим показателям безопасности.

Контроль наноматериалов в пищевой продукции регулируется Методическими рекомендациями МР 1.2.0023–11, которые определяют порядок и методы контроля искусственных наноматериалов в пищевой продукции, включая биологически активные добавки и пищевые добавки. Применяются для оценки рисков, связанных с поступлением наноматериалов в организм человека через пищевые продукты [13].

Также, Методические рекомендации регламентируют порядок отбора проб, транспортировку и хранение образцов для анализа на содержание наноматериалов; устанавливают требования к лабораторным исследованиям и методам анализа наноматериалов в пищевых продуктах.

Методические рекомендации МР 1.2.0023–11 направлены на обеспечение безопасности пищевых продуктов, содержащих наноматериалы, и предназначены для специалистов Роспотребнадзора, научно-исследовательских организаций и других заинтересованных сторон.

И тем не менее, применения в пищевой промышленности нанотехнологий в т. ч. и наноупаковки, требует законодательного регулирования. Это связано с несколькими важными аспектами:

1. Безопасность для здоровья;
2. Маркировка и информирование потребителей;
3. Экологические аспекты;
4. Стандартизация и сертификация;
5. Мониторинг и контроль.

Давно назрела необходимость принятия Федерального закона «О продовольственной безопасности Российской Федерации», который и должен регулировать вопросы обеспечения продовольственной безопасности страны, включая производство, хранение, транспортировку и реализацию продовольственных товаров, устранять причины наличия на сегодняшний день на потребительском рынке страны некоторого объема опасных для здоровья людей пищевых продуктов. Также, законодательное регулирование является необходимым условием для безопасного и ответственного использования нанотехнологий в пищевой промышленности.

Литература

Литвяк В.В., Копыльцов А.А., Ананских В.В. Нанотехнологии в пищевой промышленности // Пищевая промышленность. 2020. № 12. С. 15.

Мерзликина А.М., Полянский К.К., Фруэнтэ Д.Д. и др. Производство творожных изделий с использованием процесса ультрафильтрации // Молоко и молочная продукция: актуальные вопросы производства: сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф., Углич, 22–24 июня 2021 г. Углич: ВНИИМС, 2021. С. 275–279.

Нанотехнологии в пищевой отрасли: что это такое и как они работают. URL: https://tvoyproduct.ru/news/nanotehnologii-v-pischevoy-otrasli-ili-chto-eto-takoe (дата обращения: 27.03.2026).

Капранова К.А. Надзор в сфере нанотехнологий: перспективы развития // Техника и технология современных производств. 2022. С. 51–55.

Махов С.М. Методы активной упаковки: сравнительный анализ технологий продления срока годности продуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 71.

Симачев Ю.В., Федюнина А.А., Кузык М.Г. Новые контуры промышленной политики // Материалы XXIII Ясинской (Апрельской) Междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. М.: НИУ ВШЭ, 2022.

Полянский К.К., Макаров Е.И., Макаров М.Е. Концептуальные подходы к системе качества молочной продукции на основе технологии блокчейн // Сыроделие и маслоделие. 2018. № 5. С. 28–31.

Епрынцева Е.А. Цифровые разработки для пищевой промышленности // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: мат. IX Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2024. С. 32–36.

В СКФУ разработали съедобную упаковку для продуктов длительного хранения. РИА Новости, 07.11.2022. URL: https://ria.ru/20221107/skfu-1828639456.html (дата обращения: 27.03.2026).

Елисеева Л.Г., Раков Н.О., Токарев П.И. и др. Исследование влияния упаковки с модифицированной атмосферой и влажностью на сроки годности и качество при хранении плодов авокадо сорта Hass // Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 24–31.

Хузина Н.А., Полянский К.К., Дегтярев Н.М., Дерканосова А.А. К вопросу о соблюдении правовых требований к обеспечению качества и безопасности пищевых продуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 1 (103). С. 113.

О применении санитарных мер в Евразийском экономическом союзе: решение Комиссии Таможенного союза от 28.05.2010 № 299 (ред. от 23.09.2025). URL: http://www.tsouz.ru (дата обращения: 27.03.2026).

ТР ТС 021/2011. Технический регламент Таможенного союза "О безопасности пищевой продукции". URL: https://docs.cntd.ru/document/1200090024 (дата обращения: 27.03.2026).

Faria-Silva L. Legal Aspects of the Use of Nanotechnology in the Food Sector // Nanotechnology in Food Safety and Sustainability. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. P. 339–358. doi: 10.1007/978-3-031-69189-2_15

Engelmann W., von Hohendorff R., Leal D.W.S. Regulations for using nanotechnology in food and medical products // Biopolymer-based Nano Films. Elsevier, 2021. P. 387–411. doi: 10.1016/B978-0-12-822474-8.00016-7

Mobeen M., Majeed M., Fatima S. et al. Regulations and Ethical Considerations for Nanotechnology in Agri-food Applications // Nanobiosensors for Crop Monitoring and Precision Agriculture. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. P. 307–334. doi: 10.1007/978-981-97-5698-0_12

de Sousa M.S., Schlogl A.E., Estanislau F.R. et al. Nanotechnology in packaging for food industry: Past, present, and future // Coatings. 2023. V. 13. № 8. P. 1411. doi: 10.3390/coatings13081411

Prasad R.D., Sahoo A.K., Shrivastav O.P. et al. A review on aspects of nanotechnology in food science and animal nutrition // ES Food and Agroforestry. 2022. V. 8. P. 12–46. doi: 10.30919/esfaf704

Kuchipudi J., Selma F., Mumtaz M.A. et al. Application of Nanotechnology in Food Safety and Agriculture: Smart Packaging and Delivery Systems for Enhanced Food Security // Southeast European Journal of Public Health. 2025. V. 24. P. 2095–2120.

Chen Z., Al A., Newaz H. Nanotechnology-enabled food safety: Innovative solutions for agricultural development, smart packaging, delivery systems, and food security // Nanotechnology Perceptions. 2024. V. 20. P. 269–282. doi: 10.62441/nano-ntp.v20iS6.35

Biswas R., Alam M., Sarkar A. et al. Application of nanotechnology in food: processing, preservation, packaging and safety assessment // Heliyon. 2022. V. 8. № 11. P. e11795. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11795

References

1 Litvyak V.V., Kopyltsov A.A., Ananskikh V.V. Nanotechnologies in the Food Industry. Food Industry. 2020. no. 12. p. 15. (in Russian).

2 Merzlikina A.M., Polyansky K.K., Fruente D.D. et al. Production of Curd Products Using the Ultrafiltration Process. In: Milk and Dairy Products: Current Issues of Production: Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference, Uglich, June 22–24, 2021. Uglich: VNIIMS, 2021. pp. 275–279. (in Russian).

3 Nanotechnologies in the Food Industry: What It Is and How It Works. Available at: https://tvoyproduct.ru/news/nanotehnologii-v-pischevoy-otrasli-ili-chto-eto-takoe (accessed: 27.03.2026) (in Russian).

4 Kapranova K.A. Supervision in the Field of Nanotechnologies: Development Prospects. Technique and Technology of Modern Productions. 2022. pp. 51–55. (in Russian).

5 Makhov S.M. Active Packaging Methods: Comparative Analysis of Technologies for Extending Product Shelf Life. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 2. p. 71. (in Russian).

6 Simachev Yu.V., Fedyunina A.A., Kuzyk M.G. New Contours of Industrial Policy. In: Proceedings of the XXIII Yasin (April) International Scientific Conference on Problems of Economic and Social Development. Moscow: HSE University, 2022. (in Russian).

7 Polyansky K.K., Makarov E.I., Makarov M.E. Conceptual Approaches to the Quality System of Dairy Products Based on Blockchain Technology. Cheese and Butter Making. 2018. no. 5. pp. 28–31. (in Russian).

8 Epryntseva E.A. Digital Developments for the Food Industry. In: Innovative Technologies in the Food Industry: Science, Education and Production: Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference. Voronezh, 2024. pp. 32–36. (in Russian).

9 A Edible Packaging for Long-Term Storage Products Was Developed at NCFU. RIA Novosti, November 7, 2022. Available at: https://ria.ru/20221107/skfu-1828639456.html (accessed: 27.03.2026) (in Russian).

10 Eliseeva L.G., Rakov N.O., Tokarev P.I. et al. Study of the Influence of Packaging with Modified Atmosphere and Humidity on Shelf Life and Quality During Storage of Hass Avocado Fruits. Polzunovsky Bulletin. 2025. no. 1. pp. 24–31. (in Russian).

11 Khuzina N.A., Polyansky K.K., Degtyarev N.M., Derkanosova A.A. On the Issue of Compliance with Legal Requirements for Ensuring the Quality and Safety of Food Products. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 1 (103). p. 113. (in Russian).

12 On the Application of Sanitary Measures in the Eurasian Economic Union: Decision of the Customs Union Commission dated May 28, 2010 No. 299 (as amended on September 23, 2025). Available at: http://www.tsouz.ru (accessed: 27.03.2026) (in Russian).

13 TR CU 021/2011. Technical Regulation of the Customs Union "On Food Safety". Available at: https://docs.cntd.ru/document/1200090024 (accessed: 27.03.2026) (in Russian).

14 Faria-Silva L. Legal Aspects of the Use of Nanotechnology in the Food Sector. In: Nanotechnology in Food Safety and Sustainability. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. pp. 339–358. doi: 10.1007/978-3-031-69189-2_15.

15 Engelmann W., von Hohendorff R., Leal D.W.S. Regulations for using nanotechnology in food and medical products. In: Biopolymer-based Nano Films. Elsevier, 2021. pp. 387–411. doi: 10.1016/B978-0-12-822474-8.00016-7.

16 Mobeen M., Majeed M., Fatima S. et al. Regulations and Ethical Considerations for Nanotechnology in Agri-food Applications. In: Nanobiosensors for Crop Monitoring and Precision Agriculture. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. pp. 307–334. doi: 10.1007/978-981-97-5698-0_12.

17 de Sousa M.S., Schlogl A.E., Estanislau F.R. et al. Nanotechnology in packaging for food industry: Past, present, and future. Coatings. 2023. vol. 13. no. 8. article 1411. doi: 10.3390/coatings13081411.

18 Prasad R.D., Sahoo A.K., Shrivastav O.P. et al. A review on aspects of nanotechnology in food science and animal nutrition. ES Food and Agroforestry. 2022. vol. 8. pp. 12–46. doi: 10.30919/esfaf704.

19 Kuchipudi J., Selma F., Mumtaz M.A. et al. Application of Nanotechnology in Food Safety and Agriculture: Smart Packaging and Delivery Systems for Enhanced Food Security. Southeast European Journal of Public Health. 2025. vol. 24. pp. 2095–2120.

20 Chen Z., Al A., Newaz H. Nanotechnology-enabled food safety: Innovative solutions for agricultural development, smart packaging, delivery systems, and food security. Nanotechnology Perceptions. 2024. vol. 20. pp. 269–282. doi: 10.62441/nano-ntp.v20iS6.35.

21 Biswas R., Alam M., Sarkar A. et al. Application of nanotechnology in food: processing, preservation, packaging and safety assessment. Heliyon. 2022. vol. 8. no. 11. article e11795. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11795.

Сведения об авторах

Нана А. Хузина к.ю.н., кафедра социально гуманитарных дисциплин, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, na.huzina@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-2298-724X

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнес процессами, Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, Карла Маркса 67А г. Воронеж, 394030, Россия; профессор консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Анна А. Дерканосова д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Александра И. Хузина преподаватель, кафедра менеджмента и экономики предпринимательства, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Россия, alyhuzina@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-8653-6815

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Nana A. Khuzina Cand. Sci. (Jour.), assistant professor, social humanities department, Voronezh branch of the Plekhanov Russian University of Economics, Karl Marx 67A, Voronezh, 394030, Russia, na.huzina@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-2298-724X

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, management of socio-economic systems and business processes department, Voronezh branch of the Plekhanov Russian University of Economics, Karl Marx 67A, Voronezh, 394030, Russia; onsultant professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Anna A. Derkanosova Dr. Sci. (Engin.), professor, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Alexandra I. Khuzina lecturer, management and economics of entrepreneurship department, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva 8, Voronezh, 394087, Russia, alyhuzina@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-8653-6815

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/01/2026	**После редакции** 27/01/2026	**Принята в печать** 16/02/2026

Received 12/01/2026	**Accepted in revised** 27/01/2026	**Accepted** 16/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-91-96 Оригинальная статья/Research article
УДК 637.146.3:637.344.8 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Совершенствование технологии кисломолочного продукта «Питьевой творог»

Ольга И. Долматова [1] olgadolmatova@rambler.ru 0000-0002-4450-8856
Дарья И. Макарова [2] daria-mkrv@ya.ru

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Тульский молочный комбинат, ул. Некрасова, 7, г. Тула, 300045, Россия

Аннотация. «Питьевой творог» отличается от обычного творога более жидкой консистенцией, что делает его удобным для потребления. Продукт разрешен для питания детей дошкольного и школьного возраста. В настоящее время на предприятиях молочной отрасли выпускают небольшой объем кисломолочного продукта «Питьевой творог». Однако имеются перспективы для расширения данного сегмента продукции. Анализ литературных источников показал недостаточное количество работ по исследованию показателей качества кисломолочного продукта «Питьевой творог», новых разработок его рецептурно-компонентного состава, предложений по совершенствованию технологии. «Питьевой творог» вырабатывали с использованием мембранных технологий. В полученном продукте ежедневно определяли физико-химические показатели в течение 15 суток, органолептические и микробиологические (фоновые и на конец хранения). Выявлены «узкие места» в технологии кисломолочного продукта «Питьевой творог», влияющие на его консистенцию. Экспериментальным путем установлены следующие технологические операции, требующие корректировки для получения продукта с заданными свойствами: заквашивание смеси, гомогенизация продукта, охлаждение продукта перед фасовкой. Внесены предложения по совершенствованию технологии «Питьевого творога». Подобрана оптимальная заквасочная культура, при использовании которой, получен сгусток с наиболее подходящим соотношением физико-химических показателей и временем сквашивания, а произведенный кисломолочный продукт «Питьевой творог» имеет соответствующие требованиям показатели качества. Определена необходимость увеличения давления гомогенизации с 10±2 до 12±2 МПа при температуре 45-50 ºС и понижения температуры охлаждения готового питьевого творога с 10-15 до 6-8 ºС перед фасовкой. Указанные мероприятия привели к обеспечению стабильной структуры кисломолочного напитка «Питьевой творог» на протяжении всего срока хранения.

Ключевые слова: кисломолочный продукт, творог, технология, качество, вязкость, консистенция.

Improving the technology of the fermented milk product "Drinking cottage cheese"

Olga I. Dolmatova [1] olgadolmatova@rambler.ru 0000-0002-4450-8856
Daria I. Makarova [2] daria-mkrv@ya.ru

1 Voronezh State University of Engineering Technologies
2 Tula Dairy Plant, 7 Nekrasova Street, Tula, 300045, Russia

Abstract. "Drinking cottage cheese" differs from regular cottage cheese by its more liquid consistency, which makes it convenient to consume. The product is approved for use in preschool and school-age children. Currently, dairy industry enterprises produce a small volume of the fermented milk product "Drinking cottage cheese". However, there are prospects for expanding this product segment. An analysis of literary sources showed an insufficient number of studies on the quality indicators of the fermented milk product "Drinking cottage cheese", new developments in its recipe-component composition, and proposals for improving the technology. "Drinking cottage cheese" was produced using membrane technologies. Physicochemical indicators of the resulting product were determined daily for 15 days, organoleptic and microbiological indicators (baseline indicators and final shelf life of the product.). "Bottlenecks" in the technology of the fermented milk product "Drinking cottage cheese" affecting its consistency were identified. The following process operations requiring adjustment to obtain a product with the specified properties were experimentally established: mixture fermentation, product homogenization, product cooling before packaging. Suggestions were made to improve the "Drinking Curd" technology. The optimal starter culture was selected, using which a curd with the most suitable ratio of physicochemical parameters and fermentation time was obtained, and the produced fermented milk product "Drinking Curd" has quality indicators that meet the requirements. The need to increase the homogenization pressure from 10±2 to 12±2 MPa at a temperature of 45-50 ºC and to decrease the cooling temperature of the finished drinking curd product from 10-15 to 6-8 ºC before packaging was determined. The specified measures led to ensuring a stable structure of the fermented milk drink "Drinking Curd" throughout the shelf life

Keywords: fermented milk product, cottage cheese, technology, quality, viscosity, consistency.

Введение

В настоящее время рынок молочных продуктов претерпевает ряд изменений в сторону улучшения их качества и ориентированности на современные течения полезного и осознанного потребления. На полках магазинов можно увидеть продукцию, способствующую поддержанию здорового образа жизни, подходящую для детского, лечебного и геродиетического питания, с пониженным содержанием жиров, повышенной массовой долей белка, витаминов, макро- и микроэлементов, без добавленного

Для цитирования
Долматова О.И., Макарова Д.И. Совершенствование технологии кисломолочного продукта «Питьевой творог» // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 91–96. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-91-96

For citation
Dolmatova O.I., Makarova D.I. Improving the technology of the fermented milk product "Drinking cottage cheese". Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 91–96. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-91-96

© 2026, Долматова О.И. и др. / Dolmatova O.I. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

сахара и искусственных компонентов (красителей, стабилизаторов, консервантов и пр.). Одним из полезных молочных продуктов является творог. Ассортимент рынка творога и творожных изделий весьма велик, поэтому сейчас актуальны ориентиры, направленные на сбалансированный состав продукта, продление его хранимоспособности и придание функциональной направленности [2, 5, 7–9, 12, 17–20].

Питьевой творог – это нежный и мягкий продукт, который становится все более популярным среди людей, следящих за своим здоровьем и питанием. Он отличается от обычного творога более жидкой консистенцией, что делает его удобным для потребления. Данный продукт вкусный и полезный, может стать отличным д ополнением к обычному рациону. Он содержит большое количество белка, кальция и других веществ. Кроме того, питьевой творог легко усваивается организмом и может способствовать снижению веса.

Впервые наименование и способ производства вышеуказанного продукта предложен в патенте РФ № 2529954 в 2014 году коллективом авторов ОАО «Тульский молочный комбинат». Благодаря мембранной технологии, творог, полученный по вышеуказанному способу, имеет мягкую, жидкотекучую консистенцию. Уникальная технология ультрафильтрации позволяет сохранить в питьевом твороге казеин и сывороточные белки, приближенные по своему составу к белкам женского молока. Альбуминные сывороточные белки помогают нормализовать содержание холестерина в крови. В 100 г питьевого творога содержится – 125 мг кальция (12,5% от рекомендуемой суточной нормы), 0,2 мг витамина B_2 (12,5% от рекомендуемой суточной нормы). Питьевой творог разрешен для питания детей дошкольного и школьного возраста [1].

Анализ литературных данных показал недостаточное количество работ по исследованию показателей качества кисломолочного продукта «Питьевой творог», новых разработок его рецептурно-компонентного состава, предложений по совершенствованию технологии. Так, например, известны работы по получению питьевого творога «Ликард»: продукт вырабатывают из пастеризованного молока, сквашенного чистыми культурами молочнокислых лактококков с использованием метода кислотно-сычужной коагуляции белков с последующим частичным отделением сыворотки самопрессованием, добавлением наполнителей и гомогенизацией [13]. А также работы по производству питьевого творога с частичным отделением сыворотки в небольшом количестве и без удаления сыворотки [3, 4]. В качестве наполнителей предложены следующие компоненты: кунжутная мука и яичная скорлупа, сироп шиповника, сухофрукты и злаки [5, 14].

В результате сравнения данных по показателям качества продуктов, выработанных разными способами, установлен оптимальный – получение кисломолочного продукта «Питьевой творог» с использованием мембранных технологий. В отличие от традиционных способов производства творога, в нем отсутствует этап варки зерна.

Цель исследования: совершенствование технологии кисломолочного продукта «Питьевой творог» для обеспечения высоких показателей его качества, в том числе реологических. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: анализ показателей качества кисломолочного продукта «Питьевой творог», выявление «узких мест» в технологии его получения, предложения по их совершенствованию.

Материалы и методы

Объекты исследования: заквасочные культуры, кисломолочный продукт «Питьевой творог». Срок годности продукта при температуре 4 ± 2 ºС составляет 10 сут. Анализ продукта проводили ежедневно по органолептическим, микробиологическим и физико-химическим показателям в течение 15 суток (с учетом запаса) в соответствии с требованиями ТР ТС 033/2013. Вязкость определяли на механическом консистометре Боствика LD-BC24 FungiLab (согласно нормативной документации к прибору).

Результаты и обсуждение

Схема производства кисломолочного продукта «Питьевой творог» представлена следующими технологическими операциями:

– приемка молока и сырья;

– очистка молока с подогревом до температуры 40–50 ºС;

– нормализация молочной смеси по массовой доле жира и сухих веществ;

– пастеризация смеси при температуре 90–94 ºС с выдержкой 30–300 с;

– охлаждение до температуры заквашивания 30 ± 2 ºС;

– внесение закваски, сквашивание смеси в течение 6–12 ч;

– перемешивание сгустка в течение 10–20 мин;

– нагревание сгустка при температуре 45–50 ºС с выдержкой до 180 с;

– ультрафильтрация;

– гомогенизация продукта при температуре 40–60 ºС при давлении 10 ± 2 МПа;

– охлаждение продукта до температуры 12–15 ºС;

– внесение наполнителей, перемешивание;

– фасовка,

– доохлаждение готового продукта.

По вышеуказанной технологической схеме получены и отобраны образцы для исследования от двух выработок в количестве не менее 15 шт. в каждой.

Органолептические, физико-химические и микробиологические показатели кисломолочного продукта «Питьевой творог» представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Показатели качества кисломолочного продукта «Питьевой творог»

Table 1.

Quality indicators of the fermented milk product "Drinking cottage cheese"

Показатель | Indicator	Характеристика | Characteristic
Консистенция и внешний вид | Consistency and appearance	Однородная, плотная с нарушенным сгустком, без ощутимых частиц молочного белка | Homogeneous, dense with a broken clot, without noticeable particles of milk protein
Вкус и запах | Taste and smell	Чистый, кисломолочный, без посторонних привкусов и запахов | Pure, fermented milk, without foreign tastes and odors
Цвет | Color	Белый, равномерный по всей массе | White, uniform throughout the mass
Массовая доля жира, % | Mass fraction of fat, %	3,9
Массовая доля белка, % | Mass fraction of protein, %	7,1
Массовая доля влаги, % | Mass fraction of moisture, %	84,1
Титруемая кислотность, ºТ | Titratable acidity, ºТ	120
Активная кислотность, ед. pH |	4,3
БГКП, масса продукта в г, в котором не допускается | Coliform bacteria, mass of product in g, in which it is not allowed	0,01
Дрожжи, КОЕ/г | Yeast, colony-forming units per 1 g	менее 10 | less than 10
Плесени, КОЕ/г | Molds, colony-forming units per 1 g	менее 10 | less than 10
Количество молочнокислых микроорганизмов, КОЕ/г | The number of lactic acid microorganisms, colony-forming units per 1 g	$1 \cdot 10^7$

Особое внимание уделено изучению реологических свойств продукта. Установлено, что вязкость кисломолочного продукта «Питьевой творог» была повышенной и нестабильной, образцы имели плотную консистенцию (рисунок 1).

В конце срока годности отмечено нарушение однородности в верхнем слое продукта, консистенция в меру вязкая, без ощутимых частиц молочного белка, на поверхности имеется незначительная часть отделившейся сыворотки.

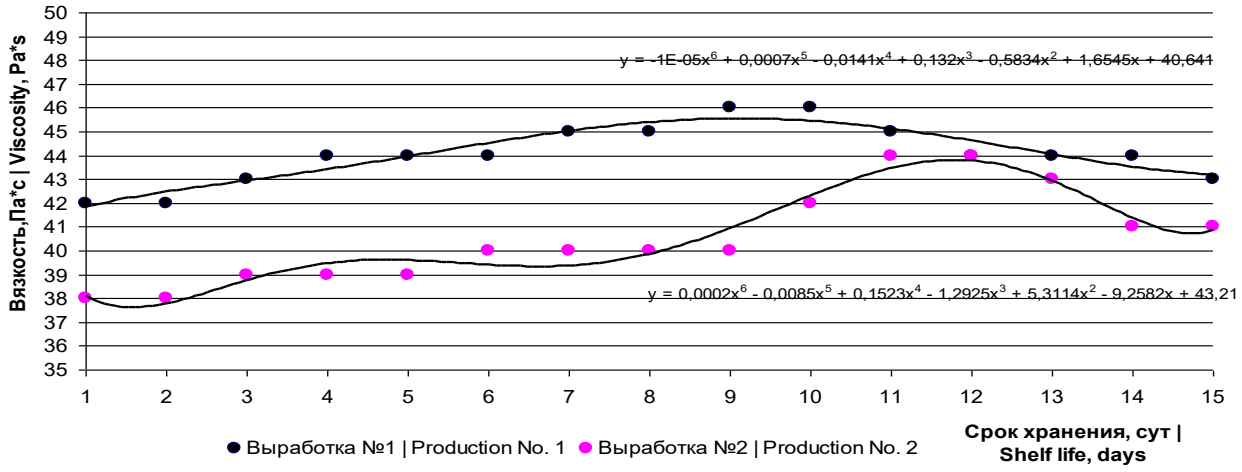


Рисунок 1. Изменение вязкости кисломолочного продукта «Питьевой творог» в процессе хранения

Figure 1. Changes in the viscosity of the fermented milk product "Drinking cottage cheese" during storage

Основными факторами, влияющими на консистенцию вязких кисломолочных продуктов, являются используемая закваска и режимы технологического процесса его производства [10–11, 15–16].

Экспериментальным путем установлены следующие технологические операции, требующие корректировки для получения продукта с заданными свойствами: заквашивание смеси, гомогенизация продукта, охлаждение продукта перед фасовкой.

Выбор заквасочной культуры является сложным и длительным процессом. Для кисломолочного продукта «Питьевой творог» необходимо подобрать такую культуру, при

использовании которой он не изменит имеющиеся органолептических и физико-химических свойств (таблица 1), но будет обладать более стабильной и менее вязкой консистенцией.

Проведены выработки кисломолочного продукта «Питьевой творог» с наиболее подходящими заквасочными культурами (рисунок 2):

Образец № 1 – гомоферментативная мезофильно-термофильная культура, состоит из выделенных штаммов *Lactococcus lactis ssp. lactis* и *Streptococcus thermophilus*, температура сквашивания 34–36 °С, продолжительность сквашивания 6–8 ч, pH = 4,1;

Образец № 2 – гомоферментативная мезофильная культура, состоит из невыделенных штаммов *Lactococcus lactis ssp. cremoris* и *Lactococcus lactis ssp. lactis*, температура сквашивания 28–30 °С, продолжительность сквашивания 10–11 ч, pH = 4,4;

Образец № 3 – гомоферментативная мезофильно-термофильная культура, в составе специально отобранные штаммы *Lactococcus lactis ssp. lactis*, *Lactococcus lactis ssp. cremoris* и *Streptococcus thermophilus*, температура сквашивания 34–36 °С, продолжительность сквашивания 6–8 ч, pH = 4,3;

Образец № 4 – гомоферментативная мезофильная культура, в состав которой входят невыделенные штаммы молочнокислых бактерий *Lactococcus lactis ssp. lactis и Lactococcus lactis ssp. cremoris*, температура сквашивания 28–32 °С, продолжительность сквашивания 8–10 ч, pH = 4,3.

В ходе лабораторных испытаний определена оптимальная заквасочная культура – образец № 4. При ее использовании получен сгусток с наиболее подходящим соотношением физико-химических показателей и временем сквашивания, а произведенный готовый продукт имеет соответствующие требованиям органолептические, физико-химические и микробиологические показатели. Консистенция «Питьевого творога» характеризуется как однородная, вязкотекучая. В процессе хранения продукта отмечен сниженный пиковый показатель вязкости по сравнению с данными, изображенными на рисунке 1 (рисунок 3).

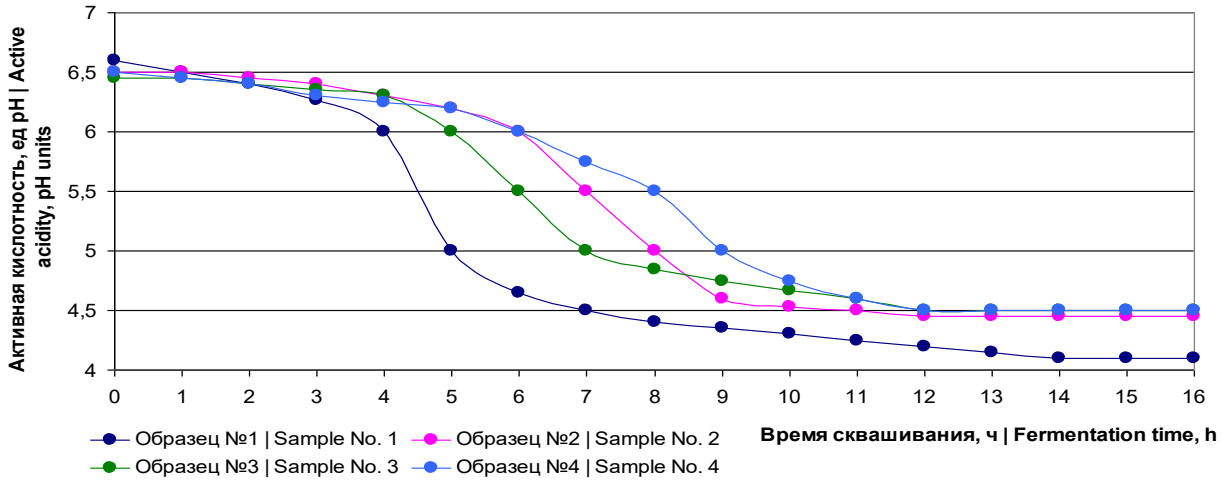


Рисунок 2. Изменение активной кислотности сгустков при сквашивании разными заквасочными культурами
Figure 2. Changes in the active acidity of clots during fermentation with different starter cultures

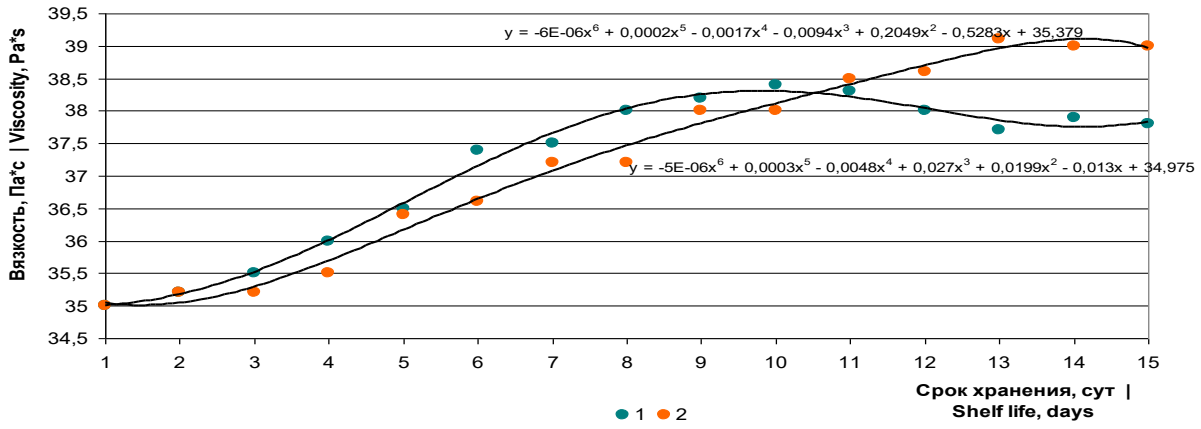


Рисунок 3. Изменение вязкости кисломолочного продукта «Питьевой творог» в процессе хранения: 1 – с закваской (образец № 4); 2 – с закваской (образец № 4) после корректировки технологических параметров
Figure 3. Change in viscosity of the fermented milk product "Drinking cottage cheese" during storage: 1 – with starter (sample No. 4); 2 – with starter (sample No. 4) after adjusting the process parameters

Вязкость продукта зависит от температуры розлива: чем она ниже, тем меньше показатель. Целесообразным с экономической точки зрения является понижение температуры продукта перед фасованием до 6–8 ºС. При этом вероятность повторного структурообразования за счет взаимодействия белков продукта снижается.

При содержании сухих веществ в продукте более 12% давление гомогенизации должно быть менее 15 МПа. Таким образом, выбран диапазон исследования вязкости «Питьевого творога» при давлении гомогенизации от 10 до 14 МПа.

Проведена корректировка технологических параметров: давления гомогенизации и температуры фасовки. Определена необходимость увеличения давления гомогенизации с 10 ± 2 МПа до 12 ± 2 МПа при температуре 45–50 ºС и понижения температуры охлаждения готового питьевого творога с 10–15 ºС до 6–8 ºС перед фасовкой (рисунок 3).

Кривая 2 на рисунке 3 имеет более плавный, по сравнению с кривой 1, восходящий характер без дальнейшего понижения, что говорит об улучшении стабильности структуры кисломолочного напитка «Питьевой творог» на протяжении всего срока хранения.

Заключение

Подобрана оптимальная заквасочная культура, при использовании которой, получен сгусток с наиболее подходящим соотношением физико-химических показателей и временем сквашивания, а произведенный кисломолочный продукт «Питьевой творог» имеет соответствующие требованиям органолептические, физико-химические и микробиологические показатели. Определена необходимость увеличения давления гомогенизации с 10 ± 2 до 12 ± 2 МПа при стандартной температуре 45–50 ºС и понижения температуры охлаждения продукта готового питьевого творога с 10–15 до 6–8 ºС перед фасовкой.

Литература

1 Бартенева О. На площадке МТПП обсудили программу «Школьное молоко» // Переработка молока. 2017. № 12. С. 18–19.

2 Бояршинова Е.В. Технология производства творога с фруктовым наполнителем для питания детей старше 6 месяцев // Инновации и продовольственная безопасность. 2022. № 4. С. 37–44.

3 Вараксина Д.А., Петухова Т.Ю. Питьевой творог как новый продукт на современном молочном рынке и особенности его производства // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2020. № 22. С. 234–237.

4 Вараксина Д.А., Петухова Т.Ю. Технология и критические контрольные точки производства питьевого творога // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2020. № 23. С. 288–290.

5 Вараксина Д.А., Петухова Т.Ю. Пищевая безопасность и контроль критических контрольных точек при производстве питьевого творога // Студенческая наука и XXI век. 2020. Т. 17. № 2–1. С. 31–33.

6 Гаглоева Т.Н., Завьялова В.Г. Особенности технологии производства творога с пищевыми волокнами // Наука и Образование. 2024. Т. 7. № 3. С. [уточнить].

7 Голубева Л.В., Долматова О.И., Кучменко Т.А. и др. Инновационные технологии в производстве курта // Пищевая промышленность. 2018. № 5. С. 30–31.

8 Долматова О.И., Чернышева Т.Е. Здоровый молочный перекус // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 2 (84). С. 88–93.

9 Долматова О.И., Бессонова Л.А. Производство творога с улучшенными показателями качества // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 4 (98). С. 15–19.

10 Зенина Д.В. Влияние гомогенизации на степень использования составных частей молока при производстве творога // Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020. Т. 1. № 1. С. 193–198.

11 Кабанова Т.В., Дементьева Е.И. Влияние состава закваски на физико-химические показатели кисломолочных продуктов на основе пахты // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2022. С. 220–223.

12 Овезова А., Сахедова А., Моммалиева О. Технологическая линия производства диетического творога // CETERIS PARIBUS. 2024. № 9. С. 58–60.

13 Ромазанов Р.А. Разработка питьевого творога «Ликард» // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета. 2020. С. 310.

14 Ромазанов Р.А., Серова О.П. Разработка технологии производства творога питьевого для беременных женщин // Инновационное развитие аграрно-пищевых технологий: мат. Междунар. науч.-практ. конф. Волгоград: СФЕРА, 2021. С. 165.

15 Урбах М.С., Стурова Ю.Г. Оптимизация процесса сквашивания при производстве кисломолочных продуктов // Ползуновский вестник. 2024. № 2. С. 175–181.

16 Шуляк Т.Л., Шингарева Т.И., Калинова А.А. Изучение реологических свойств кисломолочных напитков из вторичного молочного сырья // Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2021. № 7. С. 70–81.

17 Pozzobon V., Pozzobon C. Cottage cheese in a diet – a review // Nutrition & Food Science. 2019. V. 49. № 6. P. 1265–1274. doi: 10.1108/NFS-12-2018-0350

18 Ali M.B., Abdel-Salam A.M., El-Sayed M.M. et al. Functional, textural, physicochemical and sensorial evaluation of cottage cheese standardized with food grade coagulants // Food Science and Technology. 2022. V. 42. P. e33420. doi: 10.1590/fst.33420

19 Setyawardani T., Rahayu A., Sumarmono J. et al. Yield, composition, texture, and sensory characteristics of cottage cheese produced with the incorporation of different herb extracts // Animal Production. 2023. V. 25. № 2. P. 109–117. doi: 10.20884/1.jap.2023.25.2.109

20 Neverova O., Korotkikh N., Karepina T. et al. Modeling of the cottage cheese products composition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 949. № 1. P. 012047. doi: 10.1088/1755-1315/949/1/012047

References

1 Barteneva O. The School Milk Program Was Discussed at the Moscow Chamber of Commerce and Industry. Milk Processing. 2017. no. 12. pp. 18–19.

2 Boyarshinova E.V. Fruit-Filled Cottage Cheese Production Technology for Children Over 6 Months Old. Innovations and Food Security. 2022. no. 4. pp. 37–44. (in Russian).

3 Varaksina D.A., Petukhova T.Yu. Drinking Cottage Cheese as a New Product in the Modern Dairy Market and Its Production Features. Current Issues in Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products. 2020. no. 22. pp. 234–237. (in Russian).

4 Varaksina D.A., Petukhova T.Yu. Technology and Critical Control Points for the Production of Drinking Cottage Cheese. Current Issues in Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products. 2020. no. 23. pp. 288–290. (in Russian).

5 Varaksina D.A., Petukhova T.Yu. Food Safety and Control of Critical Control Points in the Production of Drinking Cottage Cheese. Student Science and the 21st Century. 2020. vol. 17. no. 2–1. pp. 31–33. (in Russian).

6 Gagloeva T.N., Zavyalova V.G. Features of the Production Technology of Cottage Cheese with Dietary Fiber. Science and Education. 2024. vol. 7. no. 3. (in Russian).

7 Golubeva L.V., Dolmatova O.I., Kuchmenko T.A., Salamatova A.K., Oskenbay A.O. Innovative Technologies in the Production of Kurt. Food Industry. 2018. no. 5. pp. 30–31. (in Russian).

8 Dolmatova O.I., Chernysheva T.E. Healthy Dairy Snack. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. vol. 82. no. 2 (84). pp. 88–93. (in Russian).

9 Dolmatova O.I., Bessonova L.A. Production of Cottage Cheese with Improved Quality Indicators. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2023. vol. 85. no. 4 (98). pp. 15–19. (in Russian).

10 Zenina D.V. Influence of Homogenization on the Degree of Utilization of Milk Components in Cottage Cheese Production. Current Issues in the Dairy Industry, Intersectoral Technologies and Quality Management Systems. 2020. vol. 1. no. 1. pp. 193–198. (in Russian).

11 Kabanova T.V., Dementyeva E.I. Influence of the Starter Culture Composition on the Physicochemical Properties of Fermented Milk Products Based on Buttermilk. Current Issues in Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products. 2022. pp. 220–223. (in Russian).

12 Ovezova A., Sakhedova A., Mommalieva O. Technological Line for the Production of Dietary Cottage Cheese. CETERIS PARIBUS. 2024. no. 9. pp. 58–60. (in Russian).

13 Romazanov R.A. Development of Drinking Cottage Cheese "Likard". Competition of Research Works of Students of Volgograd State Technical University. 2020. pp. 310. (in Russian).

14 Romazanov R.A., Serova O.P. Development of a Production Technology for Drinking Cottage Cheese for Pregnant Women. In: Innovative Development of Agro-Food Technologies: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Volgograd: OOO "SFERA", 2021. p. 165. (in Russian).

15 Urbach M.S., Sturova Yu.G. Optimization of the Fermentation Process in the Production of Fermented Milk Products. Polzunovsky Vestnik. 2024. no. 2. pp. 175–181. (in Russian).

16 Shulyak T.L., Shingareva T.I., Kalinova A.A. Study of the Rheological Properties of Fermented Milk Drinks from Secondary Milk Raw Materials. Current Issues in the Processing of Meat and Dairy Raw Materials. 2021. no. 7. pp. 70–81. (in Russian).

Pozzobon V., Pozzobon C. Cottage cheese in a diet – a review. Nutrition & Food Science. 2019. vol. 49. no. 6. pp. 1265–1274. doi: 10.1108/NFS-12-2018-0350.

Ali M.B., Abdel-Salam A.M., El-Sayed M.M. et al. Functional, textural, physicochemical and sensorial evaluation of cottage cheese standardized with food grade coagulants. Food Science and Technology. 2022. vol. 42. article e33420. doi: 10.1590/fst.33420.

Setyawardani T., Rahayu A., Sumarmono J. et al. Yield, composition, texture, and sensory characteristics of cottage cheese produced with the incorporation of different herb extracts. Animal Production. 2023. vol. 25. no. 2. pp. 109–117. doi: 10.20884/1.jap.2023.25.2.109.

Neverova O., Korotkikh N., Karepina T. et al. Modeling of the cottage cheese products composition. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. vol. 949. no. 1. article 012047. doi: 10.1088/1755-1315/949/1/012047.

Сведения об авторах

Ольга И. Долматова к.т.н., доцент, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, olgadolmatova@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0002-4450-8856
Дарья И. Макарова студент, Тульский молочный комбинат, ул. Некрасова, 7, г. Тула, 300045, Россия, daria-mkrv@ya.ru

Information about authors

Olga I. Dolmatova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Animal origin products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, olgadolmatova@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0002-4450-8856
Daria I. Makarova student, Tula Dairy Plant, 7 Nekrasova Street, Tula, 300045, Russia, daria-mkrv@ya.ru

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/12/2025	**После редакции** 18/12/2025	**Принята в печать** 26/01/2026
Received 01/12/2025	**Accepted in revised** 18/12/2025	**Accepted** 26/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-97-106 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.143:664.162 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка обогащенных кремовых масс с модификацией углеводного профиля

Манана Е. Ткешелашвили [1] mananatk@ya.ru 0000-0002-5269-7933
Галина А. Бобожонова [1] batay96@mail.ru 0000-0002-5421-0287
Газибег О. Магомедов [2] gazibeck.magomedov@ya.ru 0000-0002-7201-8387

1 Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36, г. Москва, 115054, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Для снижения распространения ожирения и сахарного диабета ВОЗ рекомендует ограничение потребления продуктов с высоким содержанием легкоусвояемых углеводов и соблюдение низкокалорийных рационов питания. Также данная рекомендация играет немаловажную роль в подавлении процессов гликирования, провоцирующих различные заболевания и старение организма. Поэтому изменение рецептур высококалорийных кондитерских изделий актуально. Целью исследования являлась разработка кремовых масс с модификацией углеводного профиля и пониженной калорийностью, обогащенных биологически активными веществами. Объектом исследования являлись кремовые массы с модифицированным углеводным профилем. Применяли стандартные методы исследования органолептических и физико-химических свойств опытных образцов. Разработан состав для приготовления кремовых масс на основе натуральных подсластителей эритрита и стевиозида. Замена сахара в составе изделий на подсластители позволила значительно снизить в них массовую долю легкоусвояемых углеводов (на 82,0-84,2% по сравнению с аналогичными массами на сахаре), что будет способствовать снижению потребления сахаров в составе готового продукта, и ожидаемо приведет к подавлению процессов гликирования, преждевременного старения. Дополнительно произвели обогащение кремовых масс сухим экстрактом плодов черники, содержащим биологически активные вещества – антоцианы. Антоцианы в составе продукта также будут способствовать подавлению процессов гликирования, тромбообразования, предупреждению и снижению риска развития хронических заболеваний. Количество вводимого экстракта рассчитывали с учетом рекомендуемого адекватного и верхнего допустимого суточного уровня потребления антоцианов (67,5-93,3 мг на 100 г массы), что позволило отнести разработанные изделия к категории обогащенной пищевой продукции. Введение подсластителей с нулевой калорийностью и низким гликемическим индексом, позволило получить продукт пониженной энергетической ценности и рекомендовать его использование в рационе питания лиц с повышенной массой тела, нарушениями углеводного обмена, а также страдающих ожирением. Дополнительным преимуществом разработанного продукта является его сенсорнооригинальный вкус шоколадно-сливочного мороженого с охлаждающим эффектом.

Ключевые слова: кремовые массы, эритрит, антоцианы, пониженная калорийность, избыточная масса тела, ожирение.

Development of enriched cream masses with modified carbohydrate profiles

Manana E. Tkeshelashvili [1] mananatk@ya.ru 0000-0002-5269-7933
Galina A. Bobozhonova [1] batay96@mail.ru 0000-0002-5421-0287
Gazibeg O. Magomedov [2] gazibeck.magomedov@ya.ru 0000-0002-7201-8387

1 Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane., 36, Moscow, 115054, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. To reduce the spread of obesity and diabetes, WHO recommends limiting the consumption of foods high in easily digestible carbohydrates and following low-calorie diets. The recommendation also plays a significant role in suppressing glycation processes, which provoke various diseases and the aging of the body. Consequently, reformulating high-calorie confectionery products is essential. The purpose of the study was to develop cream masses with a modified carbohydrate profile and reduced calorie content, enriched with biologically active substances. The object of the study was cream masses with a modified carbohydrate profile. Standard methods were used to investigate the organoleptic and physicochemical properties of the experimental samples. A formula for preparing cream masses based on the natural sweeteners erythritol and stevioside has been developed. Replacing sugar with sweeteners in the product formula significantly reduced the mass fraction of easily digestible carbohydrates (by 82,0–84,2% compared to similar masses containing sugar), which will contribute to a decrease in sugar intake from the finished product and is expected to suppress glycation processes and premature aging. Additionally, the cream masses were enriched with dried blueberry fruit extract containing biologically active substances – anthocyanins. Anthocyanins in the product will also contribute to suppressing glycation and thrombosis processes, as well as to preventing and reducing the risk of chronic diseases. The amount of the added extract was calculated based on the recommended adequate and upper permissible daily intake levels of anthocyanins (67.5-93.3 mg per 100 g of product mass), which allowed classifying the developed products as fortified food items. The introduction of zero-calorie sweeteners with a low glycemic index has made it possible to obtain a product of reduced energy density and to recommend its use in the diet of individuals with overweight, carbohydrate metabolism disorder, as well as those suffering from obesity. An additional advantage of the developed product is its sensorially original taste of chocolate-and-cream ice cream with a cooling effect.

Keywords: cream masses, erythritol, anthocyanins, low calorie content, overweight, obesity.

Для цитирования
Ткешелашвили М.Е., Бобожонова Г.А., Магомедов Г.О. Разработка обогащенных кремовых масс с модификацией углеводного профиля // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 87. № 1. С. 97–106. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-97-106

For citation
Tkeshelashvili M.E., Bobozhonova G.A., Magomedov G.O. Development of enriched cream masses with modified carbohydrate profiles. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 87. no. 1. pp. 97–106. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-97-106

© 2026, Ткешелашвили М.Е и др. / Tkeshelashvili M.E. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Кондитерские изделия входят в пищевой рацион практически всех возрастных групп населения, при этом большую часть составляют высококалорийные изделия. В то же время во всем мире растет число людей с избыточным весом, ожирением, основным фактором риска развития ряда других хронических заболеваний, включая сахарный диабет 2 типа. Для снижения распространения ожирения и сахарного диабета диетологами и нутрициологами рекомендовано ограничение потребления продуктов с высоким содержанием легкоусвояемых углеводов и соблюдение диетических рационов, модифицированных по калорийности [1].

В последние годы отмечается рост интереса к изучению механизмов старения. Возрос интерес к конечным продуктам глубокого гликирования (advanced glycation end products, AGEs), которые образуются в больших количествах в организме в процессе старения [2, 3].

Гликирование представляет неферментативную реакцию белков с сахарами, обусловленную взаимодействием между восстанавливающими сахарами или дикарбонильными продуктами их распада (глюкоза, фруктоза, галактоза, манноза, рибоза) и аминогруппами остатков лизина, аргинина и серусодержащих аминокислотных остатков [2].

AGEs могут формироваться эндогенным путем или образовываться за счет экзогенных факторов (потребления продуктов питания, прошедших термическую обработку). AGEs являются основой патофизиологии многих болезней, включая сердечно-сосудистые, нейродегенеративные заболевания и диабет. И экзогенные, и эндогенные AGEs в организме человека играют существенную роль в развитии воспалительного ответа [2].

Формирование эндогенных AGEs повышается при сахарном диабете, однако они образуются и при более низких показателях глюкозы, т. е. у людей, не страдающих сахарным диабетом и не имеющих метаболических нарушений в организме [4].

Поскольку AGEs – важный патогенетический фактор при диабете и старении, разработка мер, направленных на подавление процессов гликирования, является важной частью стратегии по профилактике развития заболеваний и преждевременного старения. Немаловажную роль в борьбе с AGEs имеет снижение потребления сахаров и калорийности потребляемой пищи [4]. В исследованиях [5] показано, что уменьшение калорийности потребляемой пищи у мышей увеличивает продолжительность жизни и замедляет течение многих возрастных дисфункций. Изучено влияние различных искусственных подсластителей, таких как ацесульфам калия, сахарин натрия, сукралоза, аспартам и неотам на гликирование белка in vitro. Присутствие искусственных подсластителей в системе гликирования (бычий сывороточный альбумин (БСА) – глюкоза), показало ингибирование образования AGEs. Подсластители проявили потенциальную антигликацию в отношении белка (БСА). Они могут быть использованы в качестве терапевтического средства для лечения диабета и его осложнений [6]. Проведена оценка потенциала гликирования природного дисахарида трегалозы in vitro, установлено свойство трегалозы – образовывать меньшее количества AGEs, чем глюкоза [7].

Анализ современной литературы показывает, что полифенолы могут успешно справляться с задачей подавления гликирования. В работе [8] продемонстрирована антигликирующая способность экстрактов *Bauhinia forficata Link*, содержащих 11 флавоноидов, при использовании фруктозы в качестве гликирующего агента. На моделях (*БСА-фруктоза и БСА-метилглиоксал*) показана способность содержащих полифенолы экстрактов малины, черники, голубики подавлять образование AGEs за счет связывания метилглиоксаля, причем свободные от антоцианов аналогичные экстракты таким свойством не обладали [9].

В связи с вышеизложенным, целью данного исследования являлась разработка кремовых масс с модификацией углеводного профиля и пониженной калорийностью, обогащенных биологически активными веществами.

Необходимость исключить или резко ограничить употребление сахара в питании создает состояние дискомфорта. В этой связи широкое применение получили подсластители.

Эритритол – сахарный спирт естественного происхождения, который широко используется в качестве подсластителя. В промышленных масштабах подсластитель получают путем ферментации глюкозы из кукурузного крахмала. Эритритол (эритрит Е968) разрешен к применению в качестве подсластителя в России, Европе, США и Японии.

Результаты исследования показывают, что по сравнению с другими сахарными спиртами, эритритол в основном абсорбируется и выводится с мочой в неметаболизированном виде. Минимальное количество достигает толстой кишки, поэтому он лучше переносится и вызывает меньше нежелательных желудочно-кишечных побочных эффектов [10].

В исследованиях [11] авторы пришли к выводу, что употребление эритритола может повышать риск развития сердечно-сосудистых заболеваний, а также способствовать усилению тромбообразования. При этом эксперты отмечают [12], что данные исследования не доказали причинно-следственную связь между применением эритритола и этими заболеваниями.

Для предотвращения возможного слабительного эффекта Научный комитет по пищевым добавкам и ароматизаторам Европейского агентства по безопасности продуктов питания (EFSA FAF) установил суточную норму потребления эритритола для человека – 0,5 г на 1 кг массы тела [13].

Эритритол обладает рядом полезных свойств, включая положительное влияние на здоровье полости рта, что подтверждается долгосрочными контролируемыми клиническими исследованиями, проведенными с участием как детей, так и взрослых [10].

Исследования выявили, что эритритол может снижать гликемический индекс за счет уменьшения всасывания глюкозы в тонком кишечнике, увеличения поглощения глюкозы мышцами и улучшения активности ферментов, метаболизирующих глюкозу у крыс с диабетом 2 типа [14]. Пятинедельный прием эритритола не показал статистически значимого влияния на функцию сосудов, абдоминальный жир или толерантность к глюкозе у людей с ожирением [15].

Результаты исследования [16] подтвердили, что эритритол не оказывает влияния на уровень глюкозы и не стимулирует секрецию инсулина, но при этом приводит к повышению концентрации PYY – одного из кишечных гормонов, участвующих в формировании чувства насыщения, а также установили, что при совместном приеме сахарозы и эритритола отмечается более низкий уровень постпрандиальной гликемии по сравнению с приемом такого же количества сахарозы.

В 100 г эритритола содержится примерно 20 ккал, что в 20 раз меньше, чем у сахара (400 ккал на 100 грамм), подсластитель считают продуктом с нулевой калорийностью и низким гликемическим индексом (ГИ = 0) [17].

Указанные свойства эритритола позволяют рекомендовать его в качестве оптимального заменителя сахара у людей с нарушениями углеводного обмена и ожирением.

Кроме того, использование эритритола в производстве пищевых продуктов поддерживается его функциональными, технологическими и химическими свойствами, такими как стабильность в кислой и щелочной средах и высокая термостойкость.

В результате в настоящее время эритритол является широко используемой заменой сахарозы при производстве низкокалорийных кондитерских изделий [18–21].

Сладость эритритола составляет около 70% от сладости сахарозы, что обуславливает необходимость применения в рецептуре разрабатываемого продукта стевиолгликозидов, которые позволят обеспечить вкусовой профиль, характерный для сахарозы.

Стевия (Stevia rebaudiana Bertoni) – многолетнее тропическое растение. Значительный интерес к этому растению связан с наличием в листьях стевии дитерпеновых гликозидов – натуральных низкокалорийных подсластителей, превосходящих по сладости сахарозу в 50–300 раз. Основные дитерпеновые стевиолгликозиды (СГ), определяющие сладость листьев стевии: стевиозид и ребаудиозид А.

В США высокоочищенные стевиолгликозиды получили статус GRAS (в целом признаны безопасными). EFSA FAF одобрило использование очищенных стевиолгликозидов в пищевых продуктах при допустимой суточной дозе (ADI) до 4 мг-эквивалента стевиола на кг массы тела человека [22].

Проведенные исследования показали, что регулярное употребление гликозидов стевии снижает уровень глюкозы и холестерина в крови, способствует регенерации клеток, подавляет рост опухолевых клеток и укрепляет кровеносные сосуды. Установлено, что гликозиды не перевариваются в желудке, расщепляясь бактериями на стевиол и глюкозу только в толстом кишечнике. Высвобождаемая глюкоза не всасывается в кровоток, а метаболизируется кишечной микрофлорой [23].

Исследование [24] не выявило негативного влияния стевиолгликозидов и эритритола на кишечную микробиоту.

Известно, что стевиозид и ребаудиозид А, являются термически стабильными при температурах до 200 °С, и при нагревании не подвергаются карамелизации [23]. Стабильность сладких гликозидов стевии при высоких температурах позволяет широко использовать их в производстве диетических кондитерских изделий [25,26].

Антоцианы (антоцианины) – гликозилированные антоцианидины – водорастворимые растительные пигменты красного, фиолетового и синего цвета. Антоцианы обладают рядом положительных свойств, доказанных в экспериментальных и клинических исследованиях. Долгое время биологическая активность антоцианов недооценивалась из-за данных об их низкой биодоступности. По некоторым оценкам, лишь 0.4% исходного количества употребленных в пищу антоцианов детектировано

в плазме крови. Проведенные исследования показали, что у людей и животных эти соединения активно метаболизируются, а биодоступность, рассчитанная с учетом их метаболитов, превышает 12% [27].

Плоды черники содержат множество биологически активных соединений, в том числе антоцианы. Из антоцианов, обычно встречающихся в растениях, пять присутствуют в чернике, включая мальвидин, дельфинидин, цианидин, пеонидин и петунидин. Производные мальвидина и дельфинидина описываются как наиболее распространенные антоцианы, обнаруженные в плодах черники [28].

Содержание антоцианов в чернике способствует её благотворному влиянию на здоровье и помогает бороться с различными хроническими заболеваниями, включая сердечно-сосудистые, нейродегенеративные заболевания, диабет и рак. Антоцианы черники используются в качестве природных антиоксидантов. Способность антоцианов черники нейтрализовать радикалы DPPH, FRAP, ABTS•+ и супероксидные анионы значительно выше, чем у аскорбиновой кислоты [29]. Антоцианы черники предотвращают повреждения эндотелиальной функции, вызванные высоким уровнем глюкозы, посредством антиоксидантных и сосудорасширяющих механизмов [30]. Было обнаружено in vitro и in vivo [31], что антоцианин дельфинидин-3-глюкозид может ингибировать активацию тромбоцитов и благодаря этому существенно подавлять процессы образования тромбов как при артериальном, так и при венозном напряжении сдвига. Исследования in vitro [9] показали наиболее выраженные антигликационные свойства (72,4%) экстракта черники по сравнению с соответствующим экстрактом, не содержащим антоцианов.

Таким образом, потенциальная польза антоцианов для здоровья делает их популярными в качестве компонентов здорового питания, способствующих предупреждению и снижению риска развития хронических заболеваний.

Материалы и методы

Для модификации углеводного профиля в рецептуре опытных образцов конфетных масс использовали натуральные подсластители.

Столовый подсластитель эритрит (эритритол Е968) (ООО МИОФАРМ) представляет собой кристаллический порошок белого цвета, хорошо растворяющийся в воде. Температура плавления 119–123 °С. Содержание основного вещества 99,5–100,5%. Вкус эритрита оказывает охлаждающее действие, сладость составляет 60–80% от сладости обычного сахара. Энергетическая ценность, кКал / 100 г продукта – отсутствует (0 кКал / 0 кДж). Пищевая ценность 100 г продукта: белки – 0 г, жиры – 0 г, углеводы – 0 г.

Стевиозид (ООО «Экотопия») – порошок белого цвета без запаха, с характерным сладковатым вкусом, коэффициент сладости составляет 250 единиц.

В качестве источника антоцианов использовали «Черники экстракт сухой 25% антоцианинов» (Китай, ООО «НАТУРИНГ»/Россия). Экстракт представляет собой мелкодисперсный порошок от фиолетового до темного фиолетово-красного или почти черно-фиолетового цвета из плодов черники. Содержание суммы антоцианинов не менее 25% (ВЭЖХ).

Готовые изделия оценивали с помощью органолептических показателей методом описания. Содержание массовой доли влаги в массах определяли по ГОСТ 5900–2014, плотность масс – по ГОСТ 5902–80. Калорийность кремовых масс рассчитывали на основании рецептурного состава.

Результаты и обсуждение

Одним из способов снижения калорийности пищевой продукции является модификация его углеводного состава. Использование в качестве подсластителей многоатомных спиртов (сахароспиртов) имеет преимущества за счет меньшего побочного эффекта, оказываемого на организм человека при рекомендуемых нормах потребления. Для снижения калорийности конечного продукта был выбран низкокалорийный сахароспирт эритрит и стевиозид, имеющие низкий гликемический индекс.

Выбор эритрита также был сделан на основании его свойства давать охлаждающий эффект при употреблении продукта. В летний период времени потребление шоколадных и кремовых изделий значительно сокращается, потребители выбирают мороженое как главный способ охладиться, предпочтение отдают пломбиру, в качестве наполнителя предпочитают сгущенное молоко или шоколад. Создание кремовых масс и готовых кондитерских изделий из них пониженной калорийности с охлаждающим эффектом и вкусом, напоминающим мороженое, вероятно, позволит активизировать продажи в летние месяцы, сглаживая сезонные колебания спроса, благодаря удовлетворению вкусовых запросов потребителей.

В Единых санитарно-эпидемиологических и гигиенических требованиях к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю), установлены адекватный и верхний допустимый уровни потребления для пищевых и биологически активных веществ, входящих в состав пищевой продукции. Для эритрита максимальная дозировка составляет не более 45 г/сут. С учетом этого количество вносимого эритрита в рекомендуемой разовой порции готовых изделий из разработанных кремовых масс (4 конфеты около 10 г каждая) не превышает 17,5 г.

Модифицированные рецептурные составы кремовых масс на эритрите по вариантам, представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Рецептурный состав опытных образцов кремовых масс

Table 1.

Formulation of experimental samples of creamy mass

Ингредиент Ingredient	Содержание, мас. % Content, mass, %		
	Образец | Sample		
	1	2	3
Эритрит | Erythritol	41,29	41,48	43,30
Какао тертое | Crude chocolate	22,24	23,72	14,40
Какао масло | Cocoa butter	3,05	3,64	8,24
Сливочное масло | Butter	23,26	21,1	20,90
Сухие сливки | Dry cream	9,6	9,6	11,94
Стевиозид | Stevioside	0,29	0,14	0,30
Разжижитель | Diluent	0,01	0,01	0,45
Ароматизатор | Flavouring	0,01	0,02	0,10
Сухой экстракт плодов черники Dried Blueberry Fruit Extract	0,25	0,29	0,37
Итого | Total	100	100	100

Модифицированные кремовые массы содержат от 14,4–23,72% какао-тертого и 26,31–29,14% дополнительно введенного жира. Проведенные исследования показали, что такой интервал обеспечивает наиболее гармоничные органолептические свойства и оптимальные технологические свойства получаемых масс. Уменьшение количества какао-тертого, а также жиров ниже указанных пределов приводит к ухудшению органолептических свойств, усложнению технологического процесса взбивания кремовых масс, и их отсадки, а также увеличению их плотности.

Увеличение количества какао-тертого выше 23,72 мас. % и жира выше 29,14 мас. % приводит к ухудшению технологических свойств получаемых масс – снижению вязкости и повышению текучести массы, а также чрезмерной твердости или пластичности (в зависимости от характеристик увеличенного жира: какао масло или сливочное масло) корпусов конфет и необоснованному удорожанию готовых изделий.

Содержание разжижителя 0,01–0,45 мас. % обеспечивает оптимальную вязкость и текучесть кремовой массы. Снижение количества разжижителя ниже 0,01 мас. % приводит к увеличению вязкости, а увеличение выше 0,45 мас. % – к увеличению текучести масс. Оба изменения значительно усложняют ведение технологического процесса.

Содержание в рецептуре сухих молочных сливок в пределах 9,6–11,94 мас. % обеспечивает необходимый молочный вкус, который в сочетании со вкусом какао-продуктов и охлаждающим эффектом эритрита способствует восприятию разработанных готовых изделий как аналогов шоколадно-сливочного мороженого.

Введение ароматизатора в количестве 0,01–0,1 мас. % усиливает вкус, а стевиозида в количестве 0,14–0,3 мас. % обеспечивает в сочетании с эритритом восполнение сладости до порогового вкуса традиционного изделия.

Для обогащения кремовых масс из разнообразия источников, содержащих биологически активные вещества – антоцианы, был выбран сухой экстракт плодов черники. Количество вводимого экстракта рассчитывали с учетом рекомендуемого суточного уровня потребления антоцианов. Согласно МР 2.3.1.0253–21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» и Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) адекватный уровень потребления антоцианов составляет 50 мг/сутки, верхний допустимый уровень – 150 мг/сутки.

В соответствии с Решением Комиссии Таможенного союза от 28.05.2010 № 299 «О применении санитарных мер в Евразийском экономическом союзе» содержание биологически активных веществ в суточной дозе биологически активных добавок к пище, указанной в рекомендациях по применению, должно составлять не менее 15% адекватного уровня потребления и не превышать верхний допустимый уровень их потребления.

Учитывая изложенные рекомендации введение сухого экстракта плодов черники с содержанием антоцианов не менее 25% осуществлено в пределах 0,25–0,37 мас. %, что дает возможность дополнительно внести 67,5–93,3 мг антоцианов на 100 г кремовой массы (рисунок 1).

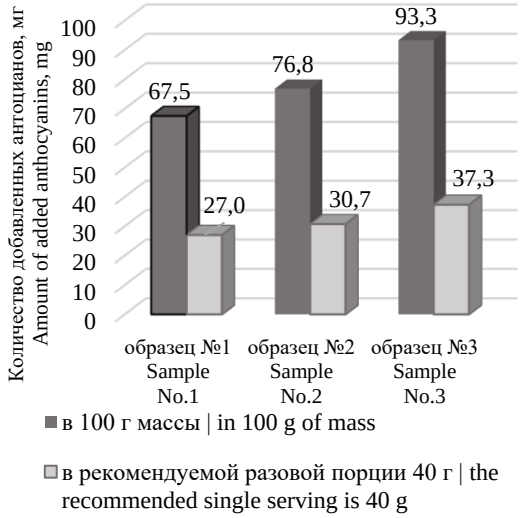


Рисунок 1. Количество добавленных антоцианов в опытных образцах кремовых масс, мг

Figure 1. Amount of added anthocyanins in experimental samples of cream mass, mg

Содержание в рекомендуемой разовой порции готовых изделий из разработанных кремовых масс (4 конфеты около 10 г каждая) добавленных антоцианов в количестве 54,0–74,6% от адекватного уровня потребления, позволяет отнести данные изделия к категории обогащенной пищевой продукции. Также обогащение антоцианами кремовых масс будет способствовать снижению возможных рисков тромбообразования при употреблении эритрита в составе разработанного продукта.

Содержание в рецептурах подсластителя эритрита колеблется в пределах 41,29–43,30 мас. %, что предпочтительно для обеспечения необходимого освежающего эффекта. Полная замена белого сахара на сахароспирт в разработанных кремовых массах позволяет значительно снизить в них массовую долю углеводов (на 82,0; 83,3 и 84,2% по сравнению с аналогичными массами на сахаре), что будет способствовать снижению потребления сахаров в составе готового продукта, и ожидаемо приведет к подавлению процессов гликирования, формирования AGEs и преждевременного старения.

Технологический процесс производства кремовых масс предусматривал: подготовку сырья к производству, смешивание и измельчение рецептурных компонентов, разводку массы, темперирование, сбивание массы и формование. На стадии смешивания в смеситель дозировали какао тертое, какао масло, эритрит, сухие сливки, стевиозид. Полученную рецептурную смесь перемешивали в течение 20 минут при температуре 40–45 **°С** до однородной, пластичной консистенции. Далее температуру снижали до 30 °С и при непрерывном перемешивании вводили в массу сбитое пластифицированное сливочное масло с растворенным в нем антоциансодержащим экстрактом, добавляли разжижитель и ароматизатор. Такой способ введения экстракта на данном этапе выбран как наиболее оптимальный по ходу технологического процесса, он позволяет сохранить активные свойства антоцианов, с учетом невысоких температур процесса. Далее оттемперированную массу сбивали в сбивальной машине при температуре 28–30 °С в течение 15 минут до плотности массы 0,9 г/см^3. Формование полученной сбитой кремовой массы проводили методом отсадки. Температура отсаживаемой массы поддерживалась на уровне 26 °С. В результате отсадки конфеты приобретали куполообразную форму. Охлаждение готовых изделий проводили в холодильной камере при температуре 6 °С.

Рассчитана пищевая ценность разработанных кремовых масс, и установлено, что полная замена белого сахара на эритрит обеспечивает снижение их энергетической ценности (калорийности) на 30% и более относительно энергетической ценности (калорийности) аналогичных масс на сахаре, что позволяет в соответствии с ТР ТС 022/2011, отнести разработанные кремовые массы и изделия из них к пищевой продукции с пониженной энергетической ценностью (рисунок 2).

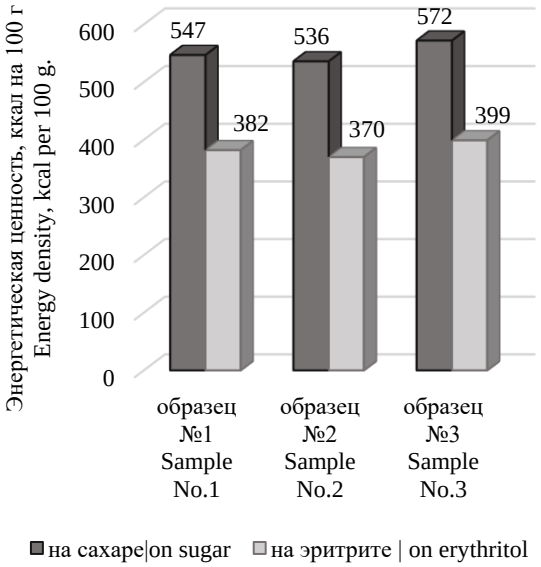


Рисунок 2. Снижение энергетической ценности опытных образцов кремовых масс на эритрите относительно энергетической ценности аналогичных масс на сахаре

Figure 2. Reduction in the energy density of experimental samples of cream masses on erythritol relative to the energy density of similar masses on sugar

Оценка органолептических характеристик показала, что использование эритрита в рецептурном составе кремовых масс способствовало появлению освежающего эффекта при употреблении (таблица 2).

Внесение сухого экстракта плодов черники не оказало существенного влияния на цвет и вкус разработанного изделия.

Влажность разработанных кремовых масс составила 2,0–2,3%, плотность – 0,82–0,90 г/см^3, что позволяет использовать их для производства конфет и начинок мучных кондитерских изделий, и как отделочный полуфабрикат.

Таблица 2.

Органолептические и физико-химические показатели качества опытных образцов кремовых масс

Table 2.

Organoleptic and physicochemical quality parameters of experimental samples of cream masses

Показатель Index	Фактическая характеристика Образец | Sample		
	1	2	3
Вкус и запах | Taste and smell	шоколадно-сливочный, с охлаждающим послевкусием chocolatey and creamy, with a cooling aftertaste	шоколадно-сливочный, с охлаждающим послевкусием chocolatey and creamy, with a cooling aftertaste	шоколадно-сливочный, с охлаждающим послевкусием chocolatey and creamy, with a cooling aftertaste
Цвет | Color	темно-коричневый dark brown	темно-коричневый dark brown	коричневый brown
Структура | Structure	однородная, мелкопористая, кремообразная homogeneous, fine-pored, creamy	однородная, мелкопористая, кремообразная homogeneous, fine-pored, creamy	однородная, мелкопористая, кремообразная homogeneous, fine-pored, creamy
Массовая доля влаги, % Mass fraction of moisture, %	2,0	2,0	2,3
Плотность, г/см^3 Density, g/cm^3	0,89	0,90	0,82

Заключение

В результате проведенного исследования разработаны обогащенные кремовые массы с модифицированным углеводным профилем, обладающие на 30–31% пониженной энергетической ценностью относительно аналогичных масс на сахаре.

Модификация углеводного профиля кремовых масс позволяет значительно снизить в них массовую долю легкоусвояемых углеводов (на 82,0–84,2% по сравнению с аналогичными массами на сахаре), что будет способствовать снижению потребления сахаров в составе готового продукта, и ожидаемо приведет к подавлению процессов гликирования, формирования AGEs и преждевременного старения.

Замена легкоусвояемых углеводов в рецептуре изделия на подсластители с низким гликемическим индексом (эритрит и стевиозид), обладающие способностью снижать уровень глюкозы в крови, позволяет рассмотреть возможность использования разработанных кремовых масс в рационе питания лиц с повышенной массой тела, нарушениями углеводного обмена, а также страдающих ожирением.

Введение сухого экстракта плодов черники в рецептурный состав кремовых масс привело к созданию продукта, содержащего 54,0–74,6% от адекватного уровня потребления добавленных антоцианов в рекомендуемой разовой порции. Это позволяет классифицировать данное изделие как обогащенную пищевую продукцию. Кроме того, присутствие антоциансодержащего экстракта черники в разработанном продукте потенциально способствует минимизации рисков тромбообразования, ассоциированных с употреблением эритрита.

Разработанные кремовые массы обладают уникальным вкусовым профилем, сочетающим молочные оттенки, интенсивный вкус какао и охлаждающий эффект эритрита, формируют сенсорное восприятие, аналогичное шоколадно-сливочному мороженому. Такой продукт имеет высокий потенциал для стимулирования летних продаж, сглаживая традиционные спады спроса за счет удовлетворения потребительских предпочтений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова».

Литература

1 Шарафетдинов Х.Х., Плотникова О.А. Ожирение как глобальный вызов XXI века: лечебное питание, профилактика и терапия // Вопросы питания. 2020. Т. 89. № 4. С. 161–171. doi: 10.24411/0042-8833-2020-10050

2 Гаврилова А.О., Северина А.С., Шамхалова М.Ш., Шестакова М.В. Роль конечных продуктов гликирования в патогенезе диабетической нефропатии // Сахарный диабет. 2021. Т. 24. № 5. С. 461–469. doi: 10.14341/DM12763

3 Иванникова Е.В., Смирнова О.М. Роль конечных продуктов гликирования и их рецепторов в развитии осложнений сахарного диабета // Эффективная фармакотерапия. Эндокринология. 2019. Т. 1. № 5. С. 20–26.

4 Чуев А.С., Озерова Е.А. Гигиенические аспекты питания в антивозрастной терапии старения кожи лица // Биология и интегративная медицина. 2025. № 6 (78). С. 396–408.

5 Roberts M.N., Wallace M.A., Tomilov A.A. et al. A Ketogenic Diet Extends Longevity and Healthspan in Adult Mice // Cell Metabolism. 2018. V. 27. № 5. P. 1156. doi: 10.1016/j.cmet.2018.04.005

6 Dinesh K., Ahmad A. Effect of different artificial sweeteners on protein glycation // Acta Biologica Szegediensis. 2022. V. 66. № 2. P. 132–138. doi: 10.14232/abs.2022.2.132-138

7 Motomiya Y., Higashi T., Masuda M. et al. An in vitro evaluation of the glycation potential of a natural disaccharide, trehalose // Clinical and Experimental Nephrology. 2003. V. 7. № 3. P. 195–200. doi: 10.1007/s10157-003-0243-1

8 Franco R.R., Alves V.M.A., Zabinsky L.F.R. et al. Antidiabetic potential of Bauhinia forficata Link leaves: a non-cytotoxic source of lipase and glycoside hydrolases inhibitors and molecules with antioxidant and antiglycation properties // Biomedicine & Pharmacotherapy. 2020. V. 123. P. 109798. doi: 10.1016/j.biopha.2019.109798

9 Ma H., Johnson S., Liu W. et al. Evaluation of polyphenol anthocyanin-enriched extracts of blackberry, black raspberry, blueberry, cranberry, red raspberry, and strawberry for free radical scavenging, reactive carbonyl species trapping, antiglycation, anti-β-amyloid aggregation, and microglial neuroprotective effects // International Journal of Molecular Sciences. 2018. V. 19. № 2. P. 461. doi: 10.3390/ijms19020461

10 Mazi T.A., Stanhope K.L. Erythritol: An In-Depth Discussion of Its Potential to Be a Beneficial Dietary Component // Nutrients. 2023. V. 15. № 1. P. 204. doi: 10.3390/nu15010204

11 Witkowski M., Nemet I., Alamri H. et al. The artificial sweetener erythritol and cardiovascular event risk // Nature Medicine. 2023. V. 29. № 3. P. 710–718. doi: 10.1038/s41591-023-02223-9

12 Expert reaction to study looking at an artificial sweetener (erythritol) and cardiovascular disease events. Science Media Centre. URL: https://www.sciencemediacentre.org/expert-reaction-to-study-looking-at-an-artificial-sweetener-erythritol-and-cardiovascular-disease-events/ (дата обращения: 05.12.2025).

13 EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), Younes M., Aquilina G. et al. Re-evaluation of erythritol (E 968) as a food additive // EFSA Journal. 2023. V. 21. № 12. P. e08430. doi: 10.2903/j.efsa.2023.8430

14 Chukwuma C.I., Mopuri R., Nagiah S. et al. Erythritol reduces small intestinal glucose absorption, increases muscle glucose uptake, improves glucose metabolic enzymes activities and increases expression of Glut 4 and IRS 1 in type 2 diabetic rats // European Journal of Nutrition. 2018. V. 57. № 7. P. 2431–2444. doi: 10.1007/s00394-017-1516-x

15 Bordier V., Teysseire F., Drewe J. et al. Effects of a 5 week intake of erythritol and xylitol on vascular function, abdominal fat and glucose tolerance in humans with obesity: a pilot trial // BMJ Nutrition, Prevention & Health. 2023. V. 6. № 2. P. 264–272. doi: 10.1136/bmjnph-2023-000764

16 Силина Н.В., Мазурина Н.В., Ершова Е.В. и др. Постпрандиальная секреция инсулина и пептида YY при приеме эритритола и сахарозы // Сахарный диабет. 2024. Т. 27. № 6. С. 536–542. doi: 10.14341/DM13232

17 Msomi N.Z., Erukainure O.L., Islam M.S. Suitability of sugar alcohols as antidiabetic supplements: A review // Journal of Food and Drug Analysis. 2021. V. 29. № 1. P. 1–14. doi: 10.38212/2224-6614.3107

18 Raczkowska E., Bienkiewicz M., Gajda R. Modulation of the glycaemic index value of shortbread cookies by the use of erythritol and fruit pomace // Scientific Reports. 2024. V. 14. № 1. P. 14215. doi: 10.1038/s41598-024-65108-y

19 Abo-Zaid E.M. Impact of using oat flour and erythritol on characteristics and glycemic index of chiffon cakes and study the effect of erythritol on cavity-causing bacteria // New Valley Journal of Agricultural Science. 2023. V. 3. № 7. P. 659–668. doi: 10.21608/nvjas.2023.184532.1153

20 Джабоева А.С., Тяжгова М.А. Использование сахарозаменителя эритрита в производстве диетико-диабетического бисквита // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2020. № 4 (30). С. 46–51.

21 Боженова В.В., Баланов П.Е., Смотраева И.В. Разработка рецептуры и технологии диетического клюквенного мармелада на эритритоле // Вестник КрасГАУ. 2022. № 10. С. 187–194. doi: 10.36718/1819-4036-2022-10-187-194

22 EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), Castle L., Andreassen M. et al. Scientific opinion on the extension of the authorisation of use of the food additive steviol glycosides (E 960a-d) and the modification of the acceptable daily intake (ADI) for steviol // EFSA Journal. 2024. V. 22. № 11. P. e09045. doi: 10.2903/j.efsa.2024.9045

23 Кочетов А.А., Синявина Н.Г. Стевия (Stevia Rebaudiana Bertoni): биохимический состав, терапевтические свойства и использование в пищевой промышленности (обзор) // Химия растительного сырья. 2021. № 2. С. 5–27. doi: 10.14258/jcprm.2021027931

24 Mahalak K.K., Firrman J., Tomasula P.M. et al. Impact of Steviol Glycosides and Erythritol on the Human and Cebus apella Gut Microbiome // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2020. V. 68. № 46. P. 13093–13101. doi: 10.1021/acs.jafc.9b06181

25 Блягоз А.И., Хатко З.Н., Хачатрян А.А., Жилова Р.М. Разработка продукта функционального назначения – шоколадных конфет с семенами конопли // Новые технологии. 2023. Т. 19. № 1. С. 26–34. doi: 10.47370/2072-0920-2023-19-1-26-34

26 Нилова Л.П., Малютенкова С.М., Шмакова Л.Н. Влияние порошка стевии на качество безглютенового печенья // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 4. С. 124–132. doi: 10.20914/2310-1202-2022-4-124-132

27 Юдина Р.С., Гордеева Е.И., Шоева О.Ю. и др. Антоцианы как компоненты функционального питания // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. Т. 25. № 2. С. 178–189. doi: 10.18699/VJ21.022

28 Herrera-Balandrano D.D., Chai Z., Beta T. et al. Blueberry anthocyanins: An updated review on approaches to enhancing their bioavailability // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 118. P. 808–821. doi: 10.1016/j.tifs.2021.11.006

29 Sun W. A review of the physiological functions of blueberry anthocyanins and their applications in food // BIO Web of Conferences. 2023. V. 59. P. 02011. doi: 10.1051/bioconf/20235902011

30 Huang W., Hutabarat R., Chai Z. et al. Antioxidant blueberry anthocyanins induce vasodilation via PI3K/Akt signaling pathway in high-glucose-induced human umbilical vein endothelial cells // International Journal of Molecular Sciences. 2020. V. 21. № 5. P. 1575. doi: 10.3390/ijms21051575

31 Yang Y., Shi Z., Reheman A. et al. Plant food delphinidin 3-glucoside significantly inhibits platelet activation and thrombosis: novel protective roles against cardiovascular diseases // PLoS ONE. 2012. V. 7. № 5. P. e37323. doi: 10.1371/journal.pone.0037323

References

1 Sharafetdinov Kh.Kh., Plotnikova O.A. Obesity as a Global Challenge of the 21st Century: Therapeutic Nutrition, Prevention and Therapy. Problems of Nutrition. 2020. vol. 89. no. 4. pp. 161–171. doi: 10.24411/0042-8833-2020-10050 (in Russian).

2 Gavrilova A.O., Severina A.S., Shamkhalova M.Sh., Shestakova M.V. The Role of Advanced Glycation End Products in the Pathogenesis of Diabetic Nephropathy. Diabetes Mellitus. 2021. vol. 24. no. 5. pp. 461–469. doi: 10.14341/DM12763 (in Russian).

3 Ivannikova E.V., Smirnova O.M. The Role of Advanced Glycation End Products and Their Receptors in the Development of Diabetes Complications. Effective Pharmacotherapy. Endocrinology. 2019. vol. 1. no. 5. pp. 20–26. (in Russian).

4 Chuev A.S., Ozerova E.A. Hygienic Aspects of Nutrition in Anti-Aging Therapy of Facial Skin Aging. Biology and Integrative Medicine. 2025. no. 6 (78). pp. 396–408. (in Russian).

5 Roberts M.N., Wallace M.A., Tomilov A.A. et al. A Ketogenic Diet Extends Longevity and Healthspan in Adult Mice. Cell Metabolism. 2018. vol. 27. no. 5. pp. 1156–1168. doi: 10.1016/j.cmet.2018.04.005.

6 Dinesh K., Ahmad A. Effect of different artificial sweeteners on protein glycation. Acta Biologica Szegediensis. 2022. vol. 66. no. 2. pp. 132–138. doi: 10.14232/abs.2022.2.132-138.

7 Motomiya Y., Higashi T., Masuda M. et al. An in vitro evaluation of the glycation potential of a natural disaccharide, trehalose. Clinical and Experimental Nephrology. 2003. vol. 7. no. 3. pp. 195–200. doi: 10.1007/s10157-003-0243-1.

8 Franco R.R., Alves V.M.A., Zabinsky L.F.R. et al. Antidiabetic potential of Bauhinia forficata Link leaves: a non-cytotoxic source of lipase and glycoside hydrolases inhibitors and molecules with antioxidant and antiglycation properties. Biomedicine & Pharmacotherapy. 2020. vol. 123. article 109798. doi: 10.1016/j.biopha.2019.109798.

9 Ma H., Johnson S., Liu W. et al. Evaluation of polyphenol anthocyanin-enriched extracts of blackberry, black raspberry, blueberry, cranberry, red raspberry, and strawberry for free radical scavenging, reactive carbonyl species trapping, antiglycation, anti-β-amyloid aggregation, and microglial neuroprotective effects. International Journal of Molecular Sciences. 2018. vol. 19. no. 2. article 461. doi: 10.3390/ijms19020461.

10 Mazi T.A., Stanhope K.L. Erythritol: An In-Depth Discussion of Its Potential to Be a Beneficial Dietary Component. Nutrients. 2023. vol. 15. no. 1. article 204. doi: 10.3390/nu15010204.

11 Witkowski M., Nemet I., Alamri H. et al. The artificial sweetener erythritol and cardiovascular event risk. Nature Medicine. 2023. vol. 29. no. 3. pp. 710–718. doi: 10.1038/s41591-023-02223-9.

12 Expert reaction to study looking at an artificial sweetener (erythritol) and cardiovascular disease events. Science Media Centre. Available at: https://www.sciencemediacentre.org/expert-reaction-to-study-looking-at-an-artificial-sweetener-erythritol-and-cardiovascular-disease-events/ (accessed: 05.12.2025).

13 EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), Younes M., Aquilina G. et al. Re-evaluation of erythritol (E 968) as a food additive. EFSA Journal. 2023. vol. 21. no. 12. article e08430. doi: 10.2903/j.efsa.2023.8430.

14 Chukwuma C.I., Mopuri R., Nagiah S. et al. Erythritol reduces small intestinal glucose absorption, increases muscle glucose uptake, improves glucose metabolic enzymes activities and increases expression of Glut 4 and IRS 1 in type 2 diabetic rats. European Journal of Nutrition. 2018. vol. 57. no. 7. pp. 2431–2444. doi: 10.1007/s00394-017-1516-x.

15 Bordier V., Teysseire F., Drewe J. et al. Effects of a 5 week intake of erythritol and xylitol on vascular function, abdominal fat and glucose tolerance in humans with obesity: a pilot trial. BMJ Nutrition, Prevention & Health. 2023. vol. 6. no. 2. pp. 264–272. doi: 10.1136/bmjnph-2023-000764.

16 Silina N.V., Mazurina N.V., Ershova E.V. et al. Postprandial Secretion of Insulin and Peptide YY After Intake of Erythritol and Sucrose. Diabetes Mellitus. 2024. vol. 27. no. 6. pp. 536–542. doi: 10.14341/DM13232 (in Russian).

17 Msomi N.Z., Erukainure O.L., Islam M.S. Suitability of sugar alcohols as antidiabetic supplements: A review. Journal of Food and Drug Analysis. 2021. vol. 29. no. 1. pp. 1–14. doi: 10.38212/2224-6614.3107.

18 Raczkowska E., Bienkiewicz M., Gajda R. Modulation of the glycaemic index value of shortbread cookies by the use of erythritol and fruit pomace. Scientific Reports. 2024. vol. 14. no. 1. article 14215. doi: 10.1038/s41598-024-65108-y.

19 Abo-Zaid E.M. Impact of using oat flour and erythritol on characteristics and glycemic index of chiffon cakes and study the effect of erythritol on cavity-causing bacteria. New Valley Journal of Agricultural Science. 2023. vol. 3. no. 7. pp. 659–668. doi: 10.21608/nvjas.2023.184532.1153.

20 Dzhaboeva A.S., Tyazhgova M.A. The Use of the Sweetener Erythritol in the Production of Dietary Diabetic Sponge Cake. Bulletin of Kabardino-Balkarian State Agrarian University. 2020. no. 4 (30). pp. 46–51. (in Russian).

21 Bozhenova V.V., Balanov P.E., Smotraeva I.V. Development of Recipe and Technology of Dietary Cranberry Marmalade with Erythritol. Bulletin of KrasGAU. 2022. no. 10. pp. 187–194. doi: 10.36718/1819-4036-2022-10-187-194 (in Russian).

22 EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), Castle L., Andreassen M. et al. Scientific opinion on the extension of the authorisation of use of the food additive steviol glycosides (E 960a-d) and the modification of the acceptable daily intake (ADI) for steviol. EFSA Journal. 2024. vol. 22. no. 11. article e09045. doi: 10.2903/j.efsa.2024.9045.

23 Kochetov A.A., Sinyavina N.G. Stevia (Stevia Rebaudiana Bertoni): Biochemical Composition, Therapeutic Properties and Use in the Food Industry (Review). Chemistry of Plant Raw Materials. 2021. no. 2. pp. 5–27. doi: 10.14258/jcprm.2021027931 (in Russian).

24 Mahalak K.K., Firrman J., Tomasula P.M. et al. Impact of Steviol Glycosides and Erythritol on the Human and Cebus apella Gut Microbiome. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2020. vol. 68. no. 46. pp. 13093–13101. doi: 10.1021/acs.jafc.9b06181.

25 Blyagoz A.I., Khatko Z.N., Khachatryan A.A., Zhilova R.M. Development of a Functional Product – Chocolate Candies with Hemp Seeds. New Technologies. 2023. vol. 19. no. 1. pp. 26–34. doi: 10.47370/2072-0920-2023-19-1-26-34 (in Russian).

26 Nilova L.P., Malyutenkova S.M., Shmakova L.N. Influence of Stevia Powder on the Quality of Gluten-Free Cookies. Bulletin of VSUET. 2022. vol. 84. no. 4. pp. 124–132. doi: 10.20914/2310-1202-2022-4-124-132 (in Russian).

27 Yudina R.S., Gordeeva E.I., Shoeva O.Yu. et al. Anthocyanins as Components of Functional Nutrition. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2021. vol. 25. no. 2. pp. 178–189. doi: 10.18699/VJ21.022 (in Russian).

28 Herrera-Balandrano D.D., Chai Z., Beta T. et al. Blueberry anthocyanins: An updated review on approaches to enhancing their bioavailability. Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 118. pp. 808–821. doi: 10.1016/j.tifs.2021.11.006.

29 Sun W. A review of the physiological functions of blueberry anthocyanins and their applications in food. BIO Web of Conferences. 2023. vol. 59. article 02011. doi: 10.1051/bioconf/20235902011.

30 Huang W., Hutabarat R., Chai Z. et al. Antioxidant blueberry anthocyanins induce vasodilation via PI3K/Akt signaling pathway in high-glucose-induced human umbilical vein endothelial cells. International Journal of Molecular Sciences. 2020. vol. 21. no. 5. article 1575. doi: 10.3390/ijms21051575.

31 Yang Y., Shi Z., Reheman A. et al. Plant food delphinidin 3-glucoside significantly inhibits platelet activation and thrombosis: novel protective roles against cardiovascular diseases. PLoS ONE. 2012. vol. 7. no. 5. article e37323. doi: 10.1371/journal.pone.0037323.

Сведения об авторах

Манана Е. Ткешелашвили к.т.н., научно-исследовательский институт продовольственной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36, г. Москва, 115054, Россия, mananatk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-5269-7933

Галина А. Бобожонова к.т.н., доцент, базовая кафедра индустрии качества, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36, г. Москва, 115054, Россия, batay96@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-5421-0287

Газибег О. Магомедов д.т.н., профессор, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, gazibeck.magomedov@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-7201-8387

Information about authors

Manana E. Tkeshelashvili Cand. Sci. (Engin.), research institute of the food security, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane., 36, Moscow, 115054, Russia, mananatk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-5269-7933

Galina A. Bobozhonova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, basic department of quality industry, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane., 36, Moscow, 115054, Russia, batay96@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-5421-0287

Gazibeg O. Magomedov Dr. Sci. (Engin.), professor, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, gazibeck.magomedov@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-7201-8387

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/01/2026	**После редакции** 08/02/2026	**Принята в печать** 16/03/2026

Received 11/01/2026	**Accepted in revised** 08/02/2026	**Accepted** 16/03/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-107-113 Оригинальная статья/Research article
УДК 66.047:621.577:664.8 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование процесса сушки термолабильных продуктов с использованием теплонасосных технологий

Алексей В. Дранников [1] drannikov@list.ru 0000-0002-3060-8688
Яна П. Домбровская [1] yana_dombrovskaya@inbox.ru 0000-0003-2363-7648
Евгений М. Сухоруков [1] suxorukov99.99@mail.ru 0009-0006-1798-2567
Даниил Р. Кулигин [1] kuligin470@gmail.com 0009-0007-3133-4467

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В статье представлена схема и принцип действия энергоэффективной сушильной установки с применением теплонасосной технологии с рециркуляцией и очисткой воздуха, которая ориентирована на получение пророщенных семян льна, покрытых термочувствительной оболочкой на основе растительного глицерина. Актуальность работы обусловлена специфическими требованиями к режиму сушки таких продуктов как пророщенные семена льна, обладающие высоким содержанием витаминов, антиоксидантов и полиненасыщенных жирных кислот (особенно омега-3). Деликатная структура проростков и чувствительная оболочка требуют предельной осторожности при термической обработке. Авторами представлены оптимальные режимные параметры процесса сушки данного продукта, позволяющие достичь высокой эффективности проведения процесса и его экологической целесообразности. При этом экономия удельных энергоресурсов может доходить до 70 % за счет применения теплонасосных технологий, обеспечивающих извлечения тепла из отработанного воздуха (который обычно выбрасывается в атмосферу) и передачи его свежему воздуху, который подготавливают к процессу сушки. Кроме этого, были проведены исследования по определению оптимального коэффициента рециркуляции (КР) отработанного воздуха. Было выявлено, что настройка КР в диапазоне 55-65 % является оптимальной, обеспечивая пиковую энергоэффективность и сохранение стабильности кипящего слоя. В ходе изучения результатов эксперимента по сушке дражированных семян льна на представленной установке, а также на основании параметрического моделирования процесса авторами сделан вывод о том, что необходим постоянный контроль и регулирование параметров процесса в автоматическом режиме за счет мониторинга изменений показателей свежего воздуха. Таким образом, представленная установка и технология сушки позволяет не только существенно снизить энергозатраты предприятия, но и обеспечивает высокую скорость и равномерность сушки продукта, что критически важно для сохранения его биологической ценности и товарного вида.

Ключевые слова: сушка, теплонасосная установка, лён.

Investigation of the drying process of thermolabile products using heat pump technologies

Alexey V. Drannikov [1] drannikov@list.ru 0000-0002-3060-8688
Iana P. Dombrovskaia [1] yana_dombrovskaya@inbox.ru 0000-0003-2363-7648
Evgeniy M. Sukhorukov [1] suxorukov99.99@mail.ru 0009-0006-1798-2567
Daniil R. Kuligin [1] kuligin470@gmail.com 0009-0007-3133-4467

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article presents the scheme and principle of operation of an energy-efficient drying unit using heat pump technology with recirculation and air purification, which is focused on obtaining germinated flax seeds coated with a thermosensitive shell based on vegetable glycerin. The relevance of the work is due to the specific requirements for the drying regime of products such as sprouted flax seeds, which have a high content of vitamins, antioxidants and polyunsaturated fatty acids (especially omega-3). The delicate structure of the seedlings and the sensitive shell require extreme care during heat treatment. The authors present the optimal operating parameters of the drying process of this product, which make it possible to achieve high efficiency of the process and its environmental expediency. At the same time, savings in specific energy resources can reach up to 70% due to the use of heat pump technologies that extract heat from exhaust air (which is usually released into the atmosphere) and transfer it to fresh air, which is prepared for the drying process. In addition, studies have been conducted to determine the optimal exhaust air recirculation coefficient. It was found that the control panel setting in the range of 55-65% is optimal, providing peak energy efficiency and maintaining fluidized bed stability. During the study of the results of the experiment on drying drained flax seeds on the presented installation, as well as on the basis of parametric modeling of the process, the authors concluded that constant monitoring and regulation of the process parameters is necessary in automatic mode by monitoring changes in fresh air parameters. Thus, the presented drying installation and technology allows not only to significantly reduce the energy consumption of the enterprise, but also ensures high speed and uniformity of drying of the product, which is critically important for preserving its biological value and presentation.

Keywords: drying, heat pump unit, flax.

Для цитирования
Дранников А.В., Домбровская Я.П., Сухоруков Е.М., Кулигин Д.Р. Исследование процесса сушки термолабильных продуктов с использованием теплонасосных технологий // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 107–113. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-107-113

For citation
Drannikov A.V., Dombrovskaya Y.P., Sukhorukov E.M., Kuligin D.R. Investigation of the drying process of thermolabile products using heat pump technologies. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 107–113. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-107-113

©2026, Дранников А.В. и др. / Drannikov A.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Современные пищевая и перерабатывающая промышленности сталкиваются с проблемой повышения энергоэффективности и минимизации негативного воздействия на окружающую среду [11, 19]. Технологические процессы сушки играют ключевую роль в производстве, однако они характеризуются значительными энергозатратами. Традиционные методы сушки требуют больших объёмов тепла, часто получаемого за счёт сжигания ископаемого топлива, что приводит к высоким выбросам углекислого газа [15, 17].

При производстве продуктов питания, технология которых предусматривает высушивание сырья или полуфабрикатов, процесс сушки, предусматривающий подбор необходимых параметров сушильного агента при каждом этапе его подготовки, является определяющим качество готовой продукции [7, 8].

Особенно тщательно необходимо планировать процесс сушки при производстве качественных продуктов функционального и лечебно-профилактического назначения.

К продуктам питания, обладающим функциональными свойствами, можно отнести пророщенные семена льна [14, 16]. Процесс проращивания активирует в семенах ферменты, многократно увеличивая содержание витаминов, антиоксидантов и полиненасыщенных жирных кислот (особенно омега-3), а также улучшает их усвояемость [4, 14]. Для повышения удобства потребления, сохранения полезных свойств, такие проростки покрывают термочувствительной оболочкой на основе растительного глицерина [9, 13]. Это позволяет не только создать привлекательную форму, но и защитить нежные проростки от окисления, а также инкапсулировать дополнительные витаминные или вкусовые добавки. Особенно важно вести строгий контроль параметров сушки для пророщенных семян льна, покрытых такой оболочкой [4,15]. При этом следует осуществлять удаление влаги без повреждения хрупкого проростка и без нарушения целостности, прозрачности и функциональных свойств глицериновой пленки [9].

Для этих целей предлагается использование энергоэффективной сушильной установки с применением теплонасосной технологии с рециркуляцией и очисткой воздуха, которая ориентирована именно на такие высокочувствительные продукты [1, 2, 5]. Её ключевое преимущество – непрерывный автоматический контроль параметров входящего воздуха, работы теплообменника, состояния сушильного агента в момент контакта с материалом и показателей выходящего (рециркуляционного) воздуха, что обеспечивает стабильные условия процесса [8, 10, 20].

В связи с этим актуальным является изучение сушки пророщенных семян льна, покрытых оболочкой, с использованием компрессорной теплонасосной установки (ТНУ) и определение оптимальных режимов процесса как с точки зрения температуры сушильного агента, так и с точки зрения гидродинамики кипящего слоя продукта.

Материалы и методы

Исследование процесса сушки проводили на сушильной установке, представленной на рисунке 1.

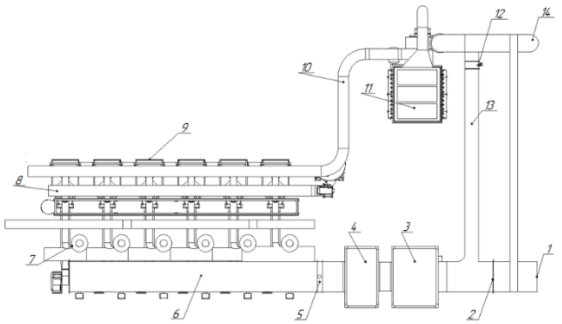


Рисунок 1. Сушильная установка с использованием теплового насоса: 1 – воздухозаборник уличного воздуха, 2 – заслонка регулирования потока входящего воздуха, теплонасосная установка, включающая 3 – испаритель и 4 – конденсатор, 5 – датчик контроля температуры и влажности, 6 – распределительный коллектор, 7 – газовая горелка, 8 – Z-нория, 9 – шесть сушилок, 10 – отводящая труба отработанного сушильного агента, 11 – фильтр-циклон, 12 – заслонка рециркуляционного воздуха, 13 – рециркуляционная труба, 14 – отвод отработанного воздуха

Figure 1. Diagram of the drying agent preparation unit using a heat pump: 1 – outdoor air intake, 2 – intake air flow control valve, heat pump unit (3 – evaporator, 4 – condenser), 5 – temperature and humidity control sensor, 6 – distribution manifold, 7 – gas burner, 8 – Z-noria, 9 – six dryers, 10 – exhaust pipe of the spent drying agent, 11 – cyclone filter, 12 – recirculating air damper, 13 – recirculating pipe, 14 – exhaust air outlet

Как видно по схеме, свежий воздух в систему поступает через воздухозаборник 1, в соответствии с положением заслонки регулирования подачи свежего воздуха 2 и смешивается с рециркуляционным воздухом на пересечении с рециркуляционной трубой 13. После чего воздушная смесь попадает в теплонасосную установку (испаритель 3 и конденсатор 4) где осушается и направляется в распределительный коллектор 6 через датчик контроля влажности и температуры 5. Из коллектора сушильный агент поступает в равных пропорциях в теплообменник, подогреваемый газовой горелкой 7,

при этом достигает необходимой температуры и направляется в шесть сушильных шкафов 9, в которых на поддонах находятся пророщенные семена льна, покрытые термочувствительной оболочкой из растительного глицерина.

В сушильных шкафах 9 осуществляется сушка до требуемой влажности в активном гидродинамическом режиме. Причем скорость сушильного агента подбирается таким образом, чтобы не происходило травмирование семян и не нарушалась сплошность их оболочки.

Отработанный воздух через отводящую трубу 10 поступает в фильтр-циклон 11 и попадает на узел рециркуляции с заслонкой регулирования потока рециркуляционного воздуха 12, частично возвращаясь на подмес со свежим воздухом и частично выходя в атмосферу через отвод отработанного воздуха 14.

В данной сушильной установке основным элементом для подготовки и использования сушильного агента, требуемых режимных параметров, является тепловой насос, работа которого основана на цикле Карно, где хладагент подвергается следующим стадиям: испарение, компрессия, конденсация и дросселирование.

Принцип работы теплового насоса основан на извлечении тепла из отработанного воздуха (который обычно выбрасывается в атмосферу) и передачи его свежему воздуху, который подготавливают к процессу сушки. Это позволяет значительно снизить потребление энергии, поскольку часть тепла используется повторно, а не рассеивается в окружающей среде [6, 11]. Современные теплонасосные установки обеспечивают высокую точность поддержания заданных параметров (температура, влажность, скорость воздушного потока) с минимальными колебаниями, что гарантирует равномерную и щадящую сушку.

Результаты

Использование теплонасосных установок для подготовки воздуха в процессе сушки пророщенных семян льна, покрытых термочувствительной оболочкой из растительного глицерина – это не просто эффективное решение, а настоящая необходимость, обусловленная специфическими требованиями к режиму сушки таких продуктов [8, 15]. Деликатная структура проростков и чувствительная оболочка требуют предельной осторожности при термической обработке [4, 9].

При этом процесс сушки продукта осуществляется таким образом, что удаление влаги происходит без ущерба для его качества, сохраняются вкус, аромат, цвет, форма и, что особенно важно, ценные питательные компоненты. Традиционные методы нагрева воздуха, основанные на прямом сжигании топлива или использовании электрических нагревателей, недостаточно эффективны и часто приводят к нежелательным последствиям. Главная проблема традиционных систем – нестабильность параметров сушильного агента. Резкие скачки температуры, неравномерное распределение тепла и влажности приводят к перегреву отдельных участков продукта, вызывая его подгорание, деформацию или разрушение клеточной структуры. В результате продукт может потерять свой товарный вид: оболочка из растительного глицерина может потерять прозрачность и эластичность, а проростки – потерять свою биологическую активность. Кроме того, неравномерная сушка может привести к образованию внутренних напряжений, что снижает его качество хранения. Потери тепла при использовании традиционных систем также значительны. Значительная часть энергии уходит вместе с выбросами отработанного воздуха в атмосферу.

Теплонасосные установки радикально меняют ситуацию. Они обеспечивают точное и стабильное регулирование температуры и влажности воздуха, что критически важно для продуктов с теплочувствительной оболочкой [11, 12].

Более того, теплонасосные системы позволяют оптимизировать процесс сушки в зависимости от специфики продукта. Например, для пророщенных семян льна с тонкой оболочкой из растительного глицерина можно задать более низкую температуру и повышенную влажность, чтобы исключить их повреждение. Возможности программируемых логических контроллеров (ПЛК) в сочетании с датчиками влажности и температуры позволяют создать индивидуальные режимы сушки для широкого спектра продуктов. Сравнение теплонасосных установок с традиционными системами наглядно демонстрирует их преимущество в плане энергоэффективности и экологичности [6, 11].

Экономия энергии может достигать 70% и более, что существенно снижает операционные расходы. Кроме того, уменьшение выбросов в атмосферу способствует сохранению окружающей среды.

Использование представленной схемы целесообразно для пророщенных семян льна, покрытых термочувствительной оболочкой из растительного глицерина [9]. Производство включает в себя последовательные этапы:

1. Остановка роста проростков: кратковременный (2–4 мин) прогрев пророщенных семян воздухом с температурой 50–60 °С, подаваемым от ТНУ;

2. Дражирование пророщенных семян раствором растительного глицерина;

3. Сушка дражированных пророщенных семян льна в сушилке до содержания влаги 5–10% (целевая 9 ± 1%). Время сушки составляет 25–30 минут.

Температура сушильного агента не должна превышать 45 °С, но и нельзя допускать ниже 35 °С. В противном случае можно перегреть и повредить теплочувствительный слой из растительного глицерина или использовать сушильный агент, который не будет эффективен для обеспечения интенсивности процесса.

Перед подачей сушильного агента непосредственно в сушилку, он подвергается ряду подготовительных этапов [5, 8]. В теплонасосной установке происходит конденсация лишней влаги в испарителе 3 и предварительное подогревание воздуха в конденсаторе 4 для смещения точки росы и предотвращения выпадения конденсата на этапе конечного нагревания до 35–45 °С. Нагревание происходит через теплообменник, подогреваемый газовой горелкой 7 без контакта воздуха с продуктами горения. Поток, проходящий через сушилку, регулирует нагнетающая турбина в соответствии с заданными параметрами. Осуществление данной подготовки позволяет наиболее тонко нагреть до необходимой температуры сушильный агент и достичь максимальной эффективности сушки за счет минимального уровня влажности.

Отработанный сушильный агент выходит из сушилок 9 по отводящей трубе 10 и проходит очистку в фильтре-циклоне 11 для удаления загрязнений и лишней влаги [1, 18]. Таким образом, при выбросе в атмосферу отработанного воздуха через отвод 14 соблюдаются экологические нормы и появляется возможность часть этого воздуха направить на рециркуляцию по трубе 13. Используя рециркуляционный воздух, можно повысить температуру исходного, чистого воздуха и экономить энергетические ресурсы для подготовки сушильного агента, и, так как воздух очищен, не вызывает загрязнений ТНУ и других агрегатов, продлевая их срок службы [3, 12].

Для количественной оценки эффективности системы и поиска баланса между энергосбережением и качеством процесса был проведен эксперимент по определению оптимального коэффициента рециркуляции (КР) отработанного воздуха.

Коэффициент рециркуляции рассчитывался как отношение объемного расхода рециркуляционного воздуха к общему расходу воздуха, подаваемого в ТНУ. Значение КР контролировалось и изменялось путем регулирования положения заслонки 12 на рециркуляционной трубе 13 при постоянном общем расходе, создаваемом нагнетающей турбиной.

Условия для проведения сушки задавались экспериментальным путем: кипящий слой (разрежение -0.5…-0,7 бар); температура сушильного агента: 38–42 °С; целевая влажность продукта: 9 ± 1%.

Таблица 1.

Результаты экспериментального определения оптимального коэффициента рециркуляции

Table 1.

The results of the experimental determination of the optimal recirculation coefficient

Коэффициент рециркуляции, % Recycling rate, %	Удельное энергопотребление, кВт×ч/кг исп. влаги Specific energy consumption, kWh/kg of used moisture	Стабильность кипящего слоя Fluidized bed stability
30	0.70	Отличная | Excellent
45	0.58	Отличная | Excellent
60	0.52	Хорошая | Good
70	0.55	Удовлетворительная (наблюдается рост влажности агента) Satisfactory (there is an increase in the humidity of the agent)
80	0.65	Нестабильная (высокая влажность агента) Unstable (high humidity agent)

Оптимальный диапазон КР составляет 55–65%. При данных значениях достигается минимальное удельное энергопотребление, и обеспечивается экономия в 45–50% на подогреве против режима без рециркуляции.

Основным ограничивающим фактором при КР свыше 65% является стабильность кипящего слоя. Повышенная влажность и плотность воздушного потока приводят к слипанию частиц продукта, что ухудшает равномерность сушки и увеличивает продолжительность цикла.

Эксплуатация установки в данном диапазоне КР позволяет обеспечить максимальную энергоэффективность при сохранении высокого качества процесса и производительности.

В ходе изучения результатов эксперимента по сушке дражированных семян льна на представленной установке, а также на основании параметрического моделирования процесса, были сделаны следующие промежуточные выводы:

– необходим постоянный контроль температуры воздуха для предотвращения перегрева или недосушивания пророщенных семян льна. Оптимальные параметры зависят от толщины оболочки из растительного глицерина;

– получен четкий оптимум КР в диапазоне 55–65%. При данном значении достигается максимальная энергоэффективность процесса сушки (удельное энергопотребление составляет 0,52–0,58 кВт×ч/кг испаренной влаги) при сохранении стабильности кипящего слоя и приемлемой продолжительности цикла. Превышение КР свыше 65% ведет к слипанию частиц продукта и нарушению равномерности сушки;

– регулирование параметров процесса в автоматическом режиме за счет мониторинга изменений показателей свежего воздуха;

– стабильность кипящего слоя является ключевым индикатором корректности работы установки. При этом он зависит от корректно подобранных КР, температуры и скорости потока сушильного агента.

– необходима своевременная замена рукавных фильтров, что позволяет не допустить снижения эффективности очистки или пропуска твердых частиц.

Заключение

Применение сушильной установки с использованием теплонасосных технологий, системы фильтрации и рециркуляции демонстрирует высокую эффективность проведения процесса сушки и его экологическую целесообразность [1, 2, 6]. Особенно актуально использовать данную схему при сушке пророщенных семян льна, покрытых теплочувствительной оболочкой из глицерина, так как ведется непрерывный контроль параметров сушильного агента и корректируется работа оборудования в зависимости от изменяющихся факторов [4, 8, 9].

Проведенное параметрическое моделирование подтвердило, что настройка КР в диапазоне 55–65% является оптимальной, обеспечивая пиковую энергоэффективность и сохранение стабильности кипящего слоя. Технология позволяет не только существенно снизить энергозатраты предприятия, но и обеспечивает высокую скорость и равномерность сушки продукта, что критически важно для сохранения его биологической ценности и товарного вида.

Внедрение подобных схем целесообразно для предприятий, ориентированных на достижение высоких показателей как качественных, так и количественных, оптимизацию и автоматизацию трудно контролируемого процесса сушки функциональных продуктов питания.

Литература

1 Шевцов А.А., Ткач В.В. Вычислительный эксперимент в создании системы виртуального проектирования барабанных сушилок с тепловым насосом // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23

2 Румянцев А.А. Направления развития энергосбережения при вакуумной сушке растительных материалов // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 32–38.

3 Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Повышение энергоэффективности сушильной установки за счет применения термоэлектрических модулей // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18. № 2. С. 68–77. doi: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-68-77

4 Khare B., Sangwan V., Rani V. Influence of sprouting on proximate composition, dietary fiber, nutrient availability, antinutrient, and antioxidant activity of flaxseed varieties // Journal of Food Processing and Preservation. 2021. V. 45. № 4. P. e15344. doi: 10.1111/jfpp.15344

5 Байда Б.Ю. Эксергетическое и энергетическое исследование потенциала применения парокомпрессионного теплового насоса для утилизации бросовой теплоты пищевой промышленности // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации. 2022. С. 202–205.

6 Дадиомов Р.Ю., Шумихин А.Г., Корнилицин Д.К. Существующие подходы к автоматизации процесса сушки материалов в режиме кипящего слоя // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 118–129.

7 Дранников А.В., Сухоруков Е.М. К вопросу применения процесса дражирования для пророщенных семян льна // Техническое обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30–31 октября 2025 г. Минск: БГАТУ, 2025. С. 298–301.

8 Kumar M., Sharma A., Singh O. Energy, exergy and environmental analysis of heat pump drying systems: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2024. V. 434. P. 139876. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139876

9 Joo Y., Chang S., Kim S.I., Oh S. Effect of drying kinetics model on energy efficiency of drying systems // Energy. 2024. V. 291. P. 130390. doi: 10.1016/j.energy.2024.130390

10 Liu Y., Wang X., Chen Z. Microencapsulation of germinated flaxseed extracts: Optimization of coating materials and drying conditions // Food Chemistry. 2024. V. 432. P. 137221. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137221

11 Martinez-Villaluenga C., Peñas E., Frias J. Germinated grains: A comprehensive review on nutritional profile, health benefits and processing // Food Research International. 2023. V. 164. P. 112345. doi: 10.1016/j.foodres.2022.112345

12 Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Nowacka M. Comparison of different drying techniques and their carbon emissions in green peas // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2021. V. 160. P. 108274. doi: 10.1016/j.cep.2020.108274

13 Bangar S.P., Singh A., Trif M. et al. Process Parameter Optimization and Characterization for an Edible Film: Flaxseed Concern // Coatings. 2021. V. 11. № 9. P. 1106. doi: 10.3390/coatings11091106

14 Gregório M.G., Queiroz A.J.M., Figueirêdo R.M.F. et al. Influence of germination on the production of starchy and oleaginous flours: Evaluation of the drying process, thermodynamic properties and bioactive compounds // Applied Food Research. 2025. V. 5. № 2. P. 101096. doi: 10.1016/j.afres.2025.101096

15 Zhang Q., Liu Y., Wang H. Recent advances in cyclone separators for fine particle collection: A review // Powder Technology. 2024. V. 434. P. 119321. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119321

16 Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Nadimi M. et al. Review of advanced drying techniques: a path to lower greenhouse gas emissions in agriculture // Discover Sustainability. 2025. V. 6. P. 423. doi: 10.1007/s43621-025-01217-6

17 Dehghan-Manshadi A., Peighambardoust S.H., Azadmard-Damirchi S., Niakousari M. Effect of infrared-assisted spouted bed drying of flaxseed on the quality characteristics of its oil extracted by different methods // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2020. V. 100. № 1. P. 74–80. doi: 10.1002/jsfa.9995

18 Гусева Т.В., Тихонова И.О., Молчанова Я.П. Повышение ресурсной и экологической эффективности пищевой промышленности // Актуальная биотехнология. 2025. № 1. С. 26–30.

19 Salehi F. Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review // International Journal of Fruit Science. 2021. V. 21. № 1. P. 546–555. doi: 10.1080/15538362.2021.1911741

20 Loemba A.B.T., Kichonge B., Kivevele T. Comprehensive assessment of heat pump dryers for drying agricultural products // Energy Science & Engineering. 2023. V. 11. № 8. P. 2985–3014. doi: 10.1002/ese3.1326

References

1 Shevtsov A.A., Tkach V.V. Computational Experiment in the Creation of a Virtual Design System for Drum Dryers with a Heat Pump. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23 (in Russian).

2 Rumyantsev A.A. Directions for the Development of Energy Saving in Vacuum Drying of Plant Materials. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2024. no. 4. pp. 32–38. (in Russian).

3 Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Increasing the Energy Efficiency of a Drying Unit by Using Thermoelectric Modules. Agricultural Machinery and Technologies. 2024. vol. 18. no. 2. pp. 68–77. doi: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-68-77 (in Russian).

4 Khare B., Sangwan V., Rani V. Influence of sprouting on proximate composition, dietary fiber, nutrient availability, antinutrient, and antioxidant activity of flaxseed varieties. Journal of Food Processing and Preservation. 2021. vol. 45. no. 4. article e15344. doi: 10.1111/jfpp.15344.

5 Baida B.Yu. Exergetic and Energy Study of the Potential of Using a Vapor Compression Heat Pump for Waste Heat Recovery in the Food Industry. In: 65 Years of Donetsk State Technical Institute. Science and Practice. Current Issues and Innovations. 2022. pp. 202–205. (in Russian).

6 Dadiomov R.Yu., Shumikhin A.G., Kornilitsin D.K. Existing Approaches to Automation of the Material Drying Process in a Fluidized Bed Mode. Engineering Bulletin of the Don. 2022. no. 5 (89). pp. 118–129. (in Russian).

7 Drannikov A.V., Sukhorukov E.M. On the Issue of Using the Dragee-Making Process for Germinated Flax Seeds. In: Technical Support for Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Articles of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, October 30–31, 2025. Minsk: BSATU, 2025. pp. 298–301. (in Russian).

8 Kumar M., Sharma A., Singh O. Energy, exergy and environmental analysis of heat pump drying systems: A critical review. Journal of Cleaner Production. 2024. vol. 434. article 139876. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139876.

9 Joo Y., Chang S., Kim S.I., Oh S. Effect of drying kinetics model on energy efficiency of drying systems. Energy. 2024. vol. 291. article 130390. doi: 10.1016/j.energy.2024.130390.

10 Liu Y., Wang X., Chen Z. Microencapsulation of germinated flaxseed extracts: Optimization of coating materials and drying conditions. Food Chemistry. 2024. vol. 432. article 137221. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137221.

11 Martinez-Villaluenga C., Peñas E., Frias J. Germinated grains: A comprehensive review on nutritional profile, health benefits and processing. Food Research International. 2023. vol. 164. article 112345. doi: 10.1016/j.foodres.2022.112345.

12 Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Nowacka M. Comparison of different drying techniques and their carbon emissions in green peas. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2021. vol. 160. article 108274. doi: 10.1016/j.cep.2020.108274.

13 Bangar S.P., Singh A., Trif M. et al. Process Parameter Optimization and Characterization for an Edible Film: Flaxseed Concern. Coatings. 2021. vol. 11. no. 9. article 1106. doi: 10.3390/coatings11091106.

14 Gregório M.G., Queiroz A.J.M., Figueirêdo R.M.F. et al. Influence of germination on the production of starchy and oleaginous flours: Evaluation of the drying process, thermodynamic properties and bioactive compounds. Applied Food Research. 2025. vol. 5. no. 2. article 101096. doi: 10.1016/j.afres.2025.101096.

15 Zhang Q., Liu Y., Wang H. Recent advances in cyclone separators for fine particle collection: A review. Powder Technology. 2024. vol. 434. article 119321. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119321.

16 Kaveh M., Abbaspour-Gilandeh Y., Nadimi M. et al. Review of advanced drying techniques: a path to lower greenhouse gas emissions in agriculture. Discover Sustainability. 2025. vol. 6. article 423. doi: 10.1007/s43621-025-01217-6.

17 Dehghan-Manshadi A., Peighambardoust S.H., Azadmard-Damirchi S., Niakousari M. Effect of infrared-assisted spouted bed drying of flaxseed on the quality characteristics of its oil extracted by different methods. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2020. vol. 100. no. 1. pp. 74–80. doi: 10.1002/jsfa.9995.

18 Guseva T.V., Tikhonova I.O., Molchanova Ya.P. Increasing the Resource and Environmental Efficiency of the Food Industry. Current Biotechnology. 2025. no. 1. pp. 26–30. (in Russian).

19 Salehi F. Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review. International Journal of Fruit Science. 2021. vol. 21. no. 1. pp. 546–555. doi: 10.1080/15538362.2021.1911741.

20 Loemba A.B.T., Kichonge B., Kivevele T. Comprehensive assessment of heat pump dryers for drying agricultural products. Energy Science & Engineering. 2023. vol. 11. no. 8. pp. 2985–3014. doi: 10.1002/ese3.1326.

Сведения об авторах

Алексей В. Дранников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, drannikov@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-3060-8688

Яна П. Домбровская к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yana_dombrovskaya@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0003-2363-7648

Евгений М. Сухоруков аспирант, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, suxorukov99.99@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-1798-2567

Даниил Р. Кулигин студент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kuligin470@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-3133-4467

Information about authors

Alexey V. Drannikov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, drannikov@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-3060-8688

Iana P. Dombrovskaia Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yana_dombrovskaya@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0003-2363-7648

Evgeniy M. Sukhorukov graduate student, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, suxorukov99.99@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-1798-2567

Daniil R. Kuligin student, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuligin470@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-3133-4467

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 15/12/2025	**После редакции** 13/01/2026	**Принята в печать** 23/02/2026

Received 15/12/2025	**Accepted in revised** 13/01/2026	**Accepted** 23/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-114-122 Оригинальная статья/Research article
УДК 681.5: 66.047 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Управление сушильной установкой на основе эксергетического критерия и регрессионных методов

Лариса Г. Тугашова [1] tugashova@yandex.ru 0000-0001-9331-3142

1 Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», ул. Советская, 186а, г. Альметьевск, 423462, Россия

Аннотация. На сегодня вопросы энергосбережения являются актуальными. Сушка материалов в различных отраслях промышленности топливно-энергетического комплекса относится к числу энергоемких технологий. Обзор литературы показал, что предлагаемые мероприятия по повышению эффективности работы сушильных установок, в основном, носят технологический характер. Для усовершенствования работы сушильных установок предлагается подход, основанный на применении регрессионных методов и алгоритмов управления на их основе. Актуальным является применение эксергетического баланса. Так как расчет эксергетического баланса является сложным и трудоемким, то предлагается на его основе построить упрощенную модель. Для получения математического описания сушильной установки использованы модели, построенные на уравнениях баланса массы и эксергии. Приведена схема распылительной сушильной установки замкнутого типа. Составлена модель сушильной установки на основе эксергетического баланса. Получены результаты расчета эксергии топливного газа, термомеханической эксергии продуктов горения, а также эксергии на испарение влаги. Предложена методика, состоящая из последовательности шагов: расчет материального и теплового балансов, расчет эксергетического баланса, формирование обучающей выборки на основе балансовой модели, построение упрощенной регрессионной зависимости между входными и выходными параметрами, оптимизация с учетом ограничений на показатели качества, разработка алгоритмов управления сушильной установкой. Выбраны методы, необходимые для выполнения шагов методики. Для вывода регрессионной зависимости предложено применение ротатабельного центрального композиционного плана. Предложен критерий оптимизации – эксергетический КПД газовой топки и сушильной камеры. Получена регрессионная зависимость эксергетического КПД сушильной камеры от температуры сушильного агента на входе, влажности поступающей суспензии и расхода топливного газа. Значение коэффициента детерминации составляет 0,96, что свидетельствует об адекватности полученной модели исходным данным. Приведена структурная схема управления сушильной установкой с учетом выбранных управляющих и возмущающих параметров. Предложенная методика может применяться для определения оптимальных параметров управления сушильной установкой. Дальнейшие исследования могут быть направлены на детализацию и программную реализацию данной методики.

Ключевые слова: эксергия, топливо, суспензия, баланс, эксперимент, управление.

Drying Plant Management Based on Exergy Criterion and Regression Methods

Larisa G. Tugashova [1] tugashova@yandex.ru 0000-0001-9331-3142

1 Almetyevsk State Technological University «Higher School of Petroleum», 186a, Sovetskaya st., Almetievsk, 423462, Russia

Abstract. Today, energy-saving issues are relevant. Drying of materials in various industries of the fuel and energy complex is one of the energy-intensive technologies. The literature review showed that the proposed measures to improve drying plants' efficiency are mainly technological. To improve the drying plants' operation, we propose an approach using regression methods and control algorithms based on them. It is relevant to apply the exergy balance. Since the calculation of exergy balance is complex and time-consuming, we propose building a simplified model based on it. To obtain a mathematical description of a drying unit, we use models based on the equations of mass balance and exergy. A diagram of a spray closed-type drying unit is given. We provide a model of a drying plant based on exergy balance. The results of calculating the exergy of fuel gas, thermomechanical exergy of combustion products, and exergy for moisture evaporation were obtained. The proposed methodology consists of a sequence of steps: calculating material and thermal balances, calculating the exergy balance, providing a training sample based on a balance model, constructing a simplified regression relationship between input and output parameters, optimizing the model taking into account restrictions on quality indicators, and developing control algorithms for the drying plant. The selected methods allow completing the above steps. To derive the regression dependence, we use a rotatable central compositional plan. An optimization criterion is the exergy efficiency of a gas furnace and a drying chamber. We obtained the regression dependence of the exergy efficiency of the drying chamber on the temperature of the drying agent at the inlet, the humidity of the incoming slurry, and the fuel gas consumption. The coefficient of determination is 0,96, indicating that the model adequately fits the original data. A block diagram of the drying unit control is given, taking into account the selected control and disturbing parameters. The proposed method can be used to determine the optimal control parameters of the drying unit. Further research may be aimed at the details and programmatic implementation of this technique.

Keywords: exergy, fuel, suspension, balance, experiment, management.

Для цитирования

Тугашова Л.Г. Управление сушильной установкой на основе эксергетического критерия и регрессионных методов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 114–122. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-114-122

For citation

Tugashova L.G. Drying Plant Management Based on Exergy Criterion and Regression Methods. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 114–122. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-114-122

© 2026, Тугашова Л.Г. / Tugashova L.G.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Процессы сушки различных материалов являются энергозатратными. Проведенный анализ научной литературы [1–19] показал, что существует достаточное количество работ по применению термодинамических методик к действующим установкам сушки. В основном, предлагаются усовершенствования технологического характера. Авторами разработаны различные математические и имитационные модели процесса сушки, а также рекомендации по корректировке технологических параметров процесса, модернизации оборудования для снижения потерь, оптимизации режимов работы.

Процесс сушки различных материалов характеризуется сложными взаимосвязями параметров и является многомерным. Для анализа работы сушильных установок выполняются материальные, энергетические (тепловые) и эксергетические балансы. Эксергетический КПД ниже энергетического из-за скрытых необратимых потерь. В этом случае учитывается качество видов энергии.

Для повышения эффективности функционирования распылительной сушильной установки замкнутого типа предложена методика, позволяющая перейти от расчета эксергетического баланса и КПД к упрощенной модели. Такой переход предлагается осуществить методом с применением ротатабельного центрального композиционного плана (РЦКП). Затем с помощью матрицы планирования определяется регрессионная модель, связывающая эксергетические КПД элементов сушильной установки с управляющими, возмущающими параметрами и показателями качества осушенного материала. Полученные результаты применяются для регулирования параметров технологического процесса.

Материалы и методы

Сушильные установки по конструкции бывают следующих типов: барабанные, распылительные, ленточные, трубные и другие. Они различаются режимом работы (периодического и непрерывного действия), видом сушильного агента (воздух, инертные или дымовые газы, насыщенный или перегретый пар), способом нагрева сушильного агента и способом подвода тепла к материалу.

На сегодня в различных отраслях топливно-энергетического комплекса распространены конвективные сушилки. Например, в секции сушки установки быстрого пиролиза древесной биомассы сушильным агентом являются дымовые газы, поступающие из теплогенератора. На установке получения микробного белка из метана сушильным агентом является азот или воздух. В данном случае применяется установка замкнутого типа.

Схема распылительной сушильной установки замкнутого типа состоит из следующих элементов (рисунок 1).

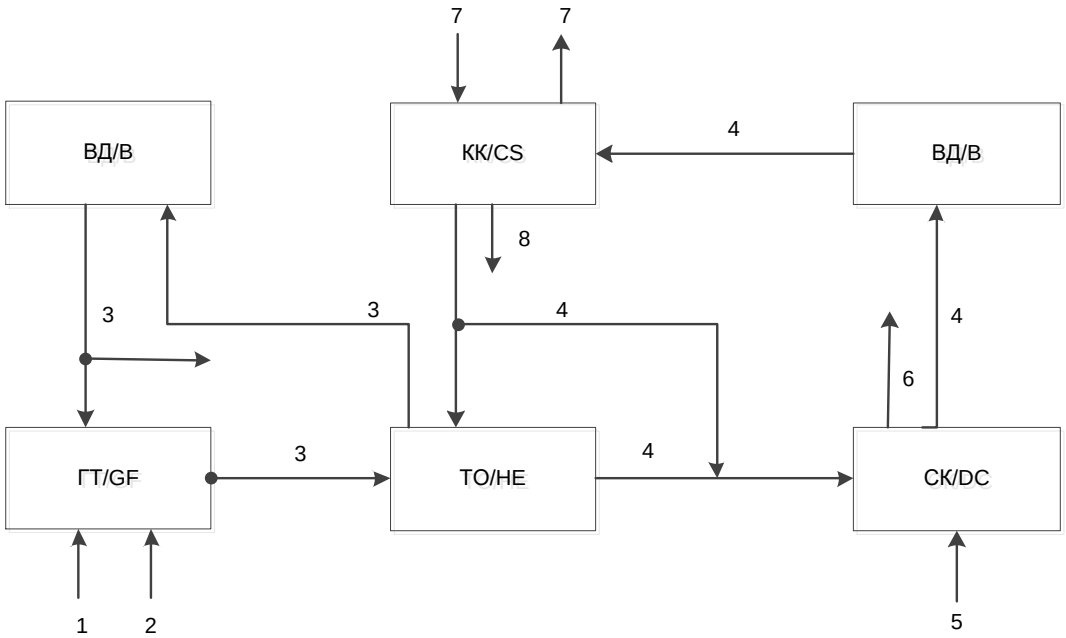


Рисунок 1. Схема распылительной сушильной установки замкнутого типа: ГТ – газовая топка; ТО – теплообменник; СК – сушильная камера; ВД – воздуходувка; КК – конденсатор с каплеотделителем; 1 – природный газ; 2 – воздух; 3 – дымовые газы; 4 – сушильный агент; 5 – бактериальная суспензия; 6 – осушенная суспензия (биомасса); 7 – оборотная вода; 8 – сконденсированная влага

Figure 1. Diagram of a spray closed-type drying unit: GF – gas furnace; HE – heat exchanger; DC – drying chamber; B – blower; CS – condenser with a drip separator; 1 – natural gas; 2 – air; 3 – flue gases; 4 – drying agent; 5 – bacterial suspension; 6 – dried suspension (biomass); 7 – recycled water; 8 – condensed moisture

Продукцией установки получения микробного белка из метана является высушенная суспензия (биомасса). Сушильная установка предназначена для высушивания биомассы и получения готовой продукции в виде порошка. Процесс осуществляется в контуре замкнутого цикла в сушильной камере распылительного типа. Содержание влаги в готовом продукте составляет не более 10% масс.

В качестве сушильного агента 4 используется азот или воздух, который нагревается в теплообменнике ТО до температуры 180 °С и подается в сушильную камеру СК. Бактериальная суспензия 5 перекачивается к форсункам, установленным в верхней части распылительной камеры. При контакте с сушильным агентом, влага, содержащаяся в каплях суспензии, испаряется. Осушенная суспензия 6 в виде порошка оседает на дно распылительной камеры. Часть осушенной суспензии 6, уносимой с сушильным агентом, улавливается в циклоне и направляется в общий поток.

Сушильный агент 4 с испаренной влагой поступает в систему рециркуляции. В конденсаторе с каплеотделителем КК сушильный агент охлаждается до температуры 30 °С оборотной водой 7, из него удаляется сконденсированная влага 8. Затем поток азота или воздуха направляется в теплообменник ТО и частично смешивается с выходным потоком ТО для поддержания необходимой температуры на входе в сушильную камеру СК. Перемещение сушильного агента в контуре рециркуляции осуществляется воздуходувками ВД.

Топливом для газовой топки ГТ является природный газ 1. Для поддержания процесса горения поступает воздух 2. Дымовые газы 3, пройдя через теплообменник ТО, частично возвращаются в газовую топку ГТ, где смешиваются с горячими продуктами сгорания. Другая часть дымовых газов 3 уходит в атмосферу через дымовую трубу. Для эффективного режима работы газовой топки ГТ важным параметром является коэффициент избытка воздуха.

В процессе сушки участвуют сушильный агент, материал и испаряющаяся из материала влага.

На первом шаге выполняются материальный и тепловой балансы установки. К числу основных определяемых материальных потоков относятся количество удаляемой в единицу времени влаги U и расход высушенного материала. Согласно закону сохранения вещества масса влажного материала (бактериальной суспензии) G_1, входящего в сушильную камеру в единицу времени, должна быть равна сумме массы высушенного материала (осушенной суспензии) G_2, выходящего из сушильной камеры в единицу времени, и массы испаренной влаги U.

Материальный баланс имеет следующий вид:

$$G_1 = G_2 + U. \quad (1)$$

Масса испаренной влаги определяется следующим образом:

$$U = G_1 \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}. \quad (2)$$

Массу высушенного материала на основе массы сырого можно определить:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2}, \quad (3)$$

где W_1 – начальное влагосодержание, выраженное в процентах; W_2 – конечное влагосодержание, выраженное в процентах.

Материальный и тепловой балансы составляются исходя из законов сохранения материи и энергии. Под потерями в этих балансах подразумевается переход вещества из системы в окружающую среду. При необратимых процессах происходит ухудшение качеств энергии и необратимые потери эксергии.

На втором шаге выполняется эксергетический расчет. В процессе тепломассообмена меняется не только количество энергии, но и ее качество. В связи с этим для оценки эффективности процесса сушки применим эксергетический анализ, основанный на втором законе термодинамики.

Удельная эксергия топлива (природного газа) определяется по формуле [1]:

$$e_{\text{Т}} = 1{,}04 \cdot Q^{\text{Р}}_{\text{н}}, \quad (4)$$

где $Q^{\text{Р}}_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания рабочего топлива, кДж/м^3.

Низшая теплота сгорания рабочего топлива определяется по формуле [20]:

$$Q^{\text{Р}}_{\text{н}} = 358\text{CH}_4 + 640\text{C}_2\text{H}_6 + 930\text{C}_3\text{H}_8 + 1200\text{C}_4\text{H}_{10},$$

где CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10} – объемное содержание метана, этана, пропана, бутана.

В расчете эксергии горения определяются термомеханическая и химическая эксергия.

Термомеханическая составляющая продуктов сгорания определяется по формуле [21]:

$$e_{\text{ТМ}} = (h - h_0) - T_0 (S - S_0), \quad (5)$$

$$h = \sum_{i=1}^{4} (y_i \cdot c_{pi}) \cdot t,$$

$$S = \sum_{i=1}^{4} y_i \cdot s_i,$$

где h – энтальпия газов (продуктов сгорания), кДж/кг; S – энтропия газов, кДж / (кг×К); y_i – массовая доля газов; c_{pi} – теплоемкость газов, кДж/кг К; t – температура, ˚С.

Эксергетический КПД газовой топки вычисляется по формуле:

$$\eta_{\text{ЭКС1}} = \frac{D \cdot \Delta e_{\text{ТМ}}}{B \cdot e_{\text{Т}}}, \quad (6)$$

где D – расход продуктов сгорания, кг/ч; B – расход топливного газа, м^3/ч.

Полезной статьей эксергетических затрат является эксергия на испарение влаги из материала при соответствующей температуре испарения.

Полезные затраты эксергии на испарение влаги [3]:

$$\Delta e_{\text{ИСП}} = \left(h_{\text{П}} - h_{\text{К}}\right) - T_0\left(S_{\text{П}} - S_{\text{К}}\right), \quad (7)$$

где h – энтальпия водяного пара и воды, кДж/кг; T_0 – температура окружающей среды, К; S – энтропия водяного пара и воды, кДж/(кг×К).

Параметры h и S находятся при температуре мокрого термометра $t_{\text{М.Т.}}$ [22], определяемой по известной температуре t и влагосодержании сушильного агента x:

$$h_{\text{ВЛ.В.}} = \left(1,01 + 1,97 \cdot x\right) \cdot t + 2493 \cdot x,$$

$$t_{\text{М.Т.}} = 43,5 \cdot lg\left(h_{\text{ВЛ.В.}}\right) - 56,6,$$

где $h_{\text{ВЛ.В.}}$ – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг.

Эксергетический КПД сушильной установки определяется следующим образом:

$$\eta_{\text{ЭКС2}} = \frac{U \cdot \Delta e_{\text{ИСП}}}{B \cdot e_{\text{Т}}}. \quad (8)$$

Статьи потерь следующие. Эксергия топлива, израсходованная на нагрев влаги и на перегрев паров, относится к потерям. Другие виды потерь в сушильной камере: на нагрев материала, вследствие необратимости внешнего и внутреннего теплообмена, потери в газовой топке, в окружающую среду, эксергия сушильного агента на выходе сушильной установки.

Третьим шагом является определение зависимости между входными (управляющими и возмущающими) параметрами, показателями качества и выходным критерием. В нашем случае входными параметрами принимаются коэффициент избытка воздуха, расход топлива, температура сушильного агента на входе в сушильную камеру, влагосодержание суспензии на входе и выходе, выраженное в процентах. Выходным критерием является эксергетический КПД. Определение такой зависимости предлагается выполнять с применением РЦКП.

При применении РЦКП по общеизвестным формулам определяется центр плана, шаг варьирования, звездное плечо, уровни варьирования. Затем выполняется построение матрицы планирования с учетом найденных ранее параметров РЦКП. Значения выходного параметра определяются по модели сушильной установки, построенной на основе эксергетического баланса. Затем осуществляется проверка адекватности полученной модели.

В РЦКП существует заранее заданная структура модели. Вид структуры модели определен квадратичной зависимостью.

На четвертом шаге с применением полученной регрессионной зависимости критерия от факторов с учетом ограничений на технологические параметры, показатели качества выходного продукта и действующих возмущений решается задача оптимизации. Применяются методы многокритериальной оптимизации, метод неопределенных множителей Лагранжа.

В методе неопределенных множителей Лагранжа задача сводится к максимизации целевой функции $f(x)$ при наличии ограничений в виде равенств [23]:

$$F\left(x, \lambda, u\right) = f\left(x\right) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \cdot \left(g_i\left(x\right) + u_i^2 - b_i\right), \quad (9)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа; m – число ограничений.

Ограничения в виде неравенств преобразованы в ограничения в виде равенств путем добавления к каждому из них неотрицательной ослабляющей переменной u^2:

$$g_i\left(x\right) + u_i^2 - b_i = 0.$$

Пятый шаг методики состоит в использовании полученных оптимальных значений управляющих параметров в системе управления сушильной установкой. При этом управляющие параметры определяются одновременно. В случае наличия возмущающих параметров предлагается применение систем каскадного, каскадно-комбинированного и экстремального регулирования.

Результаты и обсуждение

В качестве исходных данных приняты следующие параметры: температура сушильного агента при входе в сушильную камеру t_1 = 180 °С; температура окружающей среды t_0 = 0 °С; температура подаваемой бактериальной суспензии θ_1 = 20 °С; влагосодержание сушильного агента, подаваемого в сушильную камеру x_1 = 0,02 кг/кг; начальная влажность суспензии W_1 = 87%; конечная влажность суспензии W_2 = 10%; расход топливного газа B = 68 м^3/ч.

Производительность сушильной установки по испаренной влаге составляет 808,5 кг/ч, а производительность по готовому продукту (биомассе) – 136,5 кг/ч (формулы (2) и (3)).

Состав природного газа приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Состав природного газа

Table 1.

Natural gas composition

Компонент Component	Содержание, % об. Percent, % vol.
Углекислый газ Carbon dioxide gas	0,02
Кислород | Oxygen	0
Азот | Nitrogen	1,6
Метан | Methane	94,4
Этан | Ethan	2,9
Пропан | Propane	0,61
Изобутан | Iso-butane	0,23
Н-бутан | N-butane	0,24

Расчеты параметров выполнены с применением программных средств Matlab и Excel. Теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг топлива, рассчитано по общепринятой методике и составляет 16,78 кг/кг топлива.

Действительное количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг топлива при коэффициенте избытка воздуха 1,08 составляет 18,12 кг/кг топлива.

Удельная эксергия топлива (природного газа) по формуле (4) с учетом объемного состава природного газа из таблицы 1 составляет 38253,8 кДж/м^3.

В таблице 2 приведены результаты расчета энтальпии, энтропии и состава продуктов сгорания.

Таблица 2.

Результат расчета состава продуктов сгорания, энтальпии и энтропии

Table 2.

Result of calculating the composition of combustion products, enthalpy and entropy

Продукты сгорания Combustion products	CO_2	H_2O	O_2	N_2	Сумма Addition
Состав продуктов сгорания, y_i | Composition of combustion products, y_i	0,1410	0,1115	0,0181	0,7312	1
Энтальпия при 0 ˚С, h_i^0, кДж/кг | Enthalpy at 0 ˚С, h_i^0, kJ/kg	192,10	502,90	247,70	283,30	
Произведение, $y_i \times h_i^0$ | Multiplication, $y_i \times h_i^0$	27,10	56,12	4,51	207,15	294,87
Энтальпия при 700 ˚С, h_i^{700}, кДж/кг | Enthalpy at 700 ˚С, h_i^0, kJ/kg	939,10	1931,20	950,90	1044,00	
Произведение, $y_i \times h_i^{700}$ | Multiplication, $y_i \times h_i^{700}$	132,48	215,52	17,30	763,36	1128,65
Энтропия при 0 ˚С, s_i^0, кДж / (кг×К) | Entropy at 0 ˚С, s_i^0, kJ/(kg×K)	4,78	10,31	6,33	6,74	
Произведение, $y_i \times s_i^0$ | Multiplication, $y_i \times s_i^0$	0,67	1,15	0,12	4,93	6,87
Энтропия при 700 ˚С, s_i^{700}, Дж / (кг×К) | Entropy at 700 ˚С, s_i^{700}, kJ/(kg×K)	6,08	12,85	7,58	8,11	
Произведение, $y_i \times s_i^{700}$ | Multiplication, $y_i \times s_i^{700}$	0,86	1,43	0,14	5,93	8,36

Термомеханическая эксергия продуктов сгорания по формуле (5) с учетом таблицы (2) составляет 427,61 кДж/кг.

Эксергетический КПД газовой топки, вычисленный по формуле (6), равен 52,56%.

Полезные затраты эксергии на испарение влаги определяются по формуле (7) и составляют 211,2578 кДж/кг испаренной влаги. Эксергетический КПД сушильной установки равен 9,56% (формула (8)).

Возмущающим воздействием является влажность суспензии на входе в сушильную камеру. Показателем качества является влажность суспензии на выходе. При составлении матрицы планирования данный показатель принят равным 10%. Определена регрессионная зависимость эксергетического КПД сушильной камеры от следующих факторов: $X1$ – расход топлива (управляющий параметр); $X2$ – температура сушильного агента на входе (управляющий параметр); $X3$ – влажность поступающей суспензии (возмущающий параметр).

Для каждого фактора задан физический диапазон изменения. Полученные значения параметров РЦКП приведены в таблице 3. Матрица планирования и результаты сведены в таблицу 4.

Таблица 3.

Параметры РЦКП

Table 3.

Parameters of the rotatable central compositional plan (RCCP)

Факторы Factors	Основной уровень Main level	Интервал варьирования Variation interval	Верхний уровень, +1 Upper level, +1	Нижний уровень, -1 Lower level, -1	Верхняя звездная точка, +1,68 Upper star point, +1,68	Нижняя звездная точка, -1,68 Lower star point, -1,68
$X1$	68	5	73	63	76,41	59,59
$X2$	180	18	198	162	210,27	149,73
$X3$	87	5	92	82	95,41	78,59

Таблица 4.

Матрица планирования

Table 4.

Planning matrix

N	Части РЦКП Parts of the RCCP	Натуральные значения факторов Natural factor values			Кодированные значения факторов Coded factor values			Эксергетический КПД сушильной камеры из баланса $\eta_{ЭКС2}$, % Exergy efficiency of the drying chamber from the balance η_{EX2}, %	Эксергетический КПД сушильной камеры по модели y, % Exergy efficiency of the drying chamber to the model y, %
		Расход топлива, м³/ч Fuel gas consumption, m³/hr	Температура СА на входе, ˚С Temperature of the drying agent at the inlet, ˚С	Влажность поступающей суспензии, % Humidity of the incoming slurry, %	$X1$	$X2$	$X3$		
1	Ядро плана Core of the plan	73	198	92	1	1	1	9,89	10,07
2		63	198	92	-1	1	1	11,46	11,66
3		73	162	92	1	-1	1	8,76	9,05
4		63	162	92	-1	-1	1	10,15	10,47
5		73	198	82	1	1	-1	8,68	8,84
6		63	198	82	-1	1	-1	10,06	10,16
7		73	162	82	1	-1	-1	7,69	7,88
8		63	162	82	-1	-1	-1	8,91	9,12
9	Звездные Точки Star points	76,41	180	87	1,68	0	0	8,71	8,53
10		68	210,27	87	0	1,68	0	10,50	10,41
11		68	180	95,41	0	0	1,68	10,85	10,62
12		59,59	180	87	-1,68	0	0	11,16	10,92
13		68	149,73	87	0	-1,68	0	9,03	8,68
14		68	180	78,59	0	0	-1,68	8,72	8,52
15	Нулевые точки Zero points	68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
16		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
17		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
18		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
19		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
20		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80

С использованием известных формул для расчета коэффициентов уравнения регрессии получена следующая модель:

$$y = 9{,}79622 \cdot X0 - 0{,}70966 \cdot X1 + 0{,}51541 \cdot X2 + \\ + 0{,}62261 \cdot X3 - 0{,}04198 \cdot X12 - 0{,}04516 \cdot X13 + \\ + 0{,}03708 \cdot X23 - 0{,}02643 \cdot X1^2 - 0{,}08823 \cdot X2^2 - \\ - 0{,}08023 \cdot X3^2. \quad (10)$$

Значимость коэффициентов в модели (10) проверялась по критерию Стьюдента. Все коэффициенты значимы, следовательно, не исключаются из уравнения. Оценка адекватности регрессионной зависимости определялась по коэффициенту детерминации. Значение коэффициента детерминации составляет 0,96, следовательно, полученная модель (10) адекватна исходным данным.

Аналогичным образом можно построить регрессионные модели для эксергетического КПД газовой топки (6) в зависимости от расхода топлива, коэффициента избытка воздуха, температуры смешанных продуктов сгорания. Также возможно составить подобные модели для теплообменных аппаратов сушильной установки. Затем решается задача оптимизации вида (9).

В качестве целевой функции в выражении (9) выступают сумма или произведение полученных моделей для эксергетических КПД элементов сушильной установки. Ограничениями являются значения показателей качества продукции и технологических параметров. Значения управляющих параметров, найденные в результате решения оптимизации, используются в качестве уставок регуляторов системы управления сушильной установкой (рисунок 2). Они пересчитываются при изменении возмущающих параметров.

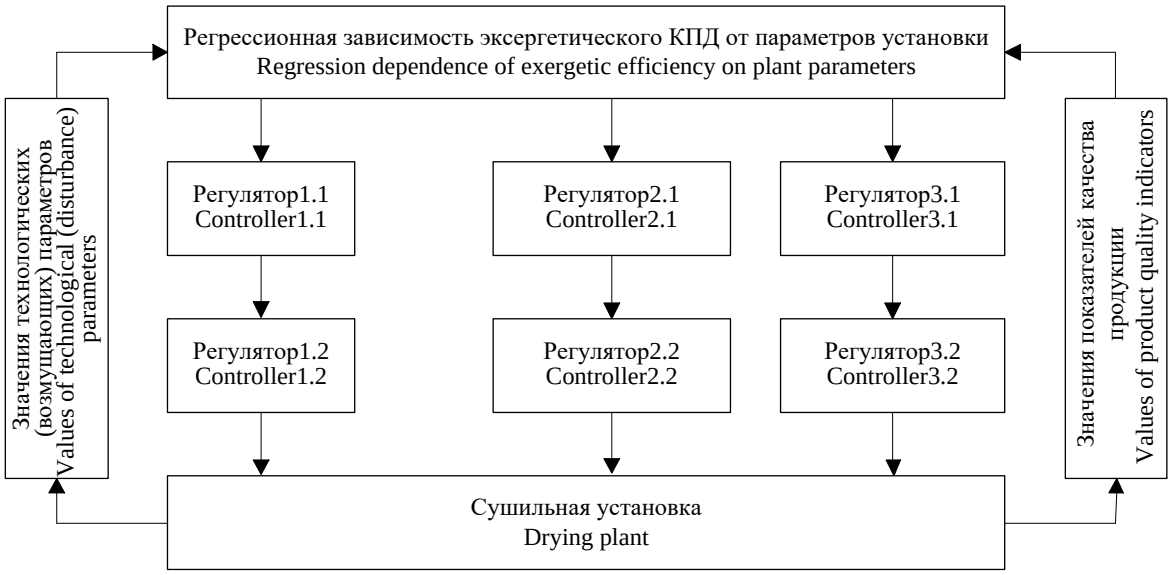


Рисунок 2. Структурная схема системы управления сушильной установкой

Figure 2. Block diagram of the drying unit control

При управлении сушильной установкой как многомерным объектом на основе регрессионной зависимости эксергетического КПД от параметров установки предлагается применять следующие регуляторы:

– расхода топливного газа (Р1.1);

– соотношения топливный газ/воздух (Р1.2);

– температуры сушильного агента на входе (Р2.1);

– расхода рециркулирующего сушильного агента (Р2.2);

– температуры смешанных продуктов сгорания (Р31.1);

– расхода рециркулирующих продуктов сгорания (Р3.2).

Заключение

Эксергетический КПД учитывает необратимость процессов горения, тепломассопереноса. Полезные затраты эксергии на испарение влаги имеют низкое значение. Повышение эффективности работы установки может быть связано с определением оптимальных параметров работы газовой топки и сушильной камеры, таких как расход топливного газа, коэффициент избытка воздуха, температура сушильного агента на входе в сушильную камеру, температуры смешанных продуктов сгорания. При этом необходимо учитывать ограничения на показатели качества выходного продукта (влажность) и наличие возмущающих факторов (влажность поступающей суспензии). Дальнейшие исследования могут быть направлены на детализацию расчетов по приведенным шагам предлагаемой методики, анализ эксергетических потерь, решение задачи многокритериальной оптимизации и программную разработку алгоритмов управления сушильной установкой.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение № 9/2025 ПД-ВШН).

Литература

1 Сажин Б.С., Булеков А.П. Эксергетический метод в химической технологии. М.: Химия, 1992. 204 с.

2 Луканин П.В., Казаков В.Г., Самойлов В.Н. Эксергетический анализ сушильной части бумагоделательной машины // Промышленная энергетика. 2011. № 1. С. 35–38.

3 Rudobashta S.P., Zueva G.A., Babicheva E.L. Кинетический расчет сушилки периодического действия с псевдоожиженным слоем // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. № 6. С. 109–118. doi: 10.6060/ivkkt.20246706.7065

4 Silva S.R., da Costa Jr E.F., Sarrouh B., da Costa A.O.S. Exergetic analysis and optimization of process variables in xylitol production: Maximizing efficiency and sustainability in biotechnological processes // Bioresource Technology. 2024. V. 391. P. 129910. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129910

5 Пахомов А.Н., Гатапова Н.Ц., Пахомова Ю.В. Использование алгоритма выделения слоев в расчете кинетики сушки дисперсных продуктов на подложках // Вестник Тамбовского ГТУ. 2022. Т. 28. № 2. С. 260–268.

6 Тугашова Л.Г., Затонский А.В. Снижение энергетических затрат при управлении установкой ректификации нефти // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. Т. 20. № 1. С. 120–132.

7 Тугашова Л.Г. Оптимизация процесса ректификации нефти по критерию отбора светлых нефтепродуктов // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76. № 8. С. 347–352.

8 Мосюрова А.В., Меньшутина Н.В. Последние достижения в области распылительной сушки // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 207–216. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-207-216

9 Максименко Ю.А., Неваленная А.А., Пшеничная Н.Э., Теличкин Р.С. Инновационные решения для совершенствования конструкции распылительной сушильной установки // Современная наука и инновации. 2020. № 2. С. 61–65. doi: 10.33236/2307-910X-2020-2-30-57-60

10 Samborska K., Poozesh S., Barańska A. et al. Innovations in spray drying process for food and pharma industries // Journal of Food Engineering. 2022. V. 321. P. 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960

11 Lei Z., O'Neill T., Langrish T. The Application of Pinch Technology to a Novel Closed-Loop Spray Drying System with a Condenser and Reheater // Entropy. 2024. V. 26. № 9. P. 809. doi: 10.3390/e26090809

12 Patel S.K., Gupta A.K., Bade M.H. Primary energy and exergy analysis of a spray dryer for the application of industrial effluents: a case study // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2022. V. 39. № 1. P. 251–272. doi: 10.1007/s43153-021-00197-0

13 Zeng Z., Li B., Han C. et al. An Exergoeconomic Analysis of a Gas-Type Industrial Drying System of Black Tea // Entropy. 2022. V. 24. № 5. P. 655. doi: 10.3390/e24050655

14 Johnson P.W., Langrish T.A.G. Interpreting Exergy Analysis as Applied to Spray Drying Systems // International Journal of Exergy. 2020. V. 31. № 2. P. 120–149. doi: 10.1504/IJEX.2020.105479

15 Lei Z., Langrish T. Energy and exergy analysis for a laboratory-scale closed-loop spray drying system: Experiments and simulations // Drying Technology. 2024. V. 43. № 1–2. P. 228–247. doi: 10.1080/07373937.2024.2387840

16 Poozesh S., Karam M., Akafuah N., Wang Y. Integrating a model predictive control into a spray dryer simulator for a closed-loop control strategy // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 170. P. 121010. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121010

17 Роднищев С.В., Дмитриев Д.В., Бакин И.А. и др. Оптимизация режимов сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 95–105. doi: 10.20914/2310-1202-2025-2-95-105

18 Шевцов А.А., Ткач В.В. Вычислительный эксперимент в создании системы виртуального проектирования барабанных сушилок с тепловым насосом // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23

19 Гришко Б.М., Трубаев П.А. Практикум по расчету горения топлива: учебное пособие. Вологда; М.: Инфра Инженерия, 2023. 140 с.

20 Эрдман С.В. Техническая термодинамика и теплотехника: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2006. 87 с.

21 Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984. 80 с.

22 Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.

References

1 Sazhin B.S., Bulekov A.P. Exergetic Method in Chemical Technology. Moscow: Khimiya, 1992. 204 p. (in Russian).

2 Lukanin P.V., Kazakov V.G., Samoilov V.N. Exergetic Analysis of the Drying Section of a Paper Machine. Industrial Power Engineering. 2011. no. 1. pp. 35–38. (in Russian).

3 Rudobashta S.P., Zueva G.A., Babicheva E.L. Kinetic Calculation of a Batch Fluidized Bed Dryer. News of Universities. Chemistry and Chemical Technology. 2024. vol. 67. no. 6. pp. 109–118. doi: 10.6060/ivkkt.20246706.7065 (in Russian).

4 Silva S.R., da Costa Jr E.F., Sarrouh B., da Costa A.O.S. Exergetic analysis and optimization of process variables in xylitol production: Maximizing efficiency and sustainability in biotechnological processes. Bioresource Technology. 2024. vol. 391. article 129910. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129910.

5 Pakhomov A.N., Gatapova N.T., Pakhomova Yu.V. Using the Layer Extraction Algorithm in Calculating the Drying Kinetics of Disperse Products on Substrates. Bulletin of Tambov State Technical University. 2022. vol. 28. no. 2. pp. 260–268. (in Russian).

6 Tugashova L.G., Zatonsky A.V. Reduction of Energy Costs in Controlling an Oil Rectification Unit. Bulletin of SUSU. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics. 2020. vol. 20. no. 1. pp. 120–132. (in Russian).

7 Tugashova L.G. Optimization of the Oil Rectification Process According to the Criterion of Light Oil Products Recovery. Automation. Modern Technologies. 2022. vol. 76. no. 8. pp. 347–352. (in Russian).

8 Mosyurova A.V., Menshutina N.V. Recent Advances in Spray Drying. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 207–216. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-207-216 (in Russian).

9 Maksimenko Yu.A., Nevalennaya A.A., Pshenichnaya N.E., Telichkin R.S. Innovative Solutions for Improving the Design of a Spray Drying Plant. Modern Science and Innovation. 2020. no. 2. pp. 61–65. doi: 10.33236/2307-910X-2020-2-30-57-60 (in Russian).

10 Samborska K., Poozesh S., Barańska A. et al. Innovations in spray drying process for food and pharma industries. Journal of Food Engineering. 2022. vol. 321. article 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960.

11 Lei Z., O'Neill T., Langrish T. The Application of Pinch Technology to a Novel Closed-Loop Spray Drying System with a Condenser and Reheater. Entropy. 2024. vol. 26. no. 9. article 809. doi: 10.3390/e26090809.

12 Patel S.K., Gupta A.K., Bade M.H. Primary energy and exergy analysis of a spray dryer for the application of industrial effluents: a case study. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2022. vol. 39. no. 1. pp. 251–272. doi: 10.1007/s43153-021-00197-0.

13 Zeng Z., Li B., Han C. et al. An Exergoeconomic Analysis of a Gas-Type Industrial Drying System of Black Tea. Entropy. 2022. vol. 24. no. 5. article 655. doi: 10.3390/e24050655.

14 Johnson P.W., Langrish T.A.G. Interpreting Exergy Analysis as Applied to Spray Drying Systems. International Journal of Exergy. 2020. vol. 31. no. 2. pp. 120–149. doi: 10.1504/IJEX.2020.105479.

15 Lei Z., Langrish T. Energy and exergy analysis for a laboratory-scale closed-loop spray drying system: Experiments and simulations. Drying Technology. 2024. vol. 43. no. 1–2. pp. 228–247. doi: 10.1080/07373937.2024.2387840.

16 Poozesh S., Karam M., Akafuah N., Wang Y. Integrating a model predictive control into a spray dryer simulator for a closed-loop control strategy. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. vol. 170. article 121010. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121010.

17 Rodnishchev S.V., Dmitriev D.V., Bakin I.A. et al. Optimization of Drying Modes of Quinoa Seeds in a Drum Dryer with a Channel Nozzle. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 95–105. doi: 10.20914/2310-1202-2025-2-95-105 (in Russian).

18 Shevtsov A.A., Tkach V.V. Computational Experiment in the Creation of a Virtual Design System for Drum Dryers with a Heat Pump. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23 (in Russian).

19 Grishko B.M., Trubaev P.A. Workshop on Fuel Combustion Calculation: A Textbook. Vologda; Moscow: Infra Inzheneriya, 2023. 140 p. (in Russian).

20 Erdman S.V. Technical Thermodynamics and Heat Engineering: A Textbook. Tomsk: TPU, 2006. 87 p. (in Russian).

21 Rivkin S.L., Aleksandrov A.A. Thermodynamic Properties of Water and Water Vapor: A Reference Book. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 80 p. (in Russian).

22 Bundy B. Optimization Methods. An Introductory Course. Translated from English. Moscow: Radio i svyaz', 1988. 128 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Лариса Г. Тугашова к.т.н., доцент, кафедра автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», ул. Советская, 186а, г. Альметьевск, 423462, Россия, tugashova@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0001-9331-3142

Вклад авторов

Лариса Г. Тугашова обзор литературных источников, методика и проведение эксперимента, выполнение расчетов, написание и корректировка рукописи.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Larisa G. Tugashova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of automation and information technologies, Almetyevsk State Technological University «Higher School of Petroleum», Sovetskaya st., 186a, Almetievsk, 423462, Russia, tugashova@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0001-9331-3142

Contribution

Larisa G. Tugashova literature review, experimental procedure, computational analysis, manuscript preparation and editing

Conflict of interest

The author declare no conflict of interest.

Поступила 11/01/2026	**После редакции** 18/01/2026	**Принята в печать** 20/02/2026
Received 11/01/2026	**Accepted in revised** 18/01/2026	**Accepted** 20/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-123-132 Оригинальная статья/Research article
УДК 663.814 : 613.292 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка технологии ягодных морсов, обогащенных биологически активными веществами

Жанна А. Кох [1] jannetta-83@mail.ru 0000-0003-4016-7596
Денис А. Кох [2] dekoch@mail.ru 0000-0002-3047-1386
Оксана Н. Еременко [1] oks.eriomenko@yandex.ru 0000-0001-6294-7791

1 Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, просп, им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Россия
2 Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира 90. Красноярск, 660049, Россия

Аннотация. Статья посвящена разработке технологии ягодных морсов, обогащенных биологически активными веществами. Современный рынок функционального питания представляет собой динамично развивающуюся сферу, в которой повышенные биологические ценности продуктов становятся важным аспектом здоровья и благополучия потребителей. Морсы – это безалкогольные напитки на основе ягод, фруктов и овощей, которые содержат множество полезных веществ, таких как витамины, минералы и антиоксиданты. Ягодный морс, как напиток с высокими питательными свойствами, приобретает все большую популярность благодаря своей натуральности и положительному воздействию на организм. Исследование направлено на разработку рецептуры и основ технологии ягодного морса повышенной биологической ценности на основе ягодного сырья. Проведенный обзор научно-технической литературы и результаты предварительных исследований показали перспективность использования ягод черной смородины, листьев мяты перечной и ферментированной ботвы моркови, а также вторичного сырья: выжимок и вытерок ягод смородины. Предварительное исследование химического состава черной смородины, мяты перечной и морковной ботвы выявило, что эти ингредиенты характеризуются высоким содержанием различными витаминами, минералами и другими биологически активными веществами, важными для здоровья. Эти компоненты делают ягоды, листья и ботву ценными ингредиентами для создания функциональных напитков, которые могут существенно улучшить здоровье потребителей. Полученная в результате исследований технология ягодного морса повышенной биологической ценности является ценной и всесторонней разработкой, способной внести вклад в развитие отрасли функциональных напитков.

Ключевые слова: черная смородина, мята перечная, ботва моркови, ферментация, функциональный напиток, морс.

Development of technology for berry fruit drinks enriched with biologically active substances

Zhanna A. Koch [1] jannetta-83@mail.ru 0000-0003-4016-7596
Denis A. Koch [2] dekoch@mail.ru 0000-0002-3047-1386
Oksana N. Yeremenko [1] oks.eriomenko@yandex.ru 0000-0001-6294-7791

1 Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Prospektim. gaz. "KrasnoyarskyRabochy", 31, Krasnoyarsk City, 660037, Russia
2 Krasnoyarsk State Agrarian University,90, Mira Avenue, Krasnoyarsk City, 660049, Russia

Abstract. This article focuses on the development of a technology for berry fruit drinks (mors) enriched with bioactive compounds. The modern market for functional foods is a dynamically developing area in which the enhanced nutritional value of products becomes an important aspect of consumer health and well-being. Mors are non-alcoholic beverages based on berries, fruits, and vegetables that contain many beneficial substances, such as vitamins, minerals, and antioxidants. Berry mors, as a drink with high nutritional properties, is gaining increasing popularity due to its naturalness and positive effects on the body. This study aimed to develop a recipe and the basics of a technology for a berry mors with increased biological value based on berry raw materials. A review of scientific and technical literature and the results of preliminary studies have shown the promise of using black currants, peppermint leaves, and fermented carrot tops, as well as secondary raw materials: pomace and pulp of currant berries. A preliminary study of the chemical composition of black currants, peppermint, and carrot tops revealed that these ingredients are incredibly rich in various vitamins, minerals and other biologically active substances important for health. These components make berries, leaves and tops valuable ingredients for creating functional drinks that can significantly improve our health. The technology of berry mors with increased biological value obtained as a result of research is a valuable and comprehensive development capable of contributing to the development of the functional beverage industry.

Keywords: blackcurrant, peppermint, carrot tops, fermentation, functional drink, fruit drink.

Для цитирования
Кох Ж.А, Кох Д.А., Еременко О.Н. Разработка технологии ягодных морсов, обогащенных биологически активными веществами // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 123–132. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-123-132

For citation
Koch Zh.A., Koch D.A., Yeremenko O.N. Development of technology for berry fruit drinks enriched with biologically active substances. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1.pp. 123–132. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-123-132

© 2026, Кох Ж.А. и др. / Koch Zh.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Современная стратегия развития пищевой промышленности базируется на поиске новых источников незаменимых нутриентов, освоении нетрадиционных видов сырья и внедрении инновационных технологий. Эти подходы направлены на создание продуктов с повышенной пищевой и биологической ценностью, заданными потребительскими свойствами и увеличенными сроками годности [1, 3].

Особую актуальность в данном контексте приобретает разработка функциональных продуктов питания, в том числе функциональных напитков, предназначенных для систематического употребления широкими группами населения. Целевой аудиторией потребления функциональных напитков являются не только здоровые люди, стремящиеся сохранить свой статус (подростки, лица пожилого возраста, кормящие матери), но и лица, нуждающиеся в диетотерапии в связи с хроническими заболеваниями: сахарным диабетом, гипертонией, ожирением и другими [1, 4].

Ключевой характеристикой функциональных напитков является наличие в их составе биологически активных компонентов, способствующих продлению активного долголетия за счет коррекции метаболических процессов, ингибирования окислительного стресса и усиления детоксикационной функции организма. Наиболее значимыми соединениями, реализующими эти эффекты, служат природные антиоксиданты: аскорбиновая кислота, витамин Е, каротиноиды, селен, а также фенольные соединения, в частности флавоноиды [1–4, 6].

В этом ряду морсы, как натуральные сокосодержащие напитки, представляют собой перспективную основу для создания продуктов функциональной направленности. Их разработка на базе местного ягодного сырья приобретает стратегическое значение, что обусловлено комплексом причин:

Экономико-ресурсный аспект: рациональное использование ценного ягодного сырья, позволяющее минимизировать отходы производства и снизить антропогенную нагрузку на экосистемы.

Медико-социальный аспект: возможность коррекции структуры питания населения и формирования культуры здорового потребления, что является основой для снижения риска алиментарно-зависимых заболеваний.

Рыночно-потребительский аспект: растущий спрос со стороны осознанных потребителей на продукты, способствующие поддержанию здоровья, в условиях высокой конкуренции на рынке здорового питания.

Научный аспект: наличие убедительных научных данных, подтверждающих прямую связь между регулярным потреблением продуктов, обогащенных биоактивными веществами растительного происхождения, и снижением риска развития хронических неинфекционных заболеваний.

Создание функциональных морсов отвечает ключевым трендам пищевой индустрии и представляет собой междисциплинарную задачу, сочетающую вопросы технологии, нутрициологии и экономики. Ягодный морс является ярким примером продукта функционального назначения, поскольку сочетает традиционные потребительские свойства напитка с выраженной биологической активностью. Функциональными называют продукты, которые, помимо выполнения базовой энергетической функции, целенаправленно обогащены или природно содержат биоактивные компоненты, способствующие поддержанию физиологического здоровья и снижению риска развития заболеваний [5, 10, 11].

Ключевые функциональные характеристики ягодного морса:

Высокая антиоксидантная активность. Ягоды – основной компонент морса – представляют собой концентрированный источник природных антиоксидантов: антоцианов, флавоноидов и полифенолов. Эти соединения нейтрализуют окислительный стресс, индуцированный свободными радикалами, что является важным фактором в профилактике хронических патологий, включая сердечно-сосудистые заболевания, диабет и онкологические процессы.

Источник эссенциальных микронутриентов. Напиток служит естественным поставщиком витаминов (в первую очередь аскорбиновой кислоты, критичной для работы иммунной системы и синтеза коллагена) и минеральных веществ (калия, магния, железа), необходимых для обеспечения нормального метаболизма и функций организма. Потенциал для поддержки пищеварения.

Использование цельных ягод или обогащение рецептуры пищевыми волокнами (например, из овсяных хлопьев или семян льна) придаёт морсу свойства, благотворно влияющие на желудочно-кишечный тракт: нормализацию перистальтики, улучшение микробиоты и профилактику запоров.

Благоприятный профиль для гликемического контроля. За счёт относительно низкого содержания простых сахаров и возможности обогащения клетчаткой, ягодный морс характеризуется сниженным гликемическим откликом, что делает его потенциально полезным элементом в рационе лиц с нарушением толерантности к глюкозе или сахарным диабетом 2-го типа.

Выраженные противовоспалительные свойства. Отдельные виды ягодного сырья (клюква, черника) содержат специфические биокомпоненты с доказанной противовоспалительной активностью.

Систематическое употребление морсов на их основе может способствовать снижению системного воспаления и облегчению симптоматики соответствующих заболеваний. Ягодный морс благодаря своему многокомпонентному натуральному составу и возможности целенаправленной рецептурной модификации, представляет собой гибкую и перспективную основу для создания линейки функциональных напитков, отвечающих современным запросам в области здорового питания, обладает выраженным потенциалом для укрепления иммунной системы, что во многом обусловлено высоким содержанием аскорбиновой кислоты (витамина С) и комплекса других антиоксидантов. Эти биологически активные соединения играют ключевую роль в поддержании эффективного иммунного ответа, усиливая барьерные функции организма и способствуя его сопротивляемости инфекционным агентам [10, 12].

Функциональные свойства морса напрямую зависят от видового состава используемого ягодного сырья, каждый вид которого обладает уникальным спектром биоактивных компонентов.

Систематическое включение в рацион ягодных морсов способствует поддержанию общего гомеостаза организма, снижению рисков, ассоциированных с развитием хронических неинфекционных заболеваний, и в конечном итоге – повышению качества жизни, что является одной из приоритетных задач современной превентивной медицины и нутрициологии [1, 3, 10].

Для производителей напитков одним из ключевых векторов развития является расширение ассортимента функциональной продукции, основанной на использовании натурального сырья. К таким ингредиентам относятся ягодные соки и пюре, а также экстракты и настои из пряно-ароматических растений. Растущие требования потребителей к качеству, натуральности и пользе продуктов стимулируют непрерывный поиск и внедрение усовершенствованных технологических решений. Анализ рынка безалкогольных напитков последних лет демонстрирует устойчивую глобальную тенденцию к «натурализации» рецептур. Это выражается в последовательном отказе от синтетических ароматизаторов, красителей и консервантов в пользу ингредиентов натурального происхождения или идентичных натуральным. В соответствии с этим трендом, стратегическим направлением для всей отрасли становится комплексная переориентация на натуральные компоненты, что требует, как модернизации действующих технологических процессов, так и разработки принципиально новых подходов [1–4].

Учитывая обозначенные тенденции и потребительский спрос, разработка ресурсосберегающей технологии производства ягодного морса с повышенной биологической ценностью представляет собой актуальную научно-практическую задачу. Её решение позволит создать конкурентоспособный продукт, соответствующий современным требованиям к натуральности, функциональности и качеству.

Цель работы – разработка рецептуры ягодного морса повышенной биологической ценности и основ технологии получения инновационного напитка на основе ягодного сырья.

Материалы и методы

Объектами исследования служили ягоды черной смородины, сушеные листья мяты, сушеная ботва моркови и сокосодержащий инновационный напиток. Для придания напитку функциональных свойств в состав рецептуры включены травяные добавки – листья мяты перечной и морковную ботву.

С целью подтверждения возможности использования данного сырья в производстве функционального ягодного морса необходимо было определить химический состав ягод чёрной смородины, листьев мяты перечной и ботвы моркови; изучить особенности получения морсов и оценить их физико–химические показатели; предложить новую рецептуру морса лечебно–профилактического действия и разработать основы технологии инновационного напитка.

Исследования химического состава ягод смородины, листьев мяты проводили согласно методикам [5–7]. Определение физико-химических показателей – по методикам, принятым для производства сокосодержащих безалкогольных напитков [8, 9]. Внешний вид и консистенцию напитков определяют визуально в чистом сухом цилиндре или стакане вместимостью 250 $см^3$. Оценивают оттенок и интенсивность окраски на соответствие требованиям нормативно – технической документации на готовую продукцию: осветлённый: прозрачная жидкость, допускается легкая опалесценция, осадок; неосветлённый: естественно мутная жидкость, прозрачность не обязательна, допускается осадок на дне тары; с мякотью: однородная жидкость с равномерно распределенной тонкоизмельченной мякотью, допускаются незначительное расслаивание и оседание мякоти и уплотненный осадок на дне тары, легко устраняемый при встряхивании.

Результаты и обсуждения

На первом этапе был определен химический состав ягод чёрной смородины, листьев мяты перечной и ботвы моркови.

Результаты исследования химического состава ягод чёрной смородины представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав ягод чёрной смородины

Table 1.

Chemical composition of black currant berries

Показатель | Index	Содержание Value
Массовая доля сухих веществ, % Dry matter content, %	14,5 ± 0,1
Содержание пектиновых веществ, % Pectin content, %	13,4 ± 0,2
Содержание общих сахаров, % Total sugar content, %	8,79 ± 0,3
Содержание редуцирующих сахаров, % Reducing sugar content, %	6,90 ± 0,1
Содержание титруемых кислот, % Titratable acid content, %	6,73 ± 0,2
Общее содержание фенольных веществ, мг / 100 г Total phenolic content, mg/100 g	686,0 ± 5,0

Полученные результаты, приведенные в таблице 1 показали достаточное количество в ягодах чёрной смородины фенольных веществ и антоцианов, характеризующихся своими противоопухолевыми и противомикробными свойствами. Также в составе ягод имеются пектиновые вещества, оказывающих противовоспалительное действие на организм [5, 6]. Ягоды чёрной смородины также богаты витаминами и различными макро- и микроэлементами. В таблице 2 представлены данные по содержанию витаминов, макро и микроэлементов ягод чёрной смородины.

Из приведённых данных видно, что смородина черная содержит большое количество витамина С – 201,70%. Витамин С участвует в окислительно-восстановительных реакциях организма, функционировании иммунной системы, способствует усвоению железа.

Помимо витаминов смородина также богата минералами: калием – 14%, кремнием – 203%, кобальтом – 40%, медью – 13%, молибденом – 34,3%. Калий участвует в регуляции водного, кислотного и электролитного баланса, участвует в процессах проведения нервных импульсов, регуляции давления. Кремний стимулирует синтез коллагена. Кобальт необходим для существования микрофлоры кишечника, участвует в кроветворении, обменных процессов, в работе печени, поджелудочной железы, нервной и иммунной системы. Медь способствует укреплению иммунитета и стенок кровеносных сосудов. Молибден участвует в ускорении реакции окисления пуриновых азотистых оснований [5, 6, 9].

Таблица 2.

Содержание витаминов в ягодах чёрной смородины

Table 2.

Vitamin content in black currant berries

Витамины Vitamins	Содержание в 100 г Content
A	1,9%
Бета Каротин	2,0%
B1	2,0%
B2	2,2%
B4	2,5%
B5	8,0%
B6	6,5%
B9	1,3%
C, мг / 100 г.	201,70%
E	4,7%
H	4,8%
K	0,1%
PP	2,0%
Макро- и микроэлементы Macro- and microelements	Содержание от нормы в 100 г Content
K	14,0%
Ca	3,6%
Si	203,0%
Mg	7,8%
I	2,0%
Na	2,5%
S	0,2%
P	4,1%
Cl	0,6%
Fe	7,2
I	0,7
Co	40,0
Mn	9,0
Cu	13,0
Mo	34,3
Se	2,0
F	0,4
Cr	1,6
Zn	1,1

По приведённому содержанию полезных веществ, ягоды чёрной смородины являются перспективным сырьём для функциональных напитков.

Мята перечная давно известна своими лечебными свойствами, богата такими витаминами, как: витамин А – 23,6%, витамин В2–14,8%, витамин В9–28,5%, витамином С – 35,3%. Витамин А отвечает за нормальное развитие, репродуктивную функцию, здоровье кожи и глаз, поддержание иммунитета. Витамин В2 участвует в окислительно – восстановительных реакциях. Витамин В9 участвуют в метаболизме нуклеиновых и аминокислот [4, 8].

Минеральные вещества мяты, представлены такими элементами как: калий – 22,8%, кальций – 24,3%, магний – 20%, железо – 28,2%, марганец – 58,8%, медь – 32,9%. Кальций поддерживает работу тканей и необходим для здоровья костей и зубов. Магний участвует в ферментных процессах организма. Марганец необходим для нормальной работы иммунной системы,

регулирования энергетических процессов в клетках, роста костей. Железо принимает участие в дыхании, кроветворении, иммунобиологических процессах и окислительно-восстановительных реакциях организма.

Также листья мяты содержат эфирное масло, в состав которого входят ментол и его эфиры, органические кислоты, флавоноиды, и другие биологически активные вещества.

Уникальный химический состав делает мяту одним из основных компонентов для создания морсов профилактического действия.

Хорошо известны полезные свойства моркови. Но ботва моркови гораздо богаче и насыщеннее витаминами и питательными веществами, чем сам корнеплод. Полезные свойства надземной части растения обусловлены высоким содержанием редких витаминов и минералов.

Были проведены исследования физико-химического состава ботвы моркови до и после ферментации. Результаты исследований химического состава ботвы моркови представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Химический состав ботвы моркови

Table 3.

Chemical composition of carrot tops

Компонент Componetn	Содержание в 100 г Content
Белки | Proteins	0,8
Жиры | Fats	0,2
Углеводы | Carbohydrates	2,4
Пищевые волокна Dietary Fiber	14,5
Вода | Water	4,0
бета Каротин | Beta Carotene	1,3
B1	2,0
B2	2,2
B4	1,5%
B5	8,0%
B6	5,5%
B9	6,8%
C	2,9%
K	7,8%
PP	3,6%

Из микроэлементов можно выделить больше всего – калия, железа, фосфора, селена, цинка, натрия. Из витаминов можно выделить витамины А, К, С, РР и витамины группы В. Помимо вышеперечисленного ботва богата эфирными маслами и натуральными афродизиаками [1, 4, 6].

Большое содержание полезных веществ, малая калорийность, а также практически отсутствие побочных действий делают морковную ботву ценной добавкой к сокосодержащим напиткам для придания последним функциональных свойств.

Как видно из данных, представленных в таблицах, смородина чёрная, мята перечная и морковная ботва отвечают всем требованиям, предъявляемым к функциональным ингредиентам для обогащения продуктов питания, в том числе сокосодержащих напитков – морсов.

Следующий этап экспериментальных исследований был посвящен разработке рецептуры ягодного морса повышенной биологической ценности с оригинальными органолептическими характеристиками на основе ягод чёрной смородины, листьев мяты перечной и ботвы моркови.

Ранее авторами статьи была разработана следующая рецептура напитка (на 1000 мл): смородина чёрная – 500 г; сахар – 60 г; измельчённые листья мяты (сухие) – 3 г; измельчённая ботва моркови (сухая) – 1,5 г; вода – 900 мл.

Основными стадиями приготовления напитка можно выделить следующие этапы: дефростирование и измельчение ягод смородины; приготовление мятного сиропа – обработка сухих измельчённых листьев мяты водой, добавление сахара и доведение до кипения на слабом огне (2–3 мин); приготовление отвара ботвы моркови – обработка сухой измельчённой ботвы водой и доведение до кипения на слабом огне (2–3 мин); смешение мятного сиропа с отваром ботвы моркови; добавление измельченной ягоды в полученный отвар, перемешивание и кипячение в течение (1–2 мин); настаивание напитка до полного его охлаждения; процеживание напитка через мелкое сито; охлаждение готового напитка.

Однако следует отметить, что тепловая обработка приводит к разрушению витамина С, содержащегося в ягодах смородины.

На основании результатов серии предварительных опытов была предложена следующая рецептура напитка (на 1000 мл): смородина чёрная – 500 г; сахар – 60 г; измельчённые листья мяты (сухие) – 3 г; измельчённая ботва моркови (сухая) – 1,5 г; вода – 900 мл.

В соответствии с корректировкой рецептуры также были скорректированы основные стадии приготовления напитка: дефростирование и измельчение ягод смородины; приготовление мятного сиропа – обработка сухих измельчённых листьев мяты водой, добавление сахара и доведение до кипения на слабом огне (2–3 мин); приготовление отвара ботвы моркови обработка сухой измельчённой ботвы водой и доведение до кипения на слабом огне (2 – 3 мин); смешение мятного сиропа с отваром ботвы моркови; добавление измельченной ягоды

в полученный отвар, перемешивание и кипячение в течение (1 – 2 мин); настаивание напитка до полного его охлаждения; процеживание напитка через мелкое сито; охлаждение готового напитка.

Добавление свежевыжатого смородинового сока в напиток повышает кислотность, поэтому количество сахара было решено увеличить. При варке жмыха теряются практически все полезные свойства, потому данную стадию предлагается исключить.

На основании сделанных выводов была разработана рецептура напитка «Тонус» (на 1000 мл): смородина чёрная – 500 г; сахар – 100 г; измельчённые листья мяты (сухие) – 3 г; вода – 900 мл.

Процесс приготовления тогда будет включать следующие стадии: подготовка растительного сырья; измельчение ягоды смородины; экстракция сока питьевой водой; разделение полученной массы на сок и жмых; приготовление мятного сиропа – обработка сухих измельчённых листьев мяты водой, добавление сахара и доведение до кипения на слабом огне (2 – 3 мин); приготовление отвара ботвы моркови – обработка сухой измельчённой ботвы водой и доведение до кипения на слабом огне (2 – 3 мин); смешение мятного сиропа с отваром ботвы моркови; фильтрация полученного отвара; охлаждение отвара; добавление свежевыжатого сока в охлаждённый отвар и перемешивание.

Для улучшения полезности напитка было предложено заменить сахар на мёд (на 1000 мл – 100 г) и использовать ферментированную ботву моркови (на 1000 мл – 1,5 г).

Таким образом, было получено четыре образца:

1. Мятно-смородиновый напиток с сахаром и морковной ботвой (образец № 1);

Мятно-смородиновый напиток с сахаром и ферментированной морковной ботвой (образец № 2);

Мятно-смородиновый напиток с мёдом и морковной ботвой (образец № 3);

Мятно-смородиновый напиток с мёдом и ферментированной морковной ботвой (образец № 4).

На основании полученных данных была разработана технологическая схема производства ягодного морса прямого отжима с использованием вторичного сырья переработки ягод (рисунок 1).

В общем виде можно выделить следующие этапы: прием и хранение сырья; приготовление сахарного сиропа; нагревание, дробление и настаивание сырья; экстракция; отжим, протирка и процеживание; купажирование; розлив; маркирование; хранение и транспортировка.

Прием и хранение сырья. Сырье и материалы, применяемые в производстве, должны соответствовать требованиям нормативным документам.

Для производства напитка используют следующее сырье: отечественные ягоды: смородина чёрная по ГОСТ 6829–2015; сахар по ГОСТ 33222–2015; вода питьевая, соответствующая по качеству гигиеническим требования, изложенным в СанПиН 2.1.4.1074.

Ягоды моют, сортируют и измельчают. Сахар просеивают. Проводят водоподготовку.

Приготовление сахарного сиропа. Воду направляют для приготовления сахарного сиропа.

Возможно приготовление, как белого сахарного сиропа, так и использование инвертного или глюкозо-фруктозного сиропа.

Экстракция. Ягоды нагревают до температуры экстракции. Проводят экстрагирование БАВ растительного сырья в течение 10–14 часов. Готовый экстракт направляют на стадию отжима и протирки. Выжимки и вытерки направляются на повторное экстрагирование в течение 4 часов.

Фильтрация. На этой стадии проводят фильтрацию экстрактов.

Купажирование. Сахарный сироп смешивают с экстрактами БАВ и выжимок и вытерок, полученный напиток тщательно перемешивают и направляют на розлив.

Розлив. В асептических условиях проводят розлив полученного напитка в потребительскую тару. Поскольку целью настоящей работы является разработка продукта здорового питания, а также с целью защиты окружающей среды рекомендуется проводить розлив напитка в стеклянную потребительскую тару вместимостью 0,5–1,5 л, которая является наиболее востребованной у потребителя. В готовом напитке проверяют содержание сухих веществ, pH, и органолептические показатели.

Маркирование. На этикетку наносят [4]: наименование напитка; состав напитка; количество напитка в единице продукции; дату изготовления напитка; срок годности напитка; условия хранения напитка; данные о производителе напитка рекомендации и (или) ограничения по использованию, в том числе приготовлению пищевой продукции в случае, если ее использование без данных рекомендаций или ограничений затруднено, либо может причинить вред здоровью потребителей, их имуществу, привести к снижению или утрате вкусовых свойств пищевой продукции (в случае данного напитка – рекомендации к употреблению в охлажденном

виде); показатели пищевой ценности продукта; единый знак обращения продукции на рынке государств – членов Таможенного союза. Хранение. Учитывая рецептуру продукта и способ его обработки (наличие антиоксидантов и высокой температуры розлива) представляется возможным исследовать длительный срок хранения продукта.

В полученных образцах определяли органолептические показатели. Результаты представлены в таблице 6. Результаты органолептической оценки всех четырёх образцов соответствуют требованиям, предъявляемым к сокосодержащим напиткам [6, 8]. Полученные результаты физико-химического анализа приведены в таблице 7.

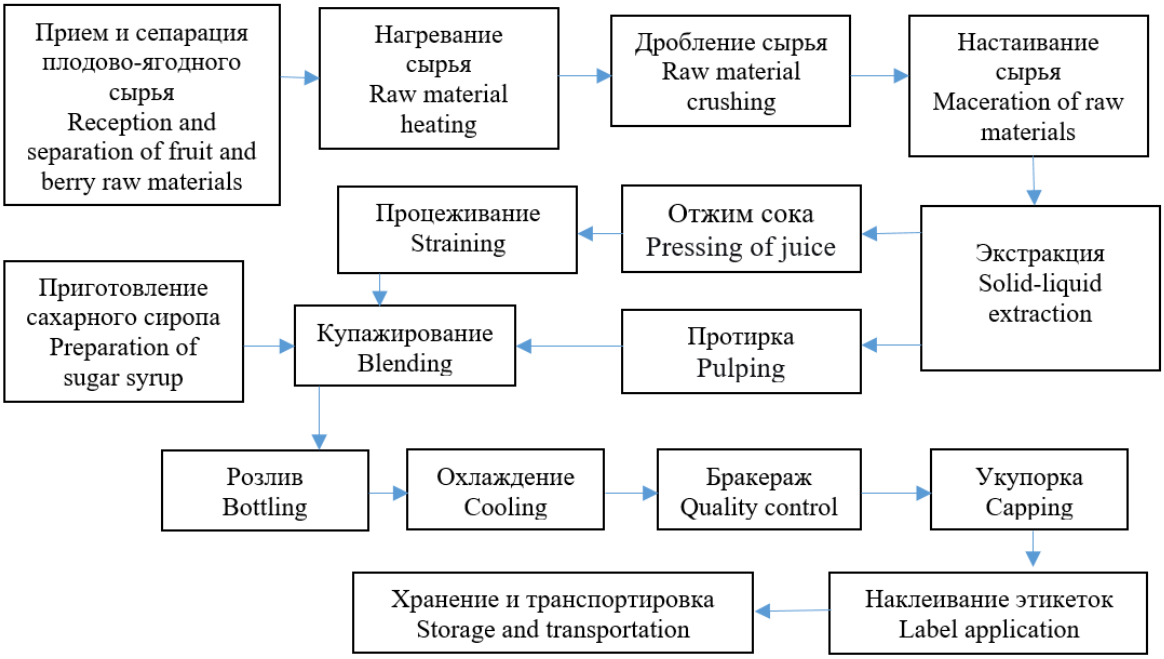


Рисунок 1. Технологическая схема производства морса прямого отжима с использованием вторичного сырья переработки ягод

Figure 1.Flow chart to produce directly squeezed fruit drink using secondary raw materials from berry processing

Таблица 4.

Органолептические показатели образцов

Table 4.

Organoleptic characteristics of samples

Показатель Index	Образец | Sample				Требования ГОСТ 32920–2022
	1	2	3	4	
Внешний вид Appearance	Прозрачная жидкость без посторонних включений A clear liquid free of foreign matter				Прозрачная жидкость. Допускается легкая опалесценция Clear liquid. Slight opalescence is permitted.
Цвет Color	Соответствующий сырью, имеющий тёмно-красный цвет Consistent with the raw material, dark red in color				Однородный по всей массе, свойственный цвету используемого сырья. Допускается незначительное обесцвечивание из темноокрашенных овощей и фруктов и ягод Homogeneous throughout, characteristic of the color of the raw materials used. Slight discoloration is permitted for dark-colored vegetables, fruits, and berries.
Аромат и вкус Aroma and taste	Характерный для смородины с освежающим привкусом мяты Characteristic of currants, with a refreshing minty flavor				Натуральные, хорошо выраженные, свойственные использованному сырью. Допускаются для обогащенных сокосодержащих напитков привкус и запах вносимых биологически активных веществ. Не допускаются посторонние привкус и запах Natural, well-defined, characteristic of the raw materials used. The flavor and odor of the added biologically active substances are permitted for fortified juice drinks. Foreign flavors and odors are not permitted.

Таблица 5.

Физико-химические показатели ягодных морсов

Table 5.

Physicochemical properties of berry fruit drinks

Показатели Index	Образец | Sample			
	1	2	3	4
Массовая доля сухих веществ, % | Solids, %	6,81	6,84	6,82	6,75
Объемная доля спирта, % | Alcohol by volume, %	1,1	1,5	1,45	1,2
Кислотность, к. ед. | Acidity, k.u.	2,53	2,16	2,44	2,61
Цветность, см3 раствора йода концентрацией 0,1 моль/дм^3 на 100 см^{3}напитка Color, cm^3 of 0.1 mol/dm^3 iodine solution per 100 cm^3 of beverage	3,13	2,95	2,80	2,90
Суммарное содержание органических кислот, г/дм^3 | Total organic acid content, g/dm^3	7,20	8,10	7,65	8,42
Суммарное содержание летучих компонентов, мг/дм^3 | Total volatile components, mg/dm^3	33,78	25,18	3,12	34,13
Витамины, мг/100 см^3 | Vitamins, mg/1000 cm^3				
B1	0,12	0,10	0,05	0,08
B2	0,08	0,07	0,08	0,06
C	4,89	5,16	4,99	5,29
Полифенолы, мг/см^3 | Polyphenols, mg/cm^3	88,40	81,24	81,10	89,24
Общее содержание фенольных веществ |Total phenolic content	44,25	42,17	43,55	44,91
Общее содержание антоцианов, мг/см^3 | Total anthocyanin content, mg/cm^3	9,33	9,25	9,22	9,65
Антиоксидантная активность, г/100 г | Antioxidant activity, g/100 g	88,60	84,50	84,00	89,10

Проведенный анализ физико-химических показателей позволяет определить наиболее оптимальный образец. Содержание во всех образцах сухих веществ от 6,75 до 6,84%, кислотности от 2,16 до 2,53%, доля спирта от 1,1 до 1,5%, антоцианов от 9,22 до 9,33 мг/см^3, витамина С от 5,16 до 5,29 мг/см 3, витамина В1 от 0,05 до 0,12 мг/см^3, витамина В2 от 0,06 до 0,08 мг/см^3, органических кислот от 7,20 до 8,10 г./дм^3, летучих компонентов от 22,18 до 33,78 мг/дм^3, фенольных веществ от 42,17 до 44,91 мг/см^3, полифенолов от 80,32 до 89,24 мг/см^3.

Исходя из полученных данных, можно выделить образец № 4 (мятно – смородиновый напиток с медом и ферментативной морковной ботвой), как самый полезный в данной категории, так как он превосходит остальные образцы по количественному содержанию витамина С, полифенолов, антиоксидантов и фенольных веществ. Несмотря на различное содержание витаминов и минеральных веществ, все образцы обладают набором полезных характеристик, особенно полифенолов и антоцианов. Благодаря целому спектру биологической активности данные соединения применяются для создания лекарственных средств и БАД растительного происхождения. Следовательно, содержание полифенолов и антоцианов придаёт ягодному морсу лечебно-профилактические свойства.

Заключение

Функциональные продукты питания, обогащенные различными активными компонентами, представляют собой важное дополнение к здоровому образу жизни, предоставляя дополнительные преимущества для здоровья, иногда не очевидные. Они не только снижают риск возникновения многих хронических заболеваний, но и способствуют поддержанию общего благополучия организма.

Ягодные морсы, обогащенные витаминами и антиоксидантами, представляют собой яркий пример функциональных безалкогольных напитков. Они обладают не только полезными свойствами, но и стремлением к использованию исключительно натуральных ингредиентов.

Проведенное исследование было направлено на разработку рецептуры и основ технологии ягодного морса повышенной биологической ценности на основе ягодного сырья. Проведенный обзор научно-технической литературы и результаты предварительных исследований показали перспективность использования ягод черной смородины, листьев мяты перечной и ферментированной ботвы моркови, а также вторичного сырья: выжимок и вытерок ягод смородины. Исследование химического состава черной смородины, мяты перечной и морковной ботвы выявило, что эти ингредиенты характеризуются высоким содержанием различными витаминами, минералами и другими биологически активными веществами, важными для здоровья. Эти компоненты делают ягоды, листья и ботву ценными ингредиентами для создания функциональных напитков, которые могут существенно улучшить здоровье потребителей.

Образец № 4, который содержит мёд и ферментированную ботву моркови, выделяется как наиболее полезный и значимый из-за наибольшего содержания витамина С, полифенолов и антиоксидантов, что делает его незаменимым элементом здорового рациона.

Полученная в результате исследований технология ягодного морса повышенной биологической ценности является ценной и всесторонней разработкой, способной внести вклад в развитие отрасли функциональных напитков.

Литература

1 Лачкова И.С., Анисимов Э.А. Особенности определения контрольно-критических точек при производстве безалкогольных напитков // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве. 2023. № 10. С. 103–108.

2 Пат. № 2485868 Российская Федерация, МПК A23L 2/02. Способ комплексной безотходной переработки растительного сырья на функциональные продукты питания / Винницкая В.Ф., Фролова С.В., Андреева Н.В. № 2011109194/13; заявл. 11.03.2011; опубл. 27.06.2013.

3 Винницкая В.Ф., Акишин Д.В., Брыксина К.В. Разработка продуктов для диетического питания из сушеных овощей, грибов и круп // Наука и образование. 2022. Т. 5. № 3. С. 106.

4 Гаптар С.Л., Сороколетов О.Н., Тарабанова Е.В. и др. Расширение ассортиментной линейки пищевых продуктов специализированного назначения и функциональной направленности // Инновации и продовольственная безопасность. 2022. № 4. С. 55–67.

5 Коденцова В.М., Рисник Д.В., Серба Е.М. и др. Перспективы комплексной переработки ягод черной смородины // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 3. С. 621–632.

6 Кох Ж.А., Еременко О.Н., Кох Д.А. Ribes nigrum в производстве сокосодержащих напитков // Актуальные вопросы переработки и формирование качества продукции АПК: мат. III Междунар. науч. конф., Красноярск, 11 декабря 2024 г. Красноярск: КрасГАУ, 2025. С. 24–27.

7 Пат. № 2817836 C1 Российская Федерация, МПК A23L 2/02, A23L 2/38, A23L 2/52. Способ производства морса / Кох Ж.А., Еременко О.Н.; заявитель КрасГАУ. № 2023110420; заявл. 21.04.2023; опубл. 22.04.2024.

8 Абашкин И.А., Елеев Ю.А., Глухан Е.Н. и др. Методы экстракции биологически активных веществ из растительного сырья (обзор) // Химия и технология органических веществ. 2021. № 2. С. 43–59.

9 Яборова О.В., Белоногова В.Д., Алексеева И.В., Соснина С.А. Изучение флавоноидов и антиоксидантной активности побегов и листьев смородины черной // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 5 (143). С. 108.

10 Гугучкина Т.И., Лепешкина С.В., Попов В.П. Технологические аспекты получения и применения натуральных красителей // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2021. № 71. С. 266–277.

11 Панасюк А.Л., Кузьмина Е.И., Егорова О.С. Производство и применение натуральных антоциановых пищевых красителей (обзор) // Пищевая промышленность. 2021. № 10. С. 13–19.

12 Славянский А.А., Митрошина Д.П., Грибкова В.А. и др. Свекловичный жом сахарного производства и перспективы его использования // Вестник Мурманского ГТУ. 2023. Т. 26. № 3. С. 292–303.

13 Аль-Сухайми С.А., Оленева З.А., Тошев А.Д. Оценка антиоксидантной и антимикробной активности экстрактов мяты перечной, имбиря и розмарина // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 182–188. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-182-188

14 Мясищева Н.В. Формирование критериев отбора сортов смородины черной по биохимическому и технологическому потенциалу для использования в технологии производства желейных продуктов // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2. С. 135–141. doi: 10.20914/2310-1202-2022-2-135-141

15 Struk O., Starchenko G., Koshovyi O. et al. Mineral Composition of Blackcurrant (Ribes nigrum L.) Fruits and Leaves // The Open Agriculture Journal. 2024. V. 18. № 1.

16 Karaklajic-Stajic Z., Tomic J., Pesakovic M. et al. Black queens of fruits: Chemical composition of blackberry (Rubus subg. rubus Watson) and black currant (Ribes nigrum L.) cultivars selected in Serbia // Foods. 2023. V. 12. № 14. P. 2775. doi: 10.3390/foods12142775

17 Ziobroń M., Kopeć A., Skoczylas J. et al. Basic chemical composition and concentration of selected bioactive compounds in leaves of black, red and white currant // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 16. P. 7638. doi: 10.3390/app11167638

18 Aripin M.N.J., Julian H., Samadhi T.W. Enhancing the Quality of Natural Food Colorants by Novel Extraction and Concentration Processes // Food Reviews International. 2024. V. 40. № 10. P. 3899–3937. doi: 10.1080/87559129.2024.2374842

19 Herrera M., Viera I., Roca M. Study of the authentic composition of the novel green foods: Food colorants and coloring foods // Food Research International. 2023. V. 170. P. 112974. doi: 10.1016/j.foodres.2023.112974

20 Ovsyannikov V.Y., Toroptsev V.V., Berestovoy A.A. et al. Development and research of new method for juice extracting from sugar beet with preliminary pressing // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 640. № 5. P. 052011. doi: 10.1088/1755-1315/640/5/052011

References

1 Lachkova I.S., Anisimov E.A. Features of Determining Critical Control Points in the Production of Soft Drinks. Technical Regulation in a Single Economic Space. 2023. no. 10. pp. 103–108. (in Russian).

2 Patent no. 2485868, Russian Federation, IPC A23L 2/02. Method for Complex Waste-Free Processing of Plant Raw Materials into Functional Food Products. Vinnitskaya V.F., Frolova S.V., Andreeva N.V. no. 2011109194/13; filed 11.03.2011; publ. 27.06.2013. (in Russian).

3 Vinnitskaya V.F., Akishin D.V., Bryksina K.V. Development of Products for Dietary Nutrition from Dried Vegetables, Mushrooms and Cereals. Science and Education. 2022. vol. 5. no. 3. p. 106. (in Russian).

4 Gaptar S.L., Sorokoletov O.N., Tarabanova E.V. et al. Expansion of the Product Line of Specialized and Functional Food Products. Innovations and Food Security. 2022. no. 4. pp. 55–67. (in Russian).

5 Kodentsova V.M., Risnik D.V., Serba E.M. et al. Prospects for Complex Processing of Black Currant Berries. Technique and Technology of Food Production. 2024. vol. 54. no. 3. pp. 621–632. (in Russian).

6 Kokh Zh.A., Eremenko O.N., Kokh D.A. Ribes nigrum in the Production of Juice-Containing Drinks. In: Current Issues of Processing and Formation of Quality of Agricultural Products: Proceedings of the III International Scientific Conference, Krasnoyarsk, December 11, 2024. Krasnoyarsk: KrasSAU, 2025. pp. 24–27. (in Russian).

7 Patent no. 2817836 C1, Russian Federation, IPC A23L 2/02, A23L 2/38, A23L 2/52. Method for Producing Fruit Drink. Kokh Zh.A., Eremenko O.N.; applicant KrasSAU. no. 2023110420; filed 21.04.2023; publ. 22.04.2024. (in Russian).

8 Abashkin I.A., Eleyev Yu.A., Glukhan E.N. et al. Methods for Extraction of Biologically Active Substances from Plant Raw Materials (Review). Chemistry and Technology of Organic Substances. 2021. no. 2. pp. 43–59. (in Russian).

9 Yaborova O.V., Belonogova V.D., Alekseeva I.V., Sosnina S.A. Study of Flavonoids and Antioxidant Activity of Shoots and Leaves of Black Currant. International Research Journal. 2024. no. 5 (143). p. 108. (in Russian).

10 Guguchkina T.I., Lepeshkina S.V., Popov V.P. Technological Aspects of Production and Application of Natural Dyes. Fruit Growing and Viticulture of Southern Russia. 2021. no. 71. pp. 266–277. (in Russian).

11 Panasyuk A.L., Kuzmina E.I., Egorova O.S. Production and Application of Natural Anthocyanin Food Colorants (Review). Food Industry. 2021. no. 10. pp. 13–19. (in Russian).

12 Slavyansky A.A., Mitroshina D.P., Gribkova V.A. et al. Sugar Beet Pulp and Prospects for Its Use. Bulletin of Murmansk State Technical University. 2023. vol. 26. no. 3. pp. 292–303. (in Russian).

13 Al-Suhaimi S.A., Oleneva Z.A., Toshev A.D. Evaluation of Antioxidant and Antimicrobial Activity of Extracts of Peppermint, Ginger and Rosemary. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 182–188. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-182-188 (in Russian).

14 Myasishcheva N.V. Formation of Criteria for the Selection of Black Currant Varieties by Biochemical and Technological Potential for Use in the Technology of Jelly Products Production. Bulletin of VSUET. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 135–141. doi: 10.20914/2310-1202-2022-2-135-141 (in Russian).

15 Struk O., Starchenko G., Koshovyi O. et al. Mineral Composition of Blackcurrant (Ribes nigrum L.) Fruits and Leaves. The Open Agriculture Journal. 2024. vol. 18. no. 1. doi: 10.2174/0118743315285116240201054459.

16 Karaklajic-Stajic Z., Tomic J., Pesakovic M. et al. Black queens of fruits: Chemical composition of blackberry (Rubus subg. rubus Watson) and black currant (Ribes nigrum L.) cultivars selected in Serbia. Foods. 2023. vol. 12. no. 14. article 2775. doi: 10.3390/foods12142775.

17 Ziobroń M., Kopeć A., Skoczylas J. et al. Basic chemical composition and concentration of selected bioactive compounds in leaves of black, red and white currant. Applied Sciences. 2021. vol. 11. no. 16. article 7638. doi: 10.3390/app11167638.

18 Aripin M.N.J., Julian H., Samadhi T.W. Enhancing the Quality of Natural Food Colorants by Novel Extraction and Concentration Processes. Food Reviews International. 2024. vol. 40. no. 10. pp. 3899–3937. doi: 10.1080/87559129.2024.2374842.

19 Herrera M., Viera I., Roca M. Study of the authentic composition of the novel green foods: Food colorants and coloring foods. Food Research International. 2023. vol. 170. article 112974. doi: 10.1016/j.foodres.2023.112974.

20 Ovsyannikov V.Y., Toroptsev V.V., Berestovoy A.A. et al. Development and research of new method for juice extracting from sugar beet with preliminary pressing. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 640. no. 5. article 052011. doi: 10.1088/1755-1315/640/5/052011.

Сведения об авторах

Жанна А. Кох к.т.н., доцент, кафедра промышленной экологии, процессы и аппараты химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, институт химических технологий, пр-т, им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Россия, jannetta-83@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4016-7596

Денис А. Кох к.т.н., доцент, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского и макаронного производств, Красноярский государственный аграрный университет, институт пищевых производств, пр-т Мира 90, г. Красноярск, 660049, Россия, dekoch@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3047-1386

Оксана Н. Еременко к.т.н., доцент, кафедра химической технологии древесины и биотехнологии, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, институт химических технологий, пр-т Мира 90, г. Красноярск, 660049, Россия, oks.eriomenko@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6294-7791

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Zhanna A. Koch Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, industrial ecology, processes and equipment for chemical production department, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Institute of Chemical Technology, Krasnoyarsk Worker Ave., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia, jannetta-83@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4016-7596

Denis A. Koch Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, bakery, confectionery and pasta production technologies department, Krasnoyarsk State Agrarian University, Institute of Food Production, Prospect Mira 90, Krasnoyarsk, 660049, Russia, dekoch@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3047-1386

Oksana N. Yeremenko Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, chemical technology of wood and biotechnology department, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Institute of Chemical Technology, Krasnoyarsk Worker Ave., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia, oks.eriomenko@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-6294-7791

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 05/12/2025	**После редакции** 22/12/2016	**Принята в печать** 01/02/2016

Received 05/12/2025	**Accepted in revised** 22/12/2016	**Accepted** 01/02/2016

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-133-141 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.66.016 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование цветовых характеристик хлебобулочных изделий из пшеничной муки при различной продолжительности выпечки

Лариса В. Зайцева [1] l.zaitceva@gosniihp.ru 0000-0001-8176-1650
Денис Ю. Сотченко [1] d.sotchenko@gosniihp.ru 0009-0006-3337-8060
Александр Ю. Игнатов [1] a.ignatov@gosniihp.ru 0009-0006-0101-9258
Юлия Ю. Печникова [1] yu.pechnikova@gosniihp.ru 0000-0002-9039-7368
Хачатур А. Балуян [1] kh.baluyan@gosniihp.ru 0000-0003-3011-8846
Владимир В. Мартиросян [1] v.martirosyan@gosniihp.ru 0000-0002-4026-5789

1 Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Б. Черкизовская ул., 26А, г. Москва, 107553, Россия

Аннотация. В соответствии с нормативными документами цвет хлебобулочных изделий определяется в ходе органолептического анализа, существенным недостатком которого является субъективность оценки. В настоящее время в мировой практике широко используется оценка цветовых характеристик различных пищевых продуктов, включая хлебобулочные изделия, с применением инструментального метода анализа. Наибольшее распространение получила колориметрическая система CIE Lab. Цель работы – определение влияния продолжительности выпечки в электрической подовой печи на цветовые характеристики хлебобулочного изделия из пшеничной муки высшего сорта. Объектом исследования являлись изделия, приготовленные по рецептуре батона нарезного с различной продолжительностью выпечки (15-40 мин). Образцы хлебобулочных изделий исследовали органолептическим анализом (вкус, цвет корки, цвет мякиша, запах хлеба, запах мякиша, состояние мякиша). Анализ цветовых характеристик корки и мякиша проводили при помощи прибора колориметра Chroma meter CR-410 (Konica Minolta, Япония) в системе CIE Lab. В результате проведённых исследований установлено, что с увеличением времени выпечки степень светлоты (L^*) уменьшается от 72,60±1,75% до 48,75±1,43%; параметр b^* значительно уменьшается, начиная с 35 минут выпечки от 23,43±0,28° до 15,42±1,30°; тогда, как параметр a^* сначала возрастает от 6,40±1,12° до пика в 10,57±0,43° к 30 минутам выпечки, а затем снижается. Сопоставление результатов по цветовым характеристикам хлебобулочного изделия с результатами органолептического анализа позволило установить диапазоны значений цветовых характеристик L^* (55-68%) и a^* (9-11°), при которых цвет корки хлеба и изделия в целом положительно оценивается дегустаторами. Параметр b^* не имел однозначной корреляции с результатами органолептического анализа. С применением международной системы CIE Lab измерения цветовых характеристик хлебобулочных изделий доказано, что для оценки цвета корки изделия из пшеничной муки наиболее информативным являются значения характеристик «L^*» и «a^*», коррелирующих с органолептической оценкой этих изделий. Эти характеристики могут быть использованы в качестве визуальных индикаторов в процессе автоматического контроля продолжительности выпечки.

Ключевые слова: хлебобулочное изделие, продолжительность выпечки, цвет, органолептический анализ, колориметрия, цветовые характеристики.

Study of color characteristics of bakery products made from wheat flour at different baking times

Larisa V. Zaytseva [1] l.zaitceva@gosniihp.ru 0000-0001-8176-1650
Denis Yu. Sotchenko [1] d.sotchenko@gosniihp.ru 0009-0006-3337-8060
Aleksandr Yu. Ignatov [1] a.ignatov@gosniihp.ru 0009-0006-0101-9258
Yuliya Yu. Pechnikova [1] yu.pechnikova@gosniihp.ru 0000-0002-9039-7368
Khachatur A. Baluyan [1] kh.baluyan@gosniihp.ru 0000-0003-3011-8846
Vladimir V. Martirosyan [1] v.martirosyan@gosniihp.ru 0000-0002-4026-5789

1 Scientific Research Institute for the Baking Industry, B. Cherkizovskaya str., 26A, Moscow, 107553, Russia

Для цитирования
Зайцева Л.В., Сотченко Д.Ю., Игнатов А.Ю., Печникова Ю.Ю., Балуян Х.А., Мартиросян В.В. Исследование цветовых характеристик хлебобулочных изделий из пшеничной муки при различной продолжительности выпечки // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 133–141. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-133-141

For citation
Zaytseva L.V., Sotchenko D.Yu., Ignatov A.Yu., Pechnikova Yu.Yu., Baluyan Kh.A., Martirosyan V.V. Study of color characteristics of bakery products made from wheat flour at different baking times. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 133–141. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-133-141

© 2026, Зайцева Л.В. и др. / Zaytseva L.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. According to regulatory documents, the color of bakery products is determined by organoleptic analysis, an essential fault of which is the assessment subjectivity. Instrumental analysis is widely used currently in world practice to evaluate the color characteristics of various food products, including bakery products. The most widely used colorimetric system is the CIE Lab. The aim of the study was to determine the effect of baking time in an electrical sole oven on the color characteristics of bakery products made from patent wheat flour. The objects of the study were products prepared according to the recipe for long loaf with different baking times (15-40 min). Samples of bakery products were examined by organoleptic analysis (taste, crust color, crumb color, bread aroma, crumb aroma, crumb condition). The analysis of the color characteristics of the crust and crumb was performed using a colorimeter Chroma meter CR-410 (Konica Minolta, Japan) in the CIE Lab system. The studies have shown that with increasing baking time, the lightness (L^*) decreases from 72.60±1.75% to 48.75±1.43%; the parameter b^* decreases significantly starting from 35 minutes of baking from 23.43±0.28° to 15.42±1.30°; while the parameter a^* initially increases from 6.40±1.12° to a peak value of 10.57±0.43° by 30 minutes of baking, and then decreases. Comparison of the results of the color characteristics of the bakery product with the results of the organoleptic analysis made it possible to establish the ranges of color characteristics L^* (55-68%) and a^* (9-11°), at which the color of the bread crust and the product as a whole is positively assessed by tasters. The b^* parameter did not have an unambiguous correlation with the results of the organoleptic analysis. Using the international CIE Lab system for measuring bakery product color characteristics, it has been proven that the most informative values for assessing the crust color of wheat flour products are the characteristics "L^*" and "a^*", which correlate with the organoleptic assessment of these products. These characteristics can be used as visual indicators in the automatic baking time control process.

Keywords: bakery product, baking time, color, organoleptic analysis, colorimetry, color characteristics.

Введение

Одной из ключевых характеристик, влияющих на выбор потребителем того или иного хлебобулочного изделия, наряду с ароматом является цвет. Недостаточно выраженный или, напротив, очень тёмный цвет может привести к формированию мнения о нарушении каких-либо параметров технологического процесса, и, следовательно, о понижении качества изделия. В настоящее время оценка цвета хлебобулочных изделий в соответствии с нормативными документами осуществляется при проведении органолептического анализа [1-4]. Существенным недостатком данного метода является субъективность оценки. Кроме квалификации дегустаторов на восприятие цвета хлебобулочного изделия огромное влияние оказывают степень освещённости помещения и длина волны источника света [5]. Таким образом, переход от субъективной оценки цвета при органолептическом анализе к объективной оценке с применением инструментального метода анализа является актуальным. С повышением заинтересованности населения в расширении ассортимента хлебобулочных изделий, обогащённых различными нутриентами, многие из которых оказывают существенное влияние на изменение цвета, необходимость стандартизации этого показателя возрастает.

Анализ зарубежных научных публикаций по этой тематике за последние 5 лет показывает увеличение количества исследований с определением цвета хлебобулочных и мучных кондитерских изделий с применением инструментального метода анализа. Наибольшее распространение получила колориметрическая система CIE Lab [6]. В системе CIE Lab колориметрия сводится к выражению значений цвета поверхности образцов в трёх осях: L^*, a^* и b^*. Ось L^* описывает светлоту (Lightness) цвета по шкале от 0 (абсолютно чёрный цвет) до 100% (абсолютно белый цвет). Ось a^* может иметь как отрицательное значение (–128°), которое соответствует зелёному цвету, так и положительное (+128°), соответствующее красному цвету. Ось b^* также имеет, как отрицательное значение (–128°), соответствующее синему цвету, так и положительное (+128°), соответствующее жёлтому цвету.

Венгерскими учёными проведены исследования по колориметрической оценке цвета различных видов муки с применением системы CIE Lab. Установлены достоверные отличия в цветовых характеристиках пшеничной муки, цельнозерновой муки, муки из тритикале и рисовой муки. Показано, что с применением инструментального метода может быть проведена идентификация муки [7]. В настоящее время инструментальный метод с применением системы CIE Lab широко используется при изучении влияние добавления различных видов муки (льняной, кунжутной, конопляной, муки чиа, муки из фиолетового риса) [8-10], цельнозерновой пшеничной муки из пророщенных и непроросщенных зёрен [11], а также отрубей [12, 13] на цветовые характеристики хлебобулочных изделий из пшеничной муки.

Учёными различных стран, включая и Российскую Федерацию, изучается изменение цветовых характеристик хлебобулочных изделий с добавлением различных трав [14-17], продуктов переработки фруктов и овощей и других культур [18-21], в том числе при разработке безглютеновых изделий [22, 23].

Отдельным направлением исследований является установление влияния технологических параметров подготовки сырья и последующей выпечки хлебобулочных изделий на цветовые характеристики анализируемых объектов [24-26].

В работе турецких учёных изучалось воздействие гидротермической обработки пшеничной, ячменной и рисовой муки с применением микроволн на изменение цветовых характеристик муки. Установлено, что для всех видов муки повышение исходной влажности при гидротермической обработке способствует снижению численного значения показателя *L**, увеличению показателя *b**. Значение показателя *a** также возрастает, за исключением пшеничной муки, где этот показатель остаётся практически без изменений [24]. Российскими учёными установлены существенные отличия в значениях цветовых характеристик (*L**, *a**, *b**) между хлебом при электроконтактном и конвективном способах выпечки, в последнем случае наблюдалось смещение цветовых характеристик к коричневым оттенкам [25]. В научно-исследовательском институте хлебопекарной промышленности проведены исследования по оценке влияния температурного поля пекарной камеры радиационно-конвективной печи на цветовые характеристики корки пшеничного хлеба. Установлено, что наименьший разброс значений (±5%) имеет показатель *L**, тогда как разброс значений для показателей *a*, b** составляет ±10-15% [26].

Таким образом, применение инструментальных методов анализа цветовых характеристик корки и мякиша хлебобулочных изделий может стать информативным показателем, как при изменении их рецептур за счёт внесения различных компонентов, так и вариации технологических параметров процесса производства. Внедрение этих методов на хлебопекарных предприятиях позволит стандартизировать цветовые характеристики различных видов хлебобулочных изделий за счёт их объективной оценки, что безусловно является актуальным. С другой стороны, установление взаимосвязи между показателями качества хлебобулочных изделий, оцениваемых органолептическим анализом, и их цветовыми характеристиками позволит контролировать процесс выпечки хлеба, путём внедрения в процесс компьютерного зрения с заложенным в нём допустимым интервалом по значениям цветовых характеристик. Для решения этой задачи необходимо интенсифицировать работы по изучению влияния технологических параметров процесса выпечки хлебобулочного изделия на его цветовые характеристики, что безусловно будет зависеть, как от вида изделия, так и от типа используемого оборудования.

Цель работы – определение влияния продолжительности выпечки в электрической подовой печи на цветовые характеристики хлебобулочного изделия из пшеничной муки высшего сорта.

Материалы и методы

Тесто готовили безопарным способом из муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта согласно рецептуре батона нарезного (таблица 1).

Таблица 1.

Унифицированная рецептура батона нарезного

Table 1.

The unified formulation for white long loaf

Наименование сырья | Name of raw material	Количество вносимого сырья, % к массе муки | Amount of added raw material, % of flour weight
Мука пшеничная, в.с. | Patent wheat flour	100
Дрожжи прессованные хлебопекарные | Pressed baker's yeast	2,5
Соль пищевая | Table salt	1,5
Сахар белый | White sugar	4,0
Маргарин | Margarine	3,5
Вода | Water	По расчёту, исходя из влажности теста, 43% | According to calculations based on the dough moisture content, 43%

Для исследований было выбрано хлебобулочное изделие по рецептуре батона нарезного, пользующееся наибольшим потребительским спросом. Замес теста осуществляли в тестомесильной машине SP80D (Diosna, Германия): на первой скорости (в течение 4 мин) до равномерного распределения всех компонентов, на второй скорости (в течение 6 мин) до формирования структуры теста. Созревание теста длилось 120 минут при температуре 33°С, обеспечивая оптимальные условия для жизнедеятельности дрожжей и молочнокислых бактерий. Выброженное тесто делили на куски (450 гр.), формовали и отправляли на расстойку. Окончательная расстойка тестовых заготовок продолжалась в среднем 65 минут при температуре 37-38°С и относительной влажности 75-80%. Созревание теста и его расстойку осуществляли с использованием оборудования Condo (Miwe, Германия).

Изделия выпекали в электрической подовой печи при температуре 230°С продолжительностью 2 мин, далее при 210°С в течение 13-38 мин. Общая продолжительность выпечки изделий составила 15, 20, 25, 30, 35 и 40 минут. Подача пара осуществлялась в первые минуты выпечки.

Через 18-20 часов после выпечки проводили органолептический анализ изделий (вкус, цвет корки, цвет мякиша, запах хлеба, запах мякиша, состояние мякиша), а также анализ цветовых характеристик корки и мякиша при помощи прибора колориметра Chroma meter CR-410 (Konica Minolta, Япония) в системе CIE Lab. Показания цветовых характеристик в каждом образце (2 повторности) определяли в пяти точках корки и трёх точках мякиша, равномерно удалённых друг от друга (середина и 2-4 крайних точки). Полученные данные обрабатывались в программе Excel, с расчётом средних значений L^*, a^*, b^* и ΔE^* для каждого опытного образца. Достоверность различий оценивали методом однофакторного дисперсионного анализа при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Средние значения цветовых характеристик (L^*, a^*, b^*, ΔE^*) корки и мякиша опытных образцов хлебобулочных изделий из пшеничной муки высшего сорта, изготовленных при различной продолжительности выпечки приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2.

Влияние продолжительности выпечки на цветовые характеристики корки хлебобулочных изделий

Table 2.

The influence of baking time on the color characteristics of the crust of bakery products

Продолжительность выпечки, мин | Baking time, min		15	20	25	30	35	40
Цветовые характеристики | Color characteristics	L^*, %	72,60±0,84	68,69±0,65	**67,73**±0,87	**62,45**±0,58	**54,99**±0,60	48,75±0,69
	a^*, °	6,40±0,54	8,14±0,37	**9,07**±0,45	**10,57**±0,21	**10,48**±0,12	7,63±0,50
	b^*, °	23,43±0,28	23,11±0,20	23,31±0,13	21,55±0,28	15,42±0,63	7,21±1,06
	ΔE^*	13,75±1,02	17,76±0,72	19,10±0,95	24,07±0,56	30,95±0,62	37,84±0,86
Цвет корки | Crust color							
Внешний вид хлеба | Appearance of bread							

Полученные с помощью колориметра значения цветовых характеристик использовали для расчёта насыщенности цвета C^* (при $C^* = 0$ цвет образца серый) и угла цветового тона h^* по формулам [20]:

$$C^* = \sqrt{(a^* + b^*)}, \quad (1)$$

$$h^* = arctg\frac{a^*}{b^*}. \quad (2)$$

По формулам, приведённым ниже, также рассчитаны:

– индекс побурения (Browning index)

$$BI^* = \frac{100 \times (X - 0,31)}{0,172}, \quad (3)$$

где $X = \frac{a^* + (1,75 \times L^*)}{(5,645 \times L^*) + a^* - (3,012 \times b^*)}$. (4)

– индекс белизны (Whiteness index)

$$WI^* = \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}. \quad (5)$$

Таблица 3.

Влияние продолжительности выпечки на цветовые характеристики мякиша хлебобулочных изделий

Table 3.

The influence of baking time on the color characteristics of the crumb of bakery products

Продолжительность выпечки, мин | Baking time, min		15	20	25	30	35	40
Цветовые характеристики | Color characteristics	L^*, %	80,21±0,52	79,63±0,27	80,15±0,23	79,37±0,26	79,69±0,27	79,18±0,25
	a^*, °	–0,16±0,04	–0,21±0,02	–0,24±0,02	–0,19±0,03	–0,17±0,03	–0,14±0,02
	b^*, °	15,35±0,15	15,37±0,14	15,39±0,09	15,38±0,10	15,45±0,07	15,59±0,12
	ΔE^*	5,43±0,25	5,60±0,14	5,29±0,17	5,78±0,18	5,53±0,16	5,76±0,19
Цвет мякиша | Crumb color							
Внешний вид хлеба | Appearance of bread							

– индекс желтизны (Yellowness index)

$$YI^* = \frac{142{,}86 \times b^*}{L^*}. \qquad (6)$$

Полученные расчётные данные цветовых характеристик корки и мякиша представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4.

Расчётные цветовые характеристики корки хлебобулочных изделий при различной продолжительности выпечки

Table 4.

Calculated color characteristics of the crust of bakery products at different baking times

Цветовые характеристики | Color characteristics	Продолжительность выпечки, мин | Baking time, min					
	15	20	25	30	35	40
*C**	5,14±0,07	5,64±0,04	5,59±0,04	5,65±0,02	5,21±0,07	3,53±0,21
*h**	9,68±1,14	19,85±0,81	18,65±0,98	26,74±0,66	33,32±1,00	54,83±3,03
*BI**	37,73±1,56	49,51±1,00	47,78±1,26	53,25±0,40	47,79±1,17	23,43±2,83
*WI**	32,71±0,86	40,17±0,58	38,92±0,77	44,72±0,41	48,40±0,36	52,87±0,47
*YI**	42,13±0,98	48,74±0,57	47,78±0,65	48,87±0,27	41,92±1,27	17,45±2,81

Таблица 5.

Расчётные цветовые характеристики мякиша хлебобулочных изделий при различной продолжительности выпечки

Table 5.

Calculated color characteristics of the crumb of bakery products at different baking times

Цветовые характеристики | Color characteristics	Продолжительность выпечки, мин | Baking time, min					
	15	20	25	30	35	40
*C**	3,93±0,02	3,91±0,02	3,89±0,01	3,87±0,01	3,91±0,01	3,93±0,02
*h**	–0,38±0,16	–0,70±0,09	–0,82±0,06	–0,91±0,10	–0,43±0,10	–0,42±0,09
*BI**	20,59±0,33	20,70±0,28	20,39±0,11	20,18±0,19	20,61±0,15	21,07±0,21
*WI**	24,79±0,46	25,50±0,27	25,29±0,16	25,36±0,23	25,44±0,22	26,09±0,21
*YI**	27,55±0,37	27,78±0,32	27,45±0,13	27,22±0,22	27,60±0,17	28,14±0,23

Анализ всего массива данных по определению цветовых характеристик корки хлебобулочных изделий из пшеничной муки высшего сорта (таблица 4) в параметрах цветового пространства CIE Lab позволил установить следующее:

– с увеличением продолжительности выпечки степень светлоты цвета (L^*) снижается от 72,60±0,84% до 48,75±0,69%, что свидетельствует о потемнении корки;

– значения показателя a^* с увеличением продолжительности выпечки от 15 до 30 мин возрастают с 6,4±0,54° до 10,57±0,21° и не меняются при 35 мин выпечки, а затем снижаются практически до первоначального уровня к 40 мин выпечки, то есть корка сначала приобретает более красноватый оттенок, затем частично теряет его;

– значения показателя b^* остаются практически неизменными при продолжительности выпечки 15-30 мин, а начиная с 35 минут выпечки отмечено резкое снижение значений (в 3 раза к 40 мин), что указывает на потерю жёлтого оттенка и затемнение цвета;

– ΔE^* увеличивается с 13,75±1,02 до 37,84±0,86, что свидетельствует о значительном визуальном изменении цвета по мере увеличения продолжительности выпечки;

– насыщенность цвета (C^*) не претерпевает значительных вариаций при выпечке в течение 15-35 мин, но при 40 мин выпечки снижается на 30%;

– значение угла цветового тона (h^*) минимальное при 15 мин выпечки, затем возрастает и не меняется в течение 20-25 мин выпечки, затем продолжается дальнейший рост;

– индекс побурения (BI^*) к 20 мин выпечки возрастает и далее практически не меняется до 30 мин, что свидетельствует об образовании коричневых оттенков в корке хлеба, дальнейшее увеличение продолжительности выпечки способствует снижению этого индекса в связи с переходом от коричневых оттенков в чёрные;

– индекс белизны (WI^*), как и следовало ожидать, возрастает с увеличением продолжительности выпечки с 15 до 40 минут, что подтверждает переход цвета из светлых оттенков в тёмные;

– индекс желтизны (YI^*) сначала возрастает до 48-49 и практически остаётся неизменным при 20-30 мин выпечки, что свидетельствует об оптимальной продолжительности образования жёлтых оттенков в корке хлеба, дальнейшее увеличение продолжительности выпечки ведёт к снижению его значения, связанного с переходом жёлтого цвета в коричневый.

Анализ данных по определению цвета мякиша хлебобулочного изделия из пшеничной муки в параметрах цветового пространства CIE Lab показал, что с увеличением продолжительности выпечки показатели L^*, b^* и C^* существенно не меняются: L^* = 79,70±0,18%; b^* = 15,42±0,04°;

*C** = 3,91±0,01 (таблицы 3 и 5). Показатель *a** достигает максимума к 25 мин выпечки. Незначительные вариации значений показателей обусловлены тем, что внутренняя часть хлеба подвергается меньшему термическому воздействию по сравнению с коркой изделия. Угол цветового тона (*h**) возрастает к 30 мин выпечки, а затем снова снижается до первоначального уровня. Индексы побурения (*BI**), белизны (*WI**) и желтизны (*YI**) практически не меняются при различной продолжительности выпечки, но максимальное их значение зафиксировано при 40 мин выпечки, тогда же был отмечен несколько более тёмный оттенок цвета у мякиша при органолептическом анализе (таблица 5).

Исследованы органолептические показатели качества образцов хлебобулочных изделий с различной продолжительностью выпечки (рисунок 1).

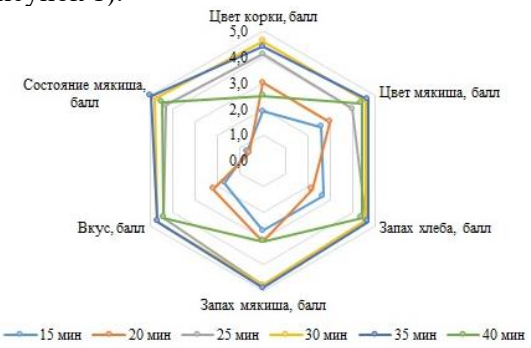


Рисунок 1. Квалиметрическая оценка образцов хлеба с различной продолжительностью выпечки
Figure 1. Qualimetric evaluation of bread samples at different baking time

Установлено, что в исследуемых условиях продолжительность процесса 15-20 минут является недостаточной для получения качественного изделия – мякиш был сырым, комковался, имел неприятный запах, бледный цвет корки. Интересно отметить, что в этом случае дегустаторы также снижали оценку за цвет мякиша. Это вероятно обусловлено тем, что непропечённость мякиша влияла на восприятие его цвета дегустаторами, что приводило к заниженным баллам при оценке этого дескриптора. При продолжительности выпечки 40 мин отмечено ухудшение состояния мякиша (суховат) и его запаха, а также чрезмерное потемнение корки и некоторое потемнение мякиша изделия. Наилучшие оценки по всем дескрипторам даны образцам с продолжительностью выпечки 30 и 35 мин. Хорошие оценки получили образцы с продолжительностью выпечки 25 мин. Цвет корки при продолжительности выпечки 25, 30 и 35 минут получил в среднем 4,1; 4,6 и 4,4 балла, соответственно (таблица 6).

Продолжительность выпечки 40 минут также способствовала получению более толстой корки у хлебобулочного изделия, затрудняющей его разжёвываемость. Таким образом, в исследуемых условиях продолжительность выпечки в течение 25-35 мин гарантирует получение хлебобулочного изделия с приемлемыми потребительскими характеристиками.

Таблица 6.

Сопоставление органолептической оценки цвета корки образцов хлебобулочных изделий с цветовыми характеристиками в системе CIE Lab

Table 6.

Comparison of organoleptic assessment of crust color of bakery product samples with color characteristics in the CIE Lab system

Продолжительность выпечки, мин | Baking time, min	*L**, %	*a**, °	Толщина корки, см | Crust thickness, cm	Органолептическая оценка, балл | Organoleptic assessment, score
15	72,60±0,84	6,40±0,54	0,45	1,9
20	68,89±0,55	8,14±0,37	0,50	3,0
25	67,73±0,50	9,07±0,45	0,52	4,1
30	62,45±0,58	10,57±0,21	0,60	4,6
35	54,99±0,60	10,48±0,12	0,70	4,4
40	48,75±0,69	7,63±0,50	0,87	2,5

Проведено сопоставление значений цветовых характеристик, полученных инструментальным методом, с балльной оценкой дегустационной комиссии при органолептическом анализе. В результате установлено, что рекомендованное значение параметров для получения качественного изделия должно находиться в пределах: *L** – 55-68%; *a** – 9-11°.

В связи с тем, что значения показателя *b** при продолжительности выпечки 15, 20 и 25 минут были близки при совершенно различной органолептической оценке (рис.1), этот показатель не может быть использован в дальнейшем для балльной оценки хлебобулочного изделия из пшеничной муки инструментальным методом.

Заключение

С использованием международной системы CIE Lab исследовано изменение цветовых характеристик хлебобулочных изделий при различной продолжительности выпечки и доказано, что для оценки цвета корки изделия

из пшеничной муки наиболее информативным является использование характеристик «L^*» и «a^*», коррелирующих с органолептической оценкой этих изделий, что может быть использовано для разработки балльной оценки цвета корки с использованием инструментального метода.

На основании анализа цвета корки хлебобулочного изделия из пшеничной муки при помощи колориметра Chroma meter CR-410 в системе CIE Lab установлены диапазоны значений цветовых характеристик L^* (55-68%) и a^* (9-11°), при которых цвет корки хлеба, а также другие дескрипторы (вкус, цвет мякиша, запах хлеба, запах мякиша, состояние мякиша), положительно оцениваются дегустаторами, что может быть использовано в качестве визуального индикатора для контроля продолжительности выпечки.

Цветовые характеристики мякиша хлебобулочного изделия из пшеничной муки существенно не меняются в зависимости от продолжительности выпечки. Наибольшие изменения, связанные с некоторым потемнением мякиша, отмечены при продолжительности выпечки 40 мин.

Литература

1 Быковская Е.И., Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А., Говядова А.И. Анализ показателей качества цельнозернового хлеба на хмелевых заквасках // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 1. С. 71–78. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-71-78

2 Хлопов А.А., Ефименко С.Г., Лыбенко Е.С. Влияние льняной муки на качество ржаного хлеба // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 74–80. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-74-80

3 Вебер А.Л., Леонова С.А. Возможности применения растительной дисперсии из зерна бобовых культур для улучшения свойств пшеничного хлеба // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 213–223. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-213-223

4 Дранников А.В., Шевцов А.А., Полянский К.К., Домбровская Я.П. и др. Разработка технологии пшенично-тритикалевого хлеба, устойчивого к микробиологической порче // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 1. С. 56–62. doi: 10.20914/2310-1202-2024-1-56-62

5 Chen W., Wu X., Liu Z. et al. The impact of illuminance level, correlated colour temperature and viewing background on the purchase intention for bread and cakes // Food Quality and Preference. 2022. V. 98. P. 104537. doi: 10.1016/j.foodqual.2022.104537

6 Балуян Х.А., Зайцева Л.В., Печникова Ю.Ю. и др. Перспективы использования инструментальных методов в определении цвета хлебобулочных изделий (предметный обзор) // Пищевая промышленность. 2025. № 6. С. 71–75. doi: 10.52653/PPI.2025.6.6.015

7 Horvath A., Kajdi F., Doka O. Classification of flours based on color measurements and evaluation using multivariate mathematical methods // Heliyon. 2025. V. 11. № 16. P. e44096. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e44096

8 Fatima S., Altemimi A.B., Ali K. et al. A comprehensive review on effect of chia seed, flaxseed, sesame seed and their derivatives on quality of bakery products // Applied Food Research. 2025. V. 5. № 1. P. 101534. doi: 10.1016/j.afres.2025.101534

9 Mussio C., Del Vecchio L., García-Pérez P. et al. Hemp flour enriched bread: effect on metabolomic and technological profile following in vitro digestion // Food Chemistry. 2026. V. 500. P. 147515. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.147515

10 Qin Y., Jiang K., Song J. et al. Effect of roselle and purple rice powder on baking quality and aroma characteristic of bread // LWT. 2024. V. 199. P. 116134. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116134

11 Abdi R., Sharma M., Cao W. et al. Sprouted wheat wholemeal as a techno-functional ingredient in hard pretzels // Food Research International. 2024. V. 194. P. 114878. doi: 10.1016/j.foodres.2024.114878

12 Seo Y., Moon Y., Kweon M. Effect of purple-colored wheat bran addition on quality and antioxidant property of bread and optimization of bread-making conditions // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 9. P. 4034. doi: 10.3390/app11094034

13 Tayefe M., Fadayi Eshkiki L., Rahbar Dalir Z., Nasrollahzadeh Masoule A. Optimization of green tea extract, rosemary extract, and rice bran in multifunctional bread: A concept for reduction of acrylamide and phytic acid // Heliyon. 2025. V. 11. P. e41182. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41182

14 Сокурова Д.А., Запорожец Г.С., Сметанкина В.С. и др. Оценка цвета хлебобулочных изделий с добавлением измельченного сафлора с использованием колориметра // Сурский вестник. 2020. Т. 11. № 3. С. 65–70.

15 Akbarbaglu Z., Mazloomi N., Sarabandi K. et al. Stabilization of antioxidant thyme-leaves extract (Thymus vulgaris) within biopolymers and its application in functional bread formulation // Future Foods. 2024. V. 9. P. 100356. doi: 10.1016/j.fufo.2024.100356

16 Pereira T., Costa S., Barroso S. et al. Development and optimization of high-protein and low-saturated fat bread formulations enriched with lupin and microalgae // LWT. 2024. V. 191. P. 115612. doi: 10.1016/j.lwt.2023.115612

17 Cannas M., Conte P., Urgeghe P.P. et al. Artichoke by-products: Promising ingredients for breadstick fortification // LWT. 2024. V. 202. P. 116307. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116307

18 Mohanakumar A., Dhenge R., Alinovi M. et al. The effect of natural basil extract on oxidative stability and techno-functional properties of breadsticks // LWT. 2025. V. 227. P. 117987. doi: 10.1016/j.lwt.2025.117987

19 Перфилова О.В., Брыксина К.В., Иванова Е.П., Толстова Н.Ю. Влияние фруктовой и овощной паст на органолептические показатели качества ржано-пшеничного хлеба // Наука и образование. 2022. № 4. С. 205–207.

20 Маслов А.В., Мингалеева З.Ш., Ямашев Т.А., Старовойтова О.В. Влияние комплексной добавки на цветовые характеристики пшеничного и ржано-пшеничного хлеба // Известия вузов. Пищевая технология. 2023. № 4. С. 45–51. doi: 10.26297/0579-3009.2023.4.8

21 Pokuah A.A., Atuna R.A., Akabanda F., Amagloh F.K. Enrichment of bread with soymilk using response surface methodology // Food Chemistry Advances. 2024. V. 4. P. 100570. doi: 10.1016/j.focha.2023.100570

22 Нилова Л.П., Малютенкова С.М. Использование порошка мескита в производстве безглютенового печенья // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 4. С. 154–159.

23 Penalver R., Nieto G. Developing a functional gluten-free sourdough bread by incorporating quinoa, amaranth, rice and spirulina // LWT. 2024. V. 201. P. 116162. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116162

24 Tok Ö., Tuncel N.B. The effect of microwave-assisted hydrothermal treatment on physicochemical and functional properties of wheat, barley, and rye flours // Journal of Cereal Science. 2024. V. 117. P. 103925. doi: 10.1016/j.jcs.2024.103925

25 Хузин Ф.К., Ямашев Т.А., Канарский А.В., Гематдинова В.М. Влияние способа выпечки и рецептурного состава хлебобулочных изделий на цветовые характеристики их поверхности // Хлебопродукты. 2020. № 1. С. 56–59. doi: 10.32462/0235-2508-2020-29-1-56-59

26 Печникова Ю.Ю., Черных В.Я. Оценка равномерности температурного поля пекарной камеры печи ППЭ-800П-1 // Поландовские чтения: сб. мат. VII Междунар. науч.-практ. молодёж. конф. М.: ФГАНУ НИИХП, 2025. С. 147–152.

References

1 Bykovskaya E.I., Kovaleva A.E., Pyanikova E.A., Govyadova A.I. Analysis of Quality Indicators of Whole Grain Bread on Hop Sourdoughs. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 71–78. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-71-78 (in Russian).

2 Khlopov A.A., Efimenko S.G., Lybenko E.S. Influence of Linseed Flour on the Quality of Rye Bread. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 74–80. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-74-80 (in Russian).

3 Veber A.L., Leonova S.A. Possibilities of Using Plant Dispersion from Legume Grain to Improve the Properties of Wheat Bread. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 213–223. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-213-223 (in Russian).

4 Drannikov A.V., Shevtsov A.A., Polyansky K.K., Dombrovskaya Ya.P. et al. Development of Technology for Wheat-Triticale Bread Resistant to Microbiological Spoilage. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 1. pp. 56–62. doi: 10.20914/2310-1202-2024-1-56-62 (in Russian).

5 Chen W., Wu X., Liu Z. et al. The impact of illuminance level, correlated colour temperature and viewing background on the purchase intention for bread and cakes. Food Quality and Preference. 2022. vol. 98. article 104537. doi: 10.1016/j.foodqual.2022.104537.

6 Baluyan Kh.A., Zaitseva L.V., Pechnikova Yu.Yu. et al. Prospects for the Use of Instrumental Methods in Determining the Color of Bakery Products (A Thematic Review). Food Industry. 2025. no. 6. pp. 71–75. doi: 10.52653/PPI.2025.6.6.015 (in Russian).

7 Horvath A., Kajdi F., Doka O. Classification of flours based on color measurements and evaluation using multivariate mathematical methods. Heliyon. 2025. vol. 11. no. 16. article e44096. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e44096.

8 Fatima S., Altemimi A.B., Ali K. et al. A comprehensive review on effect of chia seed, flaxseed, sesame seed and their derivatives on quality of bakery products. Applied Food Research. 2025. vol. 5. no. 1. article 101534. doi: 10.1016/j.afres.2025.101534.

9 Mussio C., Del Vecchio L., García-Pérez P. et al. Hemp flour enriched bread: effect on metabolomic and technological profile following in vitro digestion. Food Chemistry. 2026. vol. 500. article 147515. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.147515.

10 Qin Y., Jiang K., Song J. et al. Effect of roselle and purple rice powder on baking quality and aroma characteristic of bread. LWT. 2024. vol. 199. article 116134. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116134.

11 Abdi R., Sharma M., Cao W. et al. Sprouted wheat wholemeal as a techno-functional ingredient in hard pretzels. Food Research International. 2024. vol. 194. article 114878. doi: 10.1016/j.foodres.2024.114878.

12 Seo Y., Moon Y., Kweon M. Effect of purple-colored wheat bran addition on quality and antioxidant property of bread and optimization of bread-making conditions. Applied Sciences. 2021. vol. 11. no. 9. article 4034. doi: 10.3390/app11094034.

13 Tayefe M., Fadayi Eshkiki L., Rahbar Dalir Z., Nasrollahzadeh Masoule A. Optimization of green tea extract, rosemary extract, and rice bran in multifunctional bread: A concept for reduction of acrylamide and phytic acid. Heliyon. 2025. vol. 11. article e41182. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41182.

14 Sokurova D.A., Zaporozhets G.S., Smetankina V.S. et al. Evaluation of the Color of Bakery Products with the Addition of Ground Safflower Using a Colorimeter. Sursky Bulletin. 2020. vol. 11. no. 3. pp. 65–70. (in Russian).

15 Akbarbaglu Z., Mazloomi N., Sarabandi K. et al. Stabilization of antioxidant thyme-leaves extract (Thymus vulgaris) within biopolymers and its application in functional bread formulation. Future Foods. 2024. vol. 9. article 100356. doi: 10.1016/j.fufo.2024.100356.

16 Pereira T., Costa S., Barroso S. et al. Development and optimization of high-protein and low-saturated fat bread formulations enriched with lupin and microalgae. LWT. 2024. vol. 191. article 115612. doi: 10.1016/j.lwt.2023.115612.

17 Cannas M., Conte P., Urgeghe P.P. et al. Artichoke by-products: Promising ingredients for breadstick fortification. LWT. 2024. vol. 202. article 116307. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116307.

18 Mohanakumar A., Dhenge R., Alinovi M. et al. The effect of natural basil extract on oxidative stability and techno-functional properties of breadsticks. LWT. 2025. vol. 227. article 117987. doi: 10.1016/j.lwt.2025.117987.

19 Perfilova O.V., Bryksina K.V., Ivanova E.P., Tolstova N.Yu. Influence of Fruit and Vegetable Pastes on Organoleptic Quality Indicators of Rye-Wheat Bread. Science and Education. 2022. no. 4. pp. 205–207. (in Russian).

20 Maslov A.V., Mingaleeva Z.Sh., Yamashev T.A., Starovoitova O.V. Influence of a Complex Additive on the Color Characteristics of Wheat and Rye-Wheat Bread. News of Universities. Food Technology. 2023. no. 4. pp. 45–51. doi: 10.26297/0579-3009.2023.4.8 (in Russian).

21 Pokuah A.A., Atuna R.A., Akabanda F., Amagloh F.K. Enrichment of bread with soymilk using response surface methodology. Food Chemistry Advances. 2024. vol. 4. article 100570. doi: 10.1016/j.focha.2023.100570.

22 Nilova L.P., Malyutenkova S.M. The Use of Mesquite Powder in the Production of Gluten-Free Cookies. XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus. 2023. vol. 12. no. 4. pp. 154–159. (in Russian).

23 Penalver R., Nieto G. Developing a functional gluten-free sourdough bread by incorporating quinoa, amaranth, rice and spirulina. LWT. 2024. vol. 201. article 116162. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116162.

24 Tok Ö., Tuncel N.B. The effect of microwave-assisted hydrothermal treatment on physicochemical and functional properties of wheat, barley, and rye flours. Journal of Cereal Science. 2024. vol. 117. article 103925. doi: 10.1016/j.jcs.2024.103925.

25 Khuzin F.K., Yamashev T.A., Kanarsky A.V., Gematdinova V.M. Influence of the Baking Method and Recipe Composition of Bakery Products on the Color Characteristics of Their Surface. Khleboprodukty. 2020. no. 1. pp. 56–59. doi: 10.32462/0235-2508-2020-29-1-56-59 (in Russian).

26 Pechnikova Yu.Yu., Chernykh V.Ya. Assessment of the Uniformity of the Temperature Field of the Baking Chamber of the PPE-800P-1 Oven. In: Polandov Readings: Collection of Materials of the VII International Scientific and Practical Youth Conference. Moscow: FSBSI RIHP, 2025. pp. 147–152. (in Russian).

Сведения об авторах

Лариса В. Зайцева д.т.н., главный научный сотрудник, центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Б. Черкизовская ул., 26А, г. Москва, 107553, Россия, l.zaitceva@gosniihp.ru
https://orcid.org/0000-0001-8176-1650

Денис Ю. Сотченко младший научный сотрудник, центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Б. Черкизовская ул., 26А, г. Москва, 107553, Россия, d.sotchenko@gosniihp.ru
https://orcid.org/0009-0006-3337-8060

Александр Ю. Игнатов инженер, центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Б. Черкизовская ул., 26А, г. Москва, 107553, Россия, a.ignatov@gosniihp.ru
https://orcid.org/0009-0006-0101-9258

Юлия Ю. Печникова младший научный сотрудник, центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Б. Черкизовская ул., 26А, г. Москва, 107553, Россия, yu.pechnikova@gosniihp.ru
https://orcid.org/0000-0002-9039-7368

Хачатур А. Балуян к.т.н., старший научный сотрудник, центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Б. Черкизовская ул., 26А, г. Москва, 107553, Россия, kh.baluyan@gosniihp.ru
https://orcid.org/0000-0003-3011-8846

Владимир В. Мартиросян д.т.н., заместитель директора по научной работе, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Б. Черкизовская ул., 26А, г. Москва, 107553, Россия, v.martirosyan@gosniihp.ru
https://orcid.org/0000-0002-4026-5789

Information about authors

Larisa V. Zaytseva Dr. Sci. (Engin.), chief researcher, center for food rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya str., Moscow, 107553, Russia, l.zaitceva@gosniihp.ru
https://orcid.org/0000-0001-8176-1650

Denis Yu. Sotchenko junior researcher, center for food rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya str., Moscow, 107553, Russia, d.sotchenko@gosniihp.ru
https://orcid.org/0009-0006-3337-8060

Aleksandr Yu. Ignatov engineer, center for food rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya str., Moscow, 107553, Russia, a.ignatov@gosniihp.ru
https://orcid.org/0009-0006-0101-9258

Yuliya Yu. Pechnikova junior researcher, center for food rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya str., Moscow, 107553, Russia, yu.pechnikova@gosniihp.ru
https://orcid.org/0000-0002-9039-7368

Khachatur A. Baluyan Cand. Sci. (Engin.), senior researcher, center for food rheology, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya str., Moscow, 107553, Russia, kh.baluyan@gosniihp.ru
https://orcid.org/0000-0003-3011-8846

Vladimir V. Martirosyan Dr. Sci. (Engin.), deputy director for researches, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya str., Moscow, 107553, Russia, v.martirosyan@gosniihp.ru
https://orcid.org/0000-0002-4026-5789

Вклад авторов

Лариса В. Зайцева обзор литературных источников по исследуемой проблеме, написала рукопись и сделала заключение о проделанной работе

Денис Ю. Сотченко провёл анализ и статистическую обработка полученных результатов

Александр Ю. Игнатов провёл эксперимент по анализу цветовых характеристик хлебобулочных изделий

Юлия Ю. Печникова провела эксперимент по выпечке хлебобулочных изделий

Хачатур А. Балуян предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

Владимир В. Мартиросян корректировал рукопись до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Contribution

Larisa V. Zaytseva review of the literature on an investigated problem, wrote the manuscript and prepared a conclusion

Denis Yu. Sotchenko analyzed and statistically processed the results

Aleksandr Yu. Ignatov conducted an experiment on analyzing the color characteristics of bakery products

Yuliya Yu. Pechnikova conducted an experiment on baking bakery products

Khachatur A. Baluyan proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Vladimir V. Martirosyan correct the manuscript before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 14/01/2026	**После редакции** 02/02/2026	**Принята в печать** 02/03/2027

Received 14/01/2026	**Accepted in revised** 02/02/2026	**Accepted** 02/03/2027

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-142-150 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.9:633.358 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Применение растительных компонентов, улучшающих структуру, вкус и пищевые качества мясных продуктов

Альберт Я. Гизатов [1] kbad@yandex.ru 0000-0003-2753-1082
Наталья В. Гизатова [1] natgiz@yandex.ru 0000-0002-9222-767X

1 Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, 450001, Уфа

Аннотация. Проведено комплексное исследование функционально-технологических свойств измельченной чечевицы и ее влияния на качество рубленых мясных полуфабрикатов. Основной целью являлась разработка технологии производства котлет с частичной заменой мясного сырья на чечевичную муку. В ходе работы изучались адгезионные, эмульгирующие и влагосвязывающие свойства чечевичной муки, а также влияние степени ее гидратации на эти параметры. Установлено, что гидратированная чечевичная мука обладает липкостью в 3-5 раз выше, чем у мясного фарша, и высокой эмульгирующей способностью (96,4%), что способствует улучшению структуры комбинированных фаршевых систем. С помощью двухфакторного экспериментального планирования определены оптимальные технологические параметры производства котлет из фарша (70% говядины, 30% свинины). Анализ результатов экспертных оценок позволил вывести уравнение регрессии и установить, что наивысшее качество продукта (9,6 балла из 10) достигается при использовании крупноизмельченного фарша (размер частиц ~2,5 мм) и содержании чечевичной муки 7,2%. Данные условия обеспечивают наилучшие органолептические показатели, сохраняя традиционные вкус и аромат мясных изделий. Исследование влагоудерживающей, влагосвязывающей и жироудерживающей способностей (ВУС, ВСС и ЖУС) показало, что внесение 7% гидратированной чечевичной муки (оптимальное соотношение мука:вода – 1:3) вместо части мясного сырья приводит к значительному улучшению этих функционально-технологических свойств. Максимальные значения ВУС, ВСС и ЖУС наблюдаются именно при данной дозировке, что объясняется синергическим взаимодействием растительных и мышечных белков способствующих стабилизации мясных эмульсий и снижению технологических потерь при тепловой обработке. Таким образом, частичная замена (7%) мясного сырья гидратированной чечевичной мукой (1:3) в производстве рубленых котлет технологически целесообразна и эффективна. Это решение позволяет повысить пищевую ценность готового продукта за счет улучшения аминокислотного состава, обогатить его пищевыми волокнами и биологически активными веществами, а также оптимизировать функционально-технологические характеристики фарша (адгезию, эмульгирующую и влагосвязывающую способность) без ухудшения органолептических свойств. Результаты исследования создают научную основу для расширения ассортимента комбинированных мясных продуктов функциональной направленности.

Ключевые слова: пищевая промышленность, чечевичная мука, мясные полуфабрикаты, двухфакторный эксперимент.

Application of plant components to improve the structure, flavor and nutritional quality of meat products

Albert Ya. Gizatov [1] kbad@yandex.ru 0000-0003-2753-1082
Natalia V. Gizatova [1] natgiz@yandex.ru 0000-0002-9222-767X

1 Bashkir State Agrarian University, 50-letiya Oktyabrya St., 34, Ufa, 450001, Russia

Abstract. A comprehensive study of the functional and technological properties of ground lentils and their effect on the quality of minced meat semi-finished products was conducted. The main goal was to develop a technology for producing cutlets with partial replacement of meat raw materials with lentil flour. The work studied the adhesive, emulsifying, and water-binding properties of lentil flour, as well as the effect of its degree of hydration on these parameters. It was established that hydrated lentil flour possesses adhesion 3-5 times higher than that of meat mince and has high emulsifying capacity (96.4%), which contributes to the improvement of the structure of combined mince systems. Using two-factor experimental design, the optimal technological parameters for producing cutlets from mince (70% beef, 30% pork) were determined. Analysis of expert evaluation results allowed for the derivation of a regression equation and established that the highest product quality (9.6 out of 10 points) is achieved using coarsely ground mince (particle size ~2.5 mm) and a lentil flour content of 7.2%. These conditions ensure the best organoleptic indicators while preserving the traditional taste and aroma of meat products. The study of water-holding capacity (WHC), water-binding capacity (WBC), and fat-binding capacity (FBC) showed that the introduction of 7% hydrated lentil flour (optimal flour:water ratio – 1:3) as a partial replacement for meat raw material leads to a significant improvement in these functional and technological properties. The maximum values of WHC, WBC, and FBC are observed precisely at this dosage, which is explained by the synergistic interaction of plant and muscle proteins, contributing to the stabilization of meat emulsions and reducing technological losses during heat treatment. Thus, partial replacement (7%) of meat raw material with hydrated lentil flour (1:3) in the production of minced cutlets is technologically feasible and effective. This solution enhances the nutritional value of the finished product by improving the amino acid composition, enriches it with dietary fiber and biologically active substances, and optimizes the functional and technological characteristics of the mince (adhesion, emulsifying, and water-binding capacity) without deteriorating the organoleptic properties. The research results provide a scientific basis for expanding the range of combined meat products with a functional orientation.

Keywords: food industry, lentil flour, meat semi-finished products, two-factor experiment.

Для цитирования
Гизатов А.Я., Гизатова Н.В. Применение растительных компонентов, улучшающих структуру, вкус и пищевые качества мясных продуктов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 142–150. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-142-150

For citation
Gizatov A.Y., Gizatova N.V. Application of plant components to improve the structure, flavor and nutritional quality of meat products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 142–150. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-142-150

© 2026, Гизатова А.Я. и др. / Gizatov A.Y et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В пищевой промышленности широко применяются различные физические процессы, среди которых важнейшим является измельчение. Уменьшение размера частиц продукта увеличивает площадь контактирующих поверхностей, что ускоряет биохимические и диффузионные процессы. Это особенно важно при переработке сырья животного и растительного происхождения [1, 2]. Данная технология активно используется в производстве муки, сахара, пива и других продуктов. Кроме того, растительные компоненты играют важную роль в создании геродиетических продуктов с повышенной биологической ценностью [3, 4].

При разработке таких продуктов особое внимание уделяется подбору ингредиентов. Компьютерное моделирование позволило определить оптимальные виды сырья с точки зрения аминокислотного состава. Среди крупяных культур наиболее подходящими оказались кукурузная крупа, овсяное толокно, пшено, гречиха, рис и геркулес, а среди овощей – морковь и капуста [5, 6]. Для корректировки аминокислотного профиля (снижения лизина и триптофана при увеличении доли метионина и цистина) были успешно протестированы несколько рецептурных композиций.

Композиция № 1: говядина 1 сорта, мясо голов, сухой костный бульон, гречиха, красная морковь;

Композиция № 2: говядина 1 сорта, мясная обрезь, геркулес, кукурузная крупа, сухой костный бульон.

Несмотря на положительный опыт производства комбинированных мясо-растительных продуктов, в российской мясной отрасли по-прежнему недостаточно используются нетрадиционные источники белка. Их применение остается ограниченным как в объемах переработки, так и в ассортименте выпускаемой продукции [7].

Кроме того, существующие технологии накладывают ограничения на количество добавляемых белковых компонентов. Их избыток может ухудшать органолептические свойства продукта – вкус, аромат, цвет и запах. Еще одной проблемой является зависимость от импортных соевых белков поскольку в России эта культура не отличается высокой урожайностью и выходом белка [8, 9].

Цель исследования – создание технологии производства мясных продуктов с включением измельченной чечевицы.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовали мясной фарш, приготовленный из говядины и свинины с применением разных способов измельчения и различного содержания чечевичной муки. Эксперимент проводили по двухфакторному плану (симметричная композиционная схема типа Bf).

В ходе работы оценивали физические и физико-химические характеристики измельченной чечевицы; химический состав чечевицы и комбинированных пищевых систем (модельных фаршей); свойства рецептурных композиций для производства рубленых мясных полуфабрикатов согласно общепринятым методикам.

Результаты

При разработке методов переработки сырья ключевую роль играет оценка функционально-технических характеристик муки, в частности её адгезионных свойств. Липкость, как один из ключевых параметров, отражает способность продукта к адгезии с контактными поверхностями и имеет решающее значение для формирования однородной плотной структуры без дефектов.

Экспериментальные данные показали, что максимальные показатели липкости чечевичной муки наблюдаются при минимальном количестве воды (рисунок 1). Однако при соотношении вода: мука менее 0,5:1 формирование однородной массы становится невозможным – часть муки остаётся не гидратированной.

Практические испытания продемонстрировали целесообразность использования гидратации в пропорциях 1:0,75 и 1:1, несмотря на некоторое снижение адгезионных свойств по сравнению с минимальным увлажнением. Такие соотношения обеспечивают технологическую эффективность процесса. Особенно важно учитывать, что в промышленных условиях мука обычно вводится либо в сухом виде, либо в виде концентрированной суспензии.

Следует отметить, что липкость гидратированной чечевичной муки в 3–5 раз превышает аналогичный показатель мясного фарша. Это свойство оказывает положительное влияние на технологический процесс, способствуя улучшению адгезионных характеристик конечного продукта при производстве полуфабрикатов.

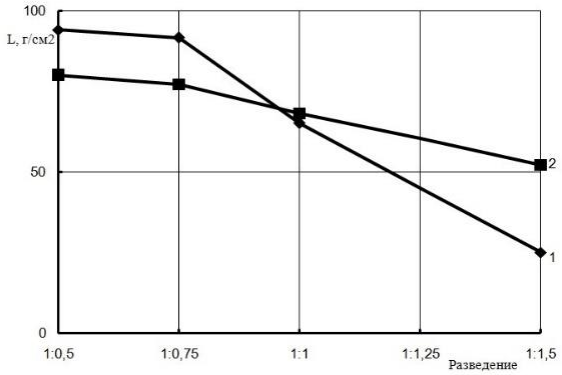


Рисунок 1. Липкость муки в зависимости от разведения: 1 – кривая для нашелушённой муки; 2-кривая для шелушенной муки.

Figure 1. Flour adhesiveness as a function of hydration ratio: 1 – curve for non-dehulled flour; 2 – curve for dehulled flour.

Экспериментальные данные показали, что адгезионные свойства гидратированной чечевичной муки в 3–5 раз выше, чем у мясных фаршей. Это приводит к улучшению клеящей способности комбинированных фаршевых систем, что существенно повышает качество производимых полуфабрикатов.

Особое значение в формировании структуры и консистенции готовой продукции имеют два ключевых параметра:

Эмульгирующая способность (ЭС) – показатель, характеризующий способность системы равномерно распределять и удерживать жировые частицы [10.]

Стабильность эмульсии (СЭ) – параметр, отражающий устойчивость системы к выделению жира при термической обработке [11.]

Методика определения ЭС включала приготовление эмульсии из равных объемов подсолнечного масла и воды с добавлением навески чечевичной муки с последующим центрифугированием. Для обеспечения достоверности результатов использовали идентичное мясное сырьё, что подтверждается одинаковыми начальными точками на графиках.

Чечевичная мука продемонстрировала исключительно высокую эмульгирующую способность – 96,4%. Полученные данные по ЭС и СЭ представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

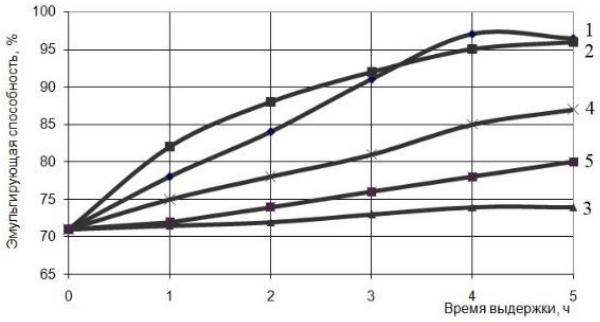


Рисунок 2. Изменение эмульгирующей способности модельных фаршей в зависимости от массовой доли добавляемой измельченной чечевицы: 1 – 7%, 2 – 11%, 3 – контроль, 4 – 5%, 5 – 3%

Figure 2. Emulsifying capacity of model mince systems vs. mass fraction of ground lentils: 1 – 7%, 2 – 11%, 3 – control, 4 – 5%, 5 – 3%

Проведенные исследования показали, что введение 7% измельченной чечевицы в мясной фарш способствует значительному повышению эмульгирующей способности (ЭС) и стабильности эмульсии (СЭ). Этот эффект объясняется синергетическим взаимодействием растительных белков чечевицы с мышечными белками, что обеспечивает образование устойчивых мясных эмульсий. Полученные данные свидетельствуют, что применение чечевичной муки в указанной пропорции практически исключает риск образования бульонно-жировых отеков в готовой продукции.

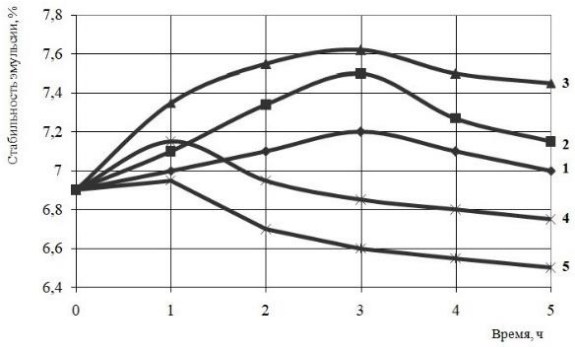


Рисунок 3. Изменение стабильности эмульсии модельных фаршей в зависимости от массовой доли добавляемой измельченной чечевицы: 1 – 7%, 2 – 11%, 3 – контроль, 4 – 5%, 5 – 3%

Figure 3. Effect of ground lentil content on the Emulsion stability dynamics in model meat batters: 1 – 7%, 2 – 11%, 3 – control, 4 – 5%, 5 – 3%

Работа была направлена на разработку технологии производства мясных продуктов с частичной заменой мясного сырья измельченной чечевицей. Исследования проводились на модельных фаршевых системах, соответствующих рецептуре рубленых полуфабрикатов.

Следует отметить, что ключевым аспектом производства рубленых полуфабрикатов является степень измельчения – критически важный параметр, непосредственно влияющий на качественные характеристики готового продукта. При этом использование растительных протеинов способно повышать пищевую ценность изделий; улучшать экономическую эффективность производства и позволяет оптимизировать себестоимость продукции [12]. В свою очередь органолептические свойства являются определяющим фактором потребительского выбора, требуют особого внимания при модификации рецептур и должны сохраняться или улучшаться при введении новых компонентов. Внедрение растительных ингредиентов требует тщательного подбора их концентрации и технологии введения, чтобы обеспечить баланс между пищевой ценностью, экономической эффективностью и потребительскими характеристиками продукта.

Исследование направлено на подбор оптимального содержания чечевицы в мясном фарше и степени его измельчения для котлет. Фарш готовили из смеси говядины (70%) и свинины (30%), измельчая тремя способами: крупный помол (2,5 мм) – однократное прокручивание через мясорубку с решеткой 5 мм; средний (1,5 мм) – двойное прокручивание; мелкий (0,5 мм) – обработка в универсальной машине с двумя ножами и тремя решетками. В готовые фарши добавляли 3%, 7% или 11% чечевичной муки вместо части

говядины высшего сорта. Все образцы котлет обжаривали в одинаковых условиях и оценивали экспертами по 10-балльной шкале.

Исследование проводилось по двухфакторному плану Bf с варьированием степени измельчения (средний размер частиц 1,5 ± 1,0 мм) и содержания чечевицы (3–7–11%). Экспериментальные данные представлены в таблицах 1 и 2.

При обработке результатов эксперимента уравнение поверхности отклика задавалось в виде:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_1X_2 + B_4X_1^2 + B_5X_2^2 \quad (1)$$

Таблица 1.

Значения факторов в натуральных и кодированных величинах

Table 1.

Factor levels in natural and coded forms

Фактор | Factor	Верхний уровень | Upper level		Нулевой уровень | Zero level		Нижний уровень | Lower level	
	натур. | natural	кодир. | coded	натур. | natural	кодир. | coded	натур. | natural	кодир. | coded
X_1 – ср. размер частиц фарша | X_1 – average particle size of mince	2,5 мм	+1	1,5 мм	0	0,5 мм	-1
X_2 – содержан. чечевицы в фарше | X_2 – lentil content in mince	11%	+1	7%	0	3%	-1

Таблица 2.

План и результаты эксперимента

Table 2.

Design and results of the experiment

Значения факторов | Factor Levels		Значения экспертных оценок Y | Expert evaluation scores Y						
X_1	X_2	1	2	3	4	5	среднее | mean	расчетн. | calculated
+1	+1	7	9	8	8	7	7,8	7,8
-1	+1	4	4	5	3	5	4,2	4,0
+1	-1	8	9	7	6	9	7,8	7,8
-1	-1	3	5	4	3	4	3,8	4,0
+1	0	9	10	10	9	10	9,6	9,6
-1	0	4	7	7	6	5	5,8	5,8
0	+1	6	8	6	7	8	7,0	6,7
0	-1	5	7	7	7	6	6,4	6,7

График полученных результатов приведен на рисунке 4.

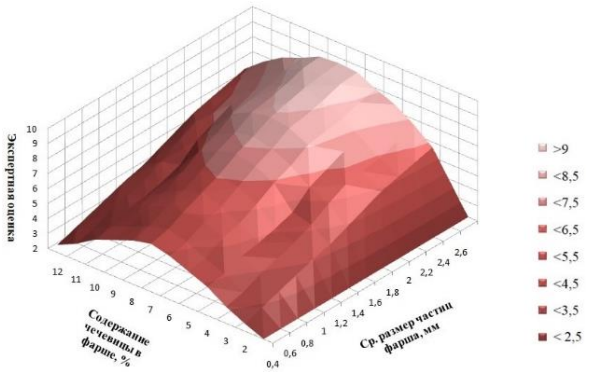


Рисунок 4. Результаты исследований

Figure 4. Research results

Коэффициенты B_2 и B_3 оказались не значимыми, адекватное уравнение поверхности отклика в кодированной форме имеет вид [4, 5]:

$$Y = 8,5 + 1,9\ X_1 - 0,8\ X_1^2 - 1,8\ X_2^2 \quad (2)$$

В раскодированном виде уравнение поверхности отклика имеет вид:

$$Y = 1,9542 + 4,3\ X_1 + 1,6166\ X_2 - 0,8\ X_1^2 - 0,1125\ X_2^2 \quad (3)$$

Для определения оптимальных значений факторов по уравнению (3) возьмем частные производные по ним и приравняем их к нулю

$$\begin{aligned} dY/dX_1 &= 4,3 - 2\times 0,8\ X_1 = 0, \\ dY/dX_2 &= 1,6166 - 2\times 0,1125\times X_2 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Расчеты показали оптимальные параметры: размер частиц фарша 4,3 / (2 × 0,8) = 2,69 мм и содержание чечевицы 1,6166 / (2 × 0,1125) = 7,18%. Поскольку 2,69 мм превышает экспериментальный диапазон, принято крупное измельчение при однократном прокручивании. (X_1 = 2,5 мм содержание чечевицы 7,18% (X_3) находится в допустимых пределах (от 3 до 11%). При этих параметрах экспертная оценка, исходя из уравнения (3), составила 9,6 балла из 10.

$$\begin{aligned} Y = {} & 1,9542 + 4,3\times 2,5 + 1,6166\times 7,18 - \\ & - 0,8\times 2,5^2 - 0,1125\times 7,18^2 = 9,60 \end{aligned} \quad (5)$$

Это значение на 0,03 балла ниже теоретического максимума. Полученные результаты обеспечивают практически максимальное качество продукта.

Исследования показали, что наилучшие вкусовые качества демонстрируют котлеты, приготовленные из крупноизмельченного фарша (однократное прокручивание через решётку 5 мм) с добавлением 7,2% чечевичной муки. Дегустация охлаждённых котлет «Уфимские» подтвердила, что новый продукт по всем органолептическим характеристикам соответствует традиционному аналогу, а введение чечевицы даже улучшает вкусовые свойства готовых изделий (данные в таблице 3).

Таблица 3.

Органолептическая оценка мясных изделий

Table 3.

Sensory evaluation

Показатель | Indicator	Котлеты «Московские» (контроль) | "Moskovskie" cutlets (control)	Котлеты «Уфимские» (опыт) | "Ufimskie" cutlets (experimental)
Внешний вид | Appearance	9,4	9,4
Вид и цвет на разрезе | Color and Appearance on Cross-Section	9,2	9,5
Запах | Aroma	9,6	9,6
Вкус | Flavor	9,6	9,7
Консистенция | Consistency	9,8	9,5
Сочность | Juiciness	9,6	9,2
Общая оценка | Overall Score	9,1	9,6

Исследовали оптимальную степень гидратации чечевичной муки, варьируя соотношение от 1:1 до 1:4. Мясной фарш представляет собой сложную полидисперсную систему, где водно-белковая матрица (образованная экстрагированными белками, солевыми растворами и водой) служит средой для распределения частиц жира и тканей. Ключевое требование при производстве – поддержание дисперсного состояния компонентов с прочной связью между водой и жиром, что определяет качество и выход продукции. Стабильность этих связей в процессе приготовления фарша критически важна для конечных характеристик полуфабрикатов [4].

Влагосвязывающая способность (ВСС) – ключевой показатель качества мясного фарша для полуфабрикатов. Она характеризует способность удерживать воду и жир в связанном состоянии, предотвращая их потерю при термической обработке и образование бульонно-жировых отеков (рисунок 5).

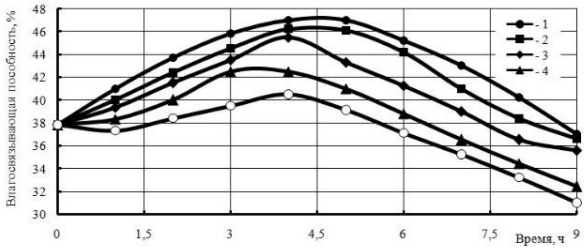


Рисунок 5. Влияние массовой доли гидратированной измельченной чечевицы на ВСС модельных фаршей при гидратации: 1 – 1:3; 2 – 1:2; 3 – 1:1; 4 – контроль без чечевицы; 5 – 1:4

Figure 5. Effect of the mass fraction of hydrated ground lentils on the WBC of model mince systems at different hydration ratios: 1 – 1:3; 2 – 1:2; 3 – 1:1; 4 – control (without lentils); 5 – 1:4

Влагоудерживающая (ВУС) и жироудерживающая (ЖУС) способности отражают количество связанных влаги и жира в фарше после нагрева. ЖУС рассчитывается как разница между исходным содержанием жира и его потерями при тепловой обработке. Высокое содержание белка в чечевичной муке делает ее перспективным ингредиентом для улучшения функционально-технологических свойств фарша при частичной замене мясного сырья. Результаты исследований влияния гидратированной чечевичной муки на свойства модельных фаршей представлены на рисунках 6 и 7.

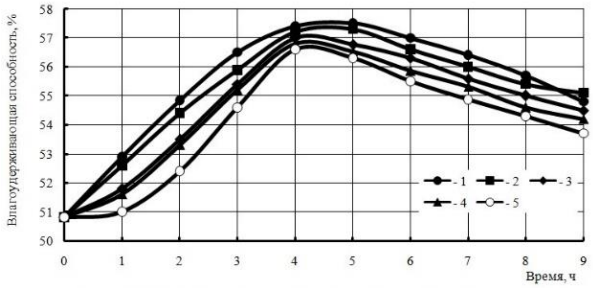


Рисунок 6. Влияние массовой доли гидратированной измельченной чечевицы на влагоудерживающую способность модельных фаршей при гидратации: 1 – 1:3; 2 – 1:2; 3 – 1:1; 4 – контроль без чечевицы; 5 – 1:4

Figure 6. Effect of the mass fraction of hydrated ground lentils on the WHC of model minced systems at various hydration ratios: 1 – 1:3; 2 – 1:2; 3 – 1:1; 4 – control (without lentils); 5 – 1:4

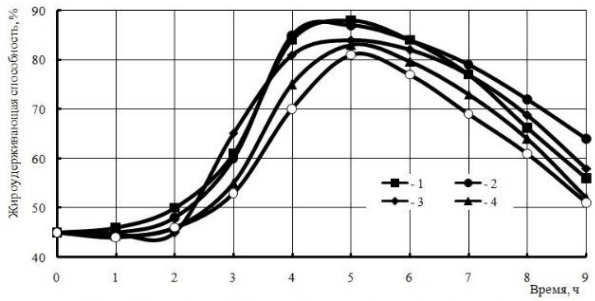


Рисунок 7. Влияние массовой доли гидратированной измельченной чечевицы на жироудерживающую способность модельных фаршей при гидратации: 1 – 1:3; 2 – 1:2; 3 – 1:1; 4 – контроль без чечевицы; 5 – 1:4

Figure 7. Effect of the mass fraction of hydrated ground lentils on the FBC of model mince systems at different hydration ratios: 1 – 1:3; 2 – 1:2; 3 – 1:1; 4 – control (without lentils); 5 – 1:4.

Добавление гидратированной чечевицы (1:1–1:3) в мясной фарш вместо 7% мясного сырья повышает жироудерживающую способность (ЖУС), при этом максимальные значения ВУС, ВСС и ЖУС достигаются в одинаковых условиях. Это объясняется способностью свободных чечевичных белков стабилизировать мясные эмульсии – они образуют прочные термостабильные мембраны вокруг жировых глобул, предотвращая их слипание и улучшая структуру фарша. Однако увеличение доли чечевицы свыше 7% может придавать продукту специфический привкус, что ограничивает её применение. Оптимальное соотношение 1:3 демонстрирует наилучший баланс между улучшением функционально-технологических свойств и сохранением органолептических характеристик.

Обсуждение

Результаты настоящего исследования демонстрируют значительный потенциал чечевичной муки в качестве функционального ингредиента для модификации рецептуры рубленых мясных полуфабрикатов. Полученные данные о ключевых функционально-технологических свойствах находятся в соответствии с известными из литературы характеристиками растительных белков, в частности бобовых культур. Выявленная высокая адгезионная способность гидратированной чечевичной муки, превосходящая аналогичный показатель мясного фарша в 3–5 раз, является одним из ключевых факторов, обуславливающих улучшение структуры комбинированных фаршевых систем. Это свойство можно объяснить наличием в чечевице водорастворимых полисахаридов и белков, способных к интенсивному набуханию и образованию вязких гелей, что согласуется с данными о функциональных свойствах муки из других бобовых (например, гороха и нута). Высокая эмульгирующая способность (96.4%), продемонстрированная чечевичной мукой, также типична для белков бобовых, которые, благодаря своей амфотерной природе, эффективно стабилизируют границу раздела фаз масло – вода. Синергетическое взаимодействие этих растительных белков с мышечными белками мяса обеспечивает образование более прочных и термостабильных эмульсий, что наглядно подтверждается ростом стабильности эмульсии (СЭ) в модельных системах с добавлением 7% чечевицы. Оптимизационный эксперимент, основанный на методологии двухфакторного планирования, позволил объективно установить оптимальные параметры производства. Найденная оптимальная степень измельчения фарша (~2.5 мм) соответствует принципам формирования сочной и нежной консистенции в рубленых изделиях, когда более крупные частицы мышечной ткани лучше удерживают влагу и жир. Установленный оптимальный уровень замещения мясного сырья на 7,2% чечевичной муки является важным практическим результатом. Данная дозировка находится в диапазоне, характерном для многих исследований по обогащению мясных продуктов растительными белками (5–10%), что позволяет значительно улучшить нутриентный профиль, избегая при этом негативного влияния на органолептические свойства. При таком содержании не отмечалось появления нежелательного специфического «бобового» привкуса, а опытные образцы котлет «мяснарские» получили экспертные оценки, сопоставимые или превышающие оценки контрольного образца. Результаты исследования ВСС, ВУС и ЖУС способностей полностью подтверждают технологическую целесообразность проведенной модификации рецептуры. Наблюдаемый максимум этих показателей при добавлении 7% чечевицы и степени гидратации 1:3 логично объясняется оптимальным сочетанием гидратированных белков и полисахаридов, создающих плотную трехмерную матрицу, эффективно иммобилизующую воду и жир. Это согласуется с общепринятыми представлениями о механизме действия растительных гидроколлоидов в мясных системах. Улучшение данных показателей напрямую коррелирует с повышением выхода готовой продукции и улучшением её текстуры, что имеет существенное экономическое значение.

Заключение

На основании проведенных исследований сделан вывод о высокой эффективности применения гидратированной чечевичной муки в качестве функциональной добавки для производства рубленых мясных полуфабрикатов. Достигнута основная цель работы – разработана и научно обоснована технология производства котлет с частичной заменой мясного сырья, при которой не только сохраняются но и улучшаются ключевые потребительские свойства продукта. Научная новизна исследования заключается в комплексном подходе, позволившем установить и объяснить синергетический эффект от взаимодействия чечевичных и мышечных белков, что определило оптимальную дозировку добавки в 7% и способ ее введения. Практическая ценность результатов состоит в предложении готового к внедрению решения, направленного

на повышение пищевой ценности и технологических характеристик фарша, что позволяет расширить ассортимент мясных полуфабрикатов с улучшенными функциональными свойствами. В ходе работы были выявлены ограничения, связанные с появлением специфического привкуса при превышении доли муки свыше 7–11%, а также высокая зависимость функциональных свойств от точности соблюдения степени гидратации, требующая строгого производственного контроля. Основные выводы подтверждают, что чечевичная мука существенно улучшает адгезионные, эмульгирующие и влагосвязывающие свойства фаршевых систем, а установленные параметры обеспечивают максимальное качество готового изделия, делая предложенную рецептурную модификацию технологически и экономически обоснованной. Для промышленного внедрения рекомендуется организация выпуска опытных партий котлет по уточненной рецептуре. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на изучении стабильности свойств модифицированных фаршей при хранении, адаптации технологии для других видов полуфабрикатов и исследовании комбинированного действия чечевичной муки с другими растительными компонентами для создания продуктов специализированного назначения.

Литература

1 Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Панина Е.В. Технологические подходы к производству мясных рубленых полуфабрикатов, обогащенных композитами животного и растительного происхождения // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2 (100). С. 237–247. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-237-247

2 Рожнов Е.Д., Школьникова М.Н., Аббазова В.Н. и др. Направленный ферментолиз мякоти тыквы как инструмент формирования качества полуфабрикатов // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2 (100). С. 248–254. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-248-254

3 Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Панина Е.В. Анализ пищевых предпочтений потребителей в отношении мясных продуктов обогащенного состава // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3 (105). С. 20–28. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-20-28

4 Шишкина Д.И., Бордунова М.С., Звегинцева Е.Д. и др. Функциональные продукты из мяса: опыт внесения пищевых волокон в рубленые полуфабрикаты // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 1 (91). С. 73–81. doi: 10.20914/2310-1202-2022-1-73-81

5 Гизатов А.Я., Гизатова Н.В. Обогащение мясных продуктов натуральными природными биопротекторами и антиоксидантами // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 2 (96). С. 103–109. doi: 10.20914/2310-1202-2023-2-103-109

6 Zubairova L., Mironova I., Khabibullin I. et al. Improving the quality of beef and its use in the production of enriched minced semi-finished products // III International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-III 2024): Conference Proceedings. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. Vol. 95. P. 01016. doi: 10.1051/bioconf/20249501016

7 Mironova I., Khabibullin R., Salikhova G. et al. Meat productivity and functional properties of meat from Kazakh white-headed bulls with the introduction of an adaptogen system into the diet // III International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-III 2024): Conference Proceedings. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. Vol. 95. P. 01026. doi: 10.1051/bioconf/20249501026

8 Зубаирова Л.А. Обогащение микронутриентами мясных рубленых полуфабрикатов // Известия Дагестанского ГАУ. 2024. № 4 (24). С. 288–292. doi: 10.52671/26867591_2024_4_288

9 Danyliv M.M., Vasilenko O.A., Ozherelyeva O.N., Kutsova A.E. Amaranth cake as a source of food isolate of vegetable protein for the meat processing industry // BIO Web of Conferences. 2024. V. 103. P. 00084. doi: 10.1051/bioconf/202410300084

10 Danyliv M.M., Ozherelyeva O.N., Vasilenko O.A., Derkanosova N.M. The technology of meat snacks using CO2 spice extracts in their formulations // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 954. P. 012018. doi: 10.1088/1755-1315/954/1/012018

11 Danyliv M.M., Vasilenko O.A., Ozherelyeva O.N., Stanislavskaya E.B. Developing a technology for ground meat low-fat semiproducts // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 624. P. 012165. doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012165

12 Danyliv M.M., Ozherelyeva O.N., Evdokimova S.V., Vasilenko O.A. Evaluation of investment attractiveness of the project "meat processing complex" // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020. V. 172. P. 833–843. doi: 10.1007/978-981-15-2244-4_79

13 Карапетян А.М., Величко Н.А. Перспективы применения растительных компонентов в различных рецептурах мясных рубленых полуфабрикатов // Вестник КрасГАУ. 2023. № 4 (193). С. 155–162.

14 Айрапетян А.А., Манжесов В.И. Применение растительных компонентов в технологии вареной колбасы // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2021. № 1. С. 89–94.

15 Смольникова Ф.Х., Мухаметкали А.Д., Окусханова Э.К., Камбарова А.С. Применение растительных компонентов в технологии мясных изделий для питания пожилых людей // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. 2025. № 4. С. 405–415.

16 Киселева И.С., Еромлаева Ж.Д., Кизиева А.С. и др. Применение продуктов переработки сои и пищевых волокон в технологии комбинированных мясных изделий // Аграрный научный журнал. 2025. № 9. С. 129–136. doi: 10.28983/asj.y2025i9pp129-136

17 Lee S., Jo K., Jeong S.K. et al. Recent strategies for improving the quality of meat products // Journal of Animal Science and Technology. 2023. V. 65. № 5. P. 895–911. doi: 10.5187/jast.2023.e94

18 Stanišić N., Kurćubić V.S., Stajić S.B. et al. Integration of Dietary Fibre for Health Benefits, Improved Structure, and Nutritional Value of Meat Products and Plant-Based Meat Alternatives // Foods. 2025. V. 14. № 12. P. 2090. doi: 10.3390/foods14122090

19 Zhao D., Huang L., Li H. et al. Ingredients and Process Affect the Structural Quality of Recombinant Plant-Based Meat Alternatives and Their Components // Foods. 2022. V. 11. № 15. P. 2202. doi: 10.3390/foods11152202

20 Wang Y., Tuccillo F., Lampi A.M. et al. Flavor challenges in extruded plant-based meat alternatives: A review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2022. V. 21. № 4. P. 2898–2929. doi: 10.1111/1541-4337.12964

References

1 Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Panina E.V. Technological Approaches to the Production of Chopped Meat Semi-Finished Products Enriched with Composites of Animal and Plant Origin. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 2 (100). pp. 237–247. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-237-247 (in Russian).

2 Rozhnov E.D., Shkolnikova M.N., Abbazova V.N. et al. Directed Enzymolysis of Pumpkin Pulp as a Tool for Forming the Quality of Semi-Finished Products. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 2 (100). pp. 248–254. doi: 10.20914/2310-1202-2024-2-248-254 (in Russian).

3 Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Panina E.V. Analysis of Consumer Food Preferences in Relation to Meat Products of Enriched Composition. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 3 (105). pp. 20–28. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-20-28 (in Russian).

4 Shishkina D.I., Bordunova M.S., Zvegintseva E.D. et al. Functional Meat Products: Experience of Adding Dietary Fiber to Chopped Semi-Finished Products. Bulletin of VSUET. 2022. vol. 84. no. 1 (91). pp. 73–81. doi: 10.20914/2310-1202-2022-1-73-81 (in Russian).

5 Gizatov A.Ya., Gizatova N.V. Enrichment of Meat Products with Natural Bioprotectors and Antioxidants. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 2 (96). pp. 103–109. doi: 10.20914/2310-1202-2023-2-103-109 (in Russian).

6 Zubairova L., Mironova I., Khabibullin I. et al. Improving the quality of beef and its use in the production of enriched minced semi-finished products. In: III International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-III 2024): Conference Proceedings. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. vol. 95. Article 01016. doi: 10.1051/bioconf/20249501016.

7 Mironova I., Khabibullin R., Salikhova G. et al. Meat productivity and functional properties of meat from Kazakh white-headed bulls with the introduction of an adaptogen system into the diet. In: III International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-III 2024): Conference Proceedings. Les Ulis: EDP Sciences, 2024. vol. 95. article 01026. doi: 10.1051/bioconf/20249501026.

8 Zubairova L.A. Enrichment of Chopped Meat Semi-Finished Products with Micronutrients. Bulletin of Dagestan State Agrarian University. 2024. no. 4 (24). pp. 288–292. doi: 10.52671/26867591_2024_4_288 (in Russian).

9 Danyliv M.M., Vasilenko O.A., Ozherelyeva O.N., Kutsova A.E. Amaranth cake as a source of food isolate of vegetable protein for the meat processing industry. BIO Web of Conferences. 2024. vol. 103. article 00084. doi: 10.1051/bioconf/202410300084.

10 Danyliv M.M., Ozherelyeva O.N., Vasilenko O.A., Derkanosova N.M. The technology of meat snacks using CO2 spice extracts in their formulations. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. vol. 954. article 012018. doi: 10.1088/1755-1315/954/1/012018.

11 Danyliv M.M., Vasilenko O.A., Ozherelyeva O.N., Stanislavskaya E.B. Developing a technology for ground meat low-fat semiproducts. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 624. article 012165. doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012165.

12 Danyliv M.M., Ozherelyeva O.N., Evdokimova S.V., Vasilenko O.A. Evaluation of investment attractiveness of the project "meat processing complex". In: Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020. vol. 172. pp. 833–843. doi: 10.1007/978-981-15-2244-4_79.

13 Karapetyan A.M., Velichko N.A. Prospects for the Use of Plant Components in Various Recipes of Chopped Meat Semi-Finished Products. Bulletin of KrasGAU. 2023. no. 4 (193). pp. 155–162. (in Russian).

14 Airapetyan A.A., Manzhesov V.I. Application of Plant Components in the Technology of Cooked Sausage. Technologies and Commodity Science of Agricultural Products. 2021. no. 1. pp. 89–94. (in Russian).

15 Smolnikova F.Kh., Mukhametkali A.D., Okuskhanova E.K., Kambarova A.S. Application of Plant Components in the Technology of Meat Products for the Nutrition of Elderly People. Bulletin of Shakharim University. Technical Sciences Series. 2025. no. 4. pp. 405–415. (in Russian).

16 Kiseleva I.S., Eromlaeva Zh.D., Kizieva A.S. et al. Application of Soy Processing Products and Dietary Fiber in the Technology of Combined Meat Products. Agrarian Scientific Journal. 2025. no. 9. pp. 129–136. doi: 10.28983/asj.y2025i9pp129-136 (in Russian).

17 Lee S., Jo K., Jeong S.K. et al. Recent strategies for improving the quality of meat products. Journal of Animal Science and Technology. 2023. vol. 65. no. 5. pp. 895–911. doi: 10.5187/jast.2023.e94.

18 Stanišić N., Kurćubić V.S., Stajić S.B. et al. Integration of Dietary Fibre for Health Benefits, Improved Structure, and Nutritional Value of Meat Products and Plant-Based Meat Alternatives. Foods. 2025. vol. 14. no. 12. article 2090. doi: 10.3390/foods14122090.

19 Zhao D., Huang L., Li H. et al. Ingredients and Process Affect the Structural Quality of Recombinant Plant-Based Meat Alternatives and Their Components. Foods. 2022. vol. 11. no. 15. article 2202. doi: 10.3390/foods11152202.

20 Wang Y., Tuccillo F., Lampi A.M. et al. Flavor challenges in extruded plant-based meat alternatives: A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2022. vol. 21. no. 4. pp. 2898–2929. doi: 10.1111/1541-4337.12964.

Сведения об авторах

Альберт Я. Гизатов к.т.н., доцент, кафедра технологии мясных, молочных продуктов и химии, Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, 450001, Россия, kbad@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-2753-1082

Наталья В. Гизатова к.б.н., доцент, кафедра технологии мясных, молочных продуктов и химии, Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, 450001, Россия, natgiz@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9222-767X

Information about authors

Albert Ya. Gizatov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technology of meat, dairy products and chemistry department, Bashkir State Agrarian University, 50-letiya Oktyabrya St., 34, Ufa, 450001, Russia, kbad@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-2753-1082

Natalia V. Gizatova Cand. Sci. (Biol.), assistant professor, technology of meat, dairy products and chemistry department, Bashkir State Agrarian University, 50-letiya Oktyabrya St., 34, Ufa, 450001, Russia, natgiz@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9222-767X

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/01/2026	**После редакции** 02/02/2026	**Принята в печать** 20/02/2026

Received 11/01/2026	**Accepted in revised** 02/02/2026	**Accepted** 20/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-151-158 Оригинальная статья/Research article
УДК 641.856 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка рецептуры и изучение влияния муки из мякоти тыквы на качество блинов

Нина И. Мячикова [1] myachikova@bsuedu.ru 0000-0001-7997-0605
Юрий А. Болтенко [1] boltenko@bsuedu.ru 0000-0003-2183-2263
Ирина Г. Зиновьева [1] zinovyeva@bsuedu.ru
Яна А. Сластникова [2] slastnikova231099@mail.ru
Лариса Н. Фролова [3] kaf-mapp@vsuet.ru 0000-0002-6505-4136
Наталья В. Родичева [4] rodicheva@bsuedu.ru

1 Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия
2 ООО «Готэк-ЦПУ», мкр. Промплощадка-3, здание 15/1, г. Железногорск, Курская обл., 307170, Россия
3 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
4 ООО «ИРЕКС ТРИЭР», ул. Щипок, 18, стр. 3, г. Москва, 115093, Россия

Аннотация. На сегодняшний день интерес среди потребителей к использованию в питании альтернативных продуктов не только не угасает но и продолжает стремительно расти. Поэтому разработка и внедрение рецептур с обогащенным пищевым составом, а также полностью исключающим традиционный вид (виды) сырья – это уже технологическая обыденность работника общественного питания. В данном исследовании была поставлена цель разработать рецептуру и изучить влияние муки из мякоти тыквы на качественные характеристики блинов. В ходе лабораторных испытаний анализу подлежали три образца блинов: рецептура только с пшеничной мукой, только с мукой из мякоти тыквы, и с заменой части пшеничной муки на муку из мякоти тыквы. На основе исследований разработана рецептура «Блины тыквенные». Доказано, что замена 17 % пшеничной муки на муку из мякоти тыквы отразилась на качественном и количественном составе разработанной продукции. По органолептическим показателям главным отличием «Блинов тыквенных» от традиционных является необычный вкус и более мягкая консистенция. Калорийность контрольного образца составила 365 ккал на 150 г, а калорийность блюда «Блины тыквенные» – 274 ккал на 150 г, т.е. ниже на 24,9%. Это связано, в целом, с изменением содержания основных пищевых веществ в разработанной продукции. Наблюдается снижение содержания белков на 23,7%, жиров – на 7,4 %, углеводов – на 35,4 %. В то же время следует отметить значительное увеличение содержания клетчатки (на 178 % больше по сравнению с контролем), что в настоящее время является достаточно востребованным направлением у приверженцев здорового питания.

Ключевые слова: мучная кулинарная продукция, технология производства, показатели качества, мука из мякоти тыквы, блины.

The development of a formulation and the study of the impact of pumpkin pulp flour on the quality of pancakes

Nina I. Myachikova [1] myachikova@bsuedu.ru 0000-0001-7997-0605
Yurij A. Boltenko [1] boltenko@bsuedu.ru 0000-0003-2183-2263
Irina G. Zinoveva [1] zinovyeva@bsuedu.ru
Yana A. Slastnikova [2] slastnikova231099@mail.ru
Larisa N. Frolova [3] kaf-mapp@vsuet.ru 0000-0002-6505-4136
Natal'ya V. Rodicheva [4] rodicheva@bsuedu.ru

1 Belgorod State National Research University, Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia
2 Gotek-CPU LLC, Industrial Site-3, building 15/1, Zheleznogorsk, Kursk region, 307170, Russia
3 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia
4 IREKS TRIER LLC, Shchipok St., 18, p. 3, Moscow, 115093, Russia

Abstract. Today, consumer interest in alternative foods is not only continuing but also growing rapidly. As a result, the development and use of fortified foods and the elimination of certain traditional ingredients have become commonplace in the catering industry. This study aimed to develop a new recipe for pancakes using pumpkin pulp flour and to evaluate its impact on the quality of the final product. During laboratory testing, three samples of pancakes were prepared: one using only wheat flour, another using only pumpkin pulp flour, and a third using a combination of wheat and pumpkin pulp flours. Based on the research, a recipe for "Pumpkin Pancakes" was developed. The replacement of 17% of wheat flour with pumpkin pulp flour was shown to affect the qualitative and quantitative composition of the final product. According to the organoleptic characteristics, the main difference between the "Pumpkin Pancakes" and the traditional ones is their unusual taste and softer consistency. The caloric content of the control sample, which was 365 kcal per 150 grams, was significantly lower than that of the Pumpkin Pancake dish, which was 274 kcal per 150 g. This difference is due to changes in the nutrient content of the products. Protein content decreased by 23.7%, fat by 7.4%, and carbohydrates by 35.4%, while fiber content increased by 178%, which is a popular trend among those following a healthy diet.

Keywords: flour culinary products, production technology, quality indicators, pumpkin pulp flour, pancakes.

Для цитирования
Мячикова Н.И., Болтенко Ю.А., Зиновьева И.Г., Сластникова Я.А., Фролова Л.Н., Родичева Н.В. Разработка рецептуры и изучение влияния муки из мякоти тыквы на качество блинов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 151–158. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-151-158

For citation
Myachikova N.I., Boltenko Yu.A., Zinoveva I.G., Slastnikova YA.A., Frolova L.N., Rodicheva N.V. The development of a formulation and the study of the impact of pumpkin pulp flour on the quality of pancakes. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 151–158. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-151-158

© 2026, Мячикова Н.И. и др. / Myachikova N.I. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В последнее время все больше людей стало придавать большое значение своему питанию. Это связано с тем, что вести здоровый образ жизни невозможно без правильного и сбалансированного питания [1–2]. «Доказано, что только на 15–20% здоровье зависит от уровня здравоохранения, генетической предрасположенности к тем или иным заболеваниям, экологии. Всё остальное – это физические нагрузки, отсутствие вредных привычек, полноценное питание» [3]. Одним из критериев сбалансированного питания является соотношение в рационе основных питательных веществ – белков, жиров и углеводов. Эксперты отмечают, что нарушение структуры питания является «главным фактором, который наносит на несколько порядков больший урон здоровью человека, чем экологическая загрязненность и психосоциальные стрессы вместе взятые» [4]. Но, «несмотря на некоторые позитивные подвижки в данной области качество питание жителей России далеко от идеала» [5].

Современная кулинария представляет собой не только искусство приготовления пищи, но и постоянно развивающуюся область, формирующую новые тенденции в питании. Одной из важных задач, стоящих перед кулинарией, является создание и разработка сбалансированных, обогащенных, витаминизированных продуктов питания, которые предназначены для функционального питания. Следует отметить, что сейчас кулинария дает возможность правильно и сбалансировано питаться, используя новые технологии приготовления пищи, нетрадиционное сырье, а также новое оборудование. Таким образом, современная кулинария способствует правильному росту и формированию организма, сохранению физической формы и поддержанию здоровья в целом.

В связи с этим решено разработать рецептуры кулинарной продукции, обогащенной биологически активными добавками (ингредиентами) для правильного функционального питания.

В качестве объекта исследования были выбраны мучные блюда. Изделия из теста, особенно в русской национальной кухне, пользуются у потребителей высокой популярностью [6]. И даже вынужденные ограничения в связи с заболеваниями различного рода, как правило, не исключают их из рациона, а пересматриваются и видоизменяются классические рецептуры.

Современные потребители заинтересованы в расширении ассортимента мучных кулинарных блюд и изделий. В связи с этим было принято решение о разработке рецептуры блинов с добавлением муки из мякоти тыквы.

Тыква широко используется в пищу и народной медицине по всему миру. Она считается ценным овощем в первую очередь из-за высокого содержания каротиноидов, низкой энергетической ценности, высокого содержания углеводов и минералов. Употребление тыквы помогает предотвратить кожные заболевания, нарушения зрения, уменьшает повреждение клеток в организме, рак и улучшает иммунную функцию. Тыква содержит биологически активные компоненты, в том числе полисахариды, парааминобензойную кислоту, эфирные масла, стерины, белки и пептиды [7–8].

Многочисленные фармакологические исследования продемонстрировали гепатопротекторную, антиоксидантную, противовоспалительную, противодиабетическую активность экстрактов и метаболитов этого растения [9–10].

Анализ литературных источников показал, что тыква и продукты ее переработки находят широкое применение в рецептурах мучных кондитерских изделий [11–13], хлебобулочных [10, 14–16], в составе кисломолочных продуктов [17].

Цель работы – разработать рецептуру и изучить влияние муки из мякоти тыквы на качественные характеристики блинов.

Материалы и методы

При проведении исследований в качестве контрольного образца выбрана классическая рецептура блинов [18]. На основе аналитических и экспериментальных исследований были разработаны аналоги с заменой рецептурных компонентов таким образом, чтобы конечный результат был удобен для производства и реализации соответствующей мучной кулинарной продукции.

В процессе выполнения работы использовано сырье, соответствующее требованиям нормативной документации.

Для разработки типовой технологической модели рецептуры был составлен массив данных по действующим рецептурам и проведен их анализ с целью установления, определяющих постоянных, изменяемых компонентов и их повторяемости. При этом рассчитывали соотношения значений, характеризующих видовую принадлежность кулинарной продукции.

На основании полученных данных рассчитали средние значения величин определяющих и постоянных компонентов и их интервальные значения.

Исследованиям подвергали – образец 1 – блины по классической рецептуре (100% мука пшеничная высшего сорта);

– образец 2 – блины, в которых пшеничная мука полностью заменена на муку из мякоти тыквы (100% мука из мякоти тыквы);

– образец 3 – блины, в которых произведена замена части пшеничной муки на муку из мякоти тыквы (83% – мука пшеничная в/с, 17% – мука из мякоти тыквы) (таблица 1).

Таблица 1.

Рецептуры исследуемых образцов блинов

Table 1.

Formulations of the studied pancake samples

Сырье Raw material	Образцы | Samples					
	контроль | control		2		3	
	брутто gross weight	нетто net weight	брутто gross weight	нетто net weight	брутто gross weight	нетто net weight
Мука пшеничная высшего сорта | Wheat flour of the highest grade	66	66	-	-	55	55
Мука из мякоти тыквы | Pumpkin pulp flour	-	-	66	66	11	11
Яйца куриные | Chicken eggs	1/4 шт.	10	1/4 шт.	10	1/4 шт.	10
Сахар | Sugar	4	4	4	4	4	4
Маргарин | Margarine	5	5	5	5	5	5
Молоко | Milk	110	110	110	110	110	110
Дрожжи (прессованные) | Yeast (pressed)	4	4	4	4	4	4
Соль | Salt	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Масса теста | The mass of the dough		195		195		195
Масло растительное | Vegetable oil	5	5	5	5	5	5
Выход готовых блинов | The output of ready-made pancakes		150		150		150

Органолептические показатели исследовали в соответствии с ГОСТ 31986–2012 [19].

При определении пищевой ценности блюда «Блины тыквенные» использовали расчетный метод. В основу метода положено использование справочных данных, определенных ФГБУ «Научно-исследовательский институт питания» РАМН и представленных в справочнике «Химический состав российских пищевых продуктов» [20].

Для исследования структурно-механических характеристик исследуемых образцов был использован «Структурометр СТ-2», с помощью которого изучают реологические характеристики полуфабрикатов и готовой продукции [21–22].

Результаты и обсуждение

Образец № 1 (с использованием пшеничной муки), приготовленный по традиционной рецептуре [18], является контрольным образцом, который необходим для сравнения.

Образец № 2 отличается от всех образцов тем, что в его составе была полная замена пшеничной муки на муку из мякоти тыквы. Данная рецептура не была принята в работу, из-за того, что тесто не приобрело нужной консистенции. Мука из мякоти тыквы вследствие большого содержания клетчатки очень хорошо впитывает влагу. В то же время в ее составе отсутствует клейковина, из-за этого при выпекании блинов их было сложно формовать, и они получились слишком рыхлые и влажные.

Образец № 3 содержал в своем составе 83% пшеничной муки и 17% муки из мякоти тыквы. При этом тесто получилось густое, что не свойственно для блинного теста. Его было сложно порционировать и формовать.

В ходе технологических отработок и анализа полученных результатов всех трех образцов было принято решение разработать образец 4, предусмотрев увеличение молока в рецептуре (таблица 2). За основу был взят образец 3, в котором хорошо сочетаются подобранные пропорции муки из мякоти тыквы и пшеничной муки.

При увеличении количества жидкости (молока) в рецептуре на 15,5% тесто приобрело более жидкую консистенцию, его было легко порционировать при жарке.

Технологическая схема приготовления блюда «Блины тыквенные» представлена на рисунке 1.

Таблица 1.

Проект рецептуры блюда «Блины тыквенные»

Table 1.

The recipe project for the dish “Pumpkin Pancakes”

Сырье Raw material	Расход сырья, г Consumption of raw materials, g	
	Образец 4 (17% муки из мякоти тыквы) | 17% pumpkin pulp flour	
	брутто gross weight	нетто net weight
Мука пшеничная высшего сорта | Wheat flour of the highest grade	37	37
Мука из мякоти тыквы | Pumpkin pulp flour	9	9
Яйца куриные | Chicken eggs	1/5 шт.	8
Сахар | Sugar	3	3
Маргарин | Margarine	4	4
Молоко | Milk	127	127
Дрожжи (прессованные) | Yeast (pressed)	3	3
Соль | Salt	1,5	1,5
Масса теста | The mass of the dough		190
Масло растительное | Vegetable oil	5	5
Выход готовых блинов | The output of ready-made pancakes		150

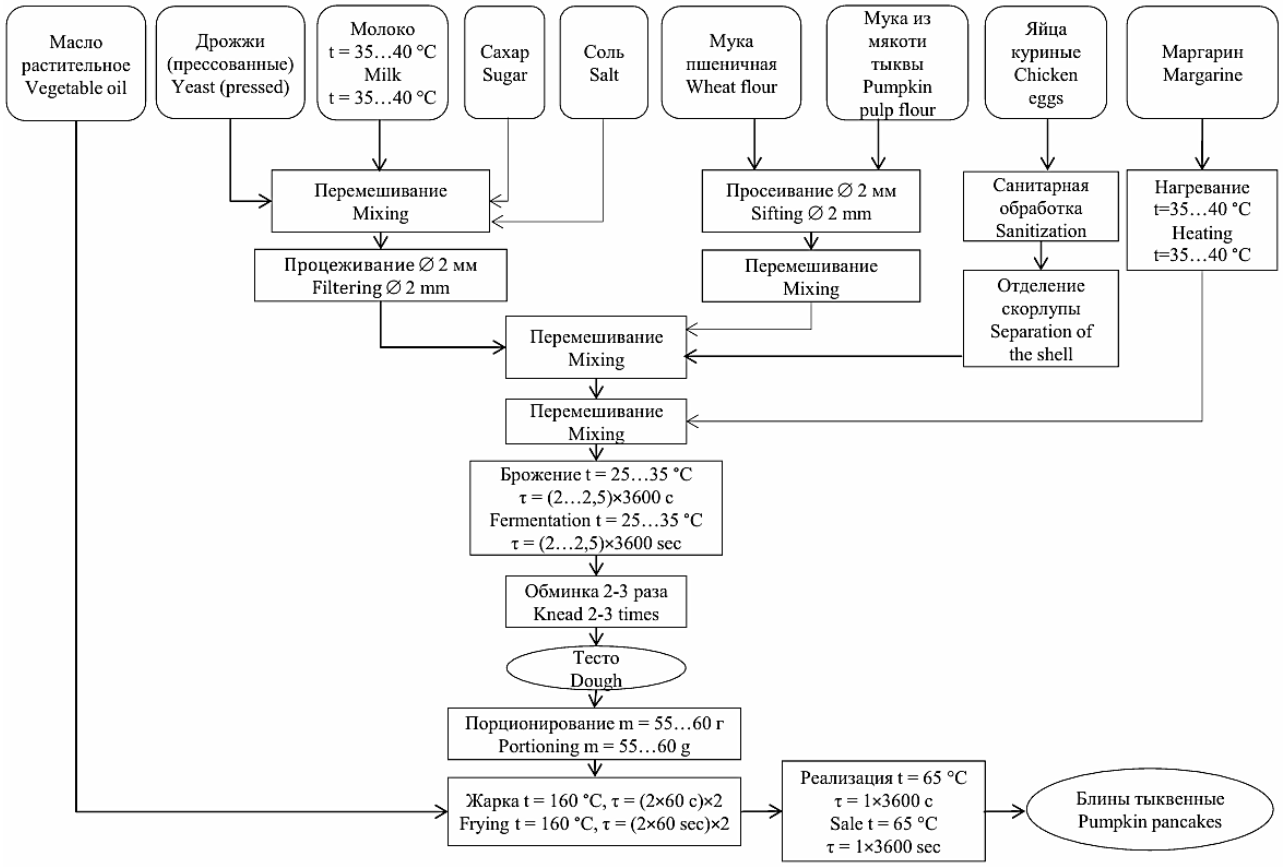


Рисунок 1. Технологическая схема приготовления блюда «Блины тыквенные»

Figure 1. Technological scheme of cooking the dish “Pumpkin pancakes”

В дрожжевом тесте из пшеничной муки различной «силы» процессы набухания и пептизации происходят с разной скоростью. В тесте с использованием «сильной» муки набухание протекает медленно, и достигает своего максимума только к концу брожения. Частичная замена (17%) в образце 3 муки пшеничной на тыквенную муку, очевидно, привела к снижению «силы» пшеничной муки за счет уменьшения количества сырой клейковины. И, как результат, к ускорению процесса брожения.

В образце 1 тесто начало бродить спустя час после замеса (рисунок 2). Оно значительно увеличилось в объеме (в 2 раза). В образце 2 (100% муки из мякоти тыквы) за все время брожения изменений в объеме теста не произошло. Это связано с отсутствием клейковины в составе муки из мякоти тыквы. В образце 4 объем теста увеличился в 2,5 раза, процесс брожения начался на 20 минут раньше по сравнению с образцом 1.

Помимо визуальной оценки вязкости образцов теста были определены реологические характеристики с использованием «Структурометра СТ-2» (рисунок 3).

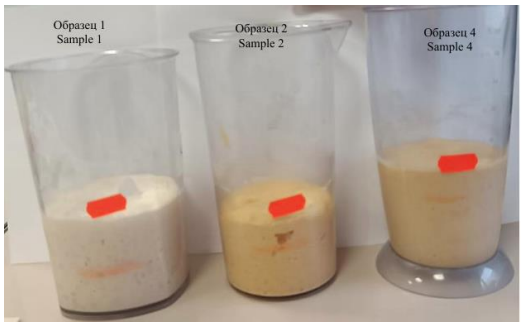


Рисунок 2. Процесс брожения исследуемых образцов теста

Figure 2. The fermentation process of the test samples under study

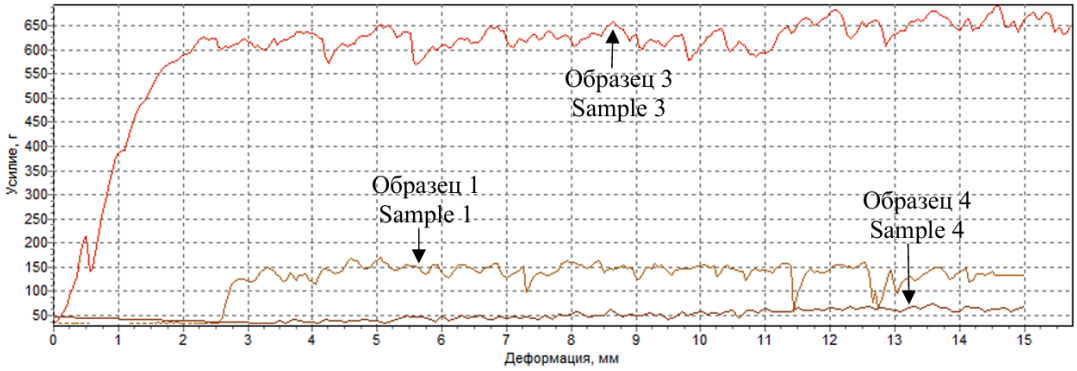


Рисунок 3. Определение консистенции теста

Figure 3. Determination of dough consistency

Анализ представленных на рисунке 3 графиков показывает, что для того, чтобы продавить через фильеру диаметром 5,3 мм образец 1 (контрольный образец) усилие составляет приблизительно 150 г., для образца 3 – 640 г., для образца 4 – 50 г. Эти данные коррелируют с результатами визуальной оценки и технологических отработок. Таким образом, для приготовления блинов с добавлением в рецептуру муки из мякоти тыквы рекомендуется использовать образец 4. Приготовленное по этой рецептуре тесто хорошо формуется, а готовые блины (рисунок 4) характеризуются хорошими органолептическими показателями.



Рисунок 4. Блины тыквенные

Figure 4. Pumpkin pancakes

По результатам органолептической оценки качества были установлены органолептические показатели качества блюда «Блины тыквенные» (таблица 3).

Таблица 2.

Органолептические показатели качества блюда «Блины тыквенные»

Table 2.

Organoleptic indicators of the quality of the dish “Pumpkin pancakes”

Показатели | Indicators	Характеристика | Characteristic
Внешний вид | Appearance	Изделия правильной круглой формы (толщиной 3 мм, в диаметре 15–20 см), обжаренные с двух сторон, хорошо пропечены / Products of regular round shape (3 mm thick, 15–20 cm in diameter), fried on both sides, well baked
Цвет | Colour	Равномерный, золотистый, характерный пропеченным изделиям / Uniform, golden, characteristic of baked goods
Запах | Flavour	Выраженный, свойственный для жареного теста / Pronounced, typical for fried dough
Вкус | Taste	Выраженный, свойственный для жареного теста, имеет привкус тыквы / Pronounced, typical for fried dough, has a pumpkin flavor
Консистенция | Consistency	Равномерно пористая, эластичная, рыхлая / Evenly porous, elastic, loose

Результаты органолептической оценки блинов, приготовленных по различным рецептурам, по 5-тибалльной системе [19] отображены в таблице 4.

Таблица 3.
Оценка органолептических показателей качества блинов

Table 3.
Evaluation of the organoleptic indicators of pancake quality

Показатели | Indicators	Образцы | Samples			
	1 (контрольный) 1 (control)	2	3	4
Внешний вид Appearance	5	0	4	5
Цвет | Colour	5	4	5	5
Запах | Flavour	5	3	5	5
Вкус | Taste	5	4	5	5
Консистенция | Consistency	5	0	3	5
Итого | Total	25	11	22	25

По результатам оценки технологических свойств теста и органолептической оценки готовых блинов установлено, что лучшими показателями характеризуется образец 4.

Сравнительные данные по пищевой ценности контрольного образца и блюда «Блины тыквенные» представлены на рисунке 5.

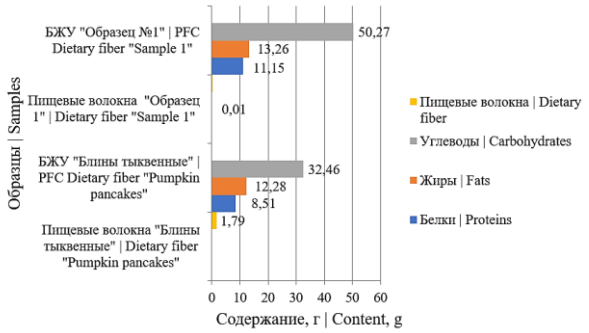


Рисунок 5. Содержание пищевых веществ и пищевых волокон в образцах блинов

Figure 5. The content of nutrients and dietary fiber in pancake samples

Сравнительный анализ химического состава показывает, что для блинов тыквенных по сравнению с контрольным образцом характерно большее содержание витаминов группы В, минералов и клетчатки, а также необычный вкус и более мягкая консистенция.

При оценке пищевой и энергетической ценности готового блюда также важно определить сбалансированность минеральных элементов, в частности по их соотношению, особенно между кальцием, фосфором и магнием. Согласно формуле сбалансированного питания Покровского А.А., оно должно составлять как 1 : 1–1,5 : 0,55, соответственно. В «Блинах тыквенных» данное соотношение составляет 1 : 1,5 : 0,2. Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что в блинах наблюдается недостаток магния. Данное нарушение сбалансированности минерального состава возможно устранить путем добавления при подаче блинов дополнительных компонентов, богатых магнием.

Энергетическая ценность блюда «Блины тыквенные» на 100 г. составляет 182,93 ккал.

Таким образом, замена 17% пшеничной муки на муку из мякоти тыквы отразилась на качественном и количественном составе разработанной продукции. По органолептическим показателям главным отличием «Блинов тыквенных» от традиционных является необычный вкус и более мягкая консистенция. Калорийность контрольного образца (образец 1) составляет 365 ккал на 150 г., а калорийность блюда «Блины тыквенные» – 274 ккал на 150 г., т. е. ниже на 24,9%. Это связано, в целом, с изменением содержания основных пищевых веществ в разработанной продукции. Наблюдается снижение содержания белков на 23,7%, жиров – на 7,4%, углеводов – на 35,4%. В то же время следует отметить значительное увеличение содержания клетчатки (на 178% больше по сравнению с контролем), что в настоящее время является достаточно востребованным направлением у приверженцев здорового питания.

Заключение

На основе проведенных аналитических исследований и технологических отработок была разработана и обоснована рецептура блюда «Блины тыквенные», с использованием нетрадиционного сырья – муки из мякоти тыквы, в котором значительно содержание клетчатки.

В процессе разработки рецептуры и технологии блюда «Блины тыквенные» были установлены производственные и тепловые потери.

В ходе отработки рецептуры по всем образцам блинов была проведена органолептическая оценка и анализ структурно-механических характеристик. По итогу был выбран образец с 17%-ным содержанием муки из мякоти тыквы. Данный образец получил высокую оценку по всем показателям качества.

В ходе проведения анализа данного образца было выявлено, что в связи с особенностями химического состава муки из мякоти тыквы в разработанном блюде «Блины тыквенные» по сравнению с контрольным образцом снижается содержание: белков на 23,7%; жиров на 7,4%; углеводов на 35,4%.

В свою очередь, это приводит к снижению энергетической ценности на 24,9%, что приветствуется приверженцами здорового образа жизни. В то же время следует отметить, что количество пищевых волокон возросло на 178%.

Литература

1 Голубев В.С., Беркович М.И. Здоровое питание: восприятие, динамика, популяризация // Теоретическая экономика. 2020. № 3. С. 98–104.

2 Щетинина С.Ю. Национальное питание как компонент здорового образа жизни // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 5–1 (68). С. 288–295.

3 Диваков Д.С., Лушкова А.С., Цыбульский К.К. Рациональное питание в жизни современного человека, тенденции и пути развития // Современные научные исследования и инновации. 2024. № 7. URL: https://web.snauka.ru/issues/2020/01/91370 (дата обращения: 06.01.2026).

4 Тутельян В.А., Вялков А.И., Разумов А.Н. и др. Научные основы здорового питания. М., 2010.

5 Новоселова Е.Н. Рациональное питание как фактор здоровья: реалии и перспективы // Вестник Московского университета. Серия 18. Социология и политология. 2023. Т. 29. № 1. С. 127–147. doi: 10.24290/1029-3736-2023-29-1-127-147

6 Тефикова С.Н., Велина Д.А., Орловцева О.А. и др. Расширение ассортимента мучных кондитерских изделий для специализированного питания // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 2. С. 59–65.

7 Hussain A., Kausar T., Sehar S. et al. Utilization of pumpkin, pumpkin powders, extracts, isolates, purified bioactives and pumpkin based functional food products: A key strategy to improve health in current post COVID 19 period: An updated review // Applied Food Research. 2022. V. 2. № 2. P. 100241. doi: 10.1016/j.afres.2022.100241

8 Школьникова М.Н., Аббазова В.Н. Исследование химического состава мякоти тыквы как основы для безалкогольных напитков // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 4. С. 441–449. doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-4-441-449

9 Batool M., Ranjha M.M.A.N., Roobab U. et al. Nutritional Value, Phytochemical Potential, and Therapeutic Benefits of Pumpkin (Cucurbita sp.) // Plants. 2022. V. 11. № 11. P. 1394. doi: 10.3390/plants11111394

10 Sharma P., Kaur G., Kehinde B.A., Chhikara N. et al. Pharmacological and biomedical uses of extracts of pumpkin and its relatives and applications in the food industry: A review // International Journal of Vegetable Science. 2020. V. 26. № 1. P. 79–95. doi: 10.1080/19315260.2019.1606130

11 Калинкина Н.О., Егорова Е.Ю. Обогащение сдобного печенья белком и пищевыми волокнами // Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 17–22. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.003

12 Сапожникова А.Н., Копылова А.В., Габрельян Е.Э. Использование муки из мякоти и семян тыквы в рецептурах мучных изделий // Вестник КрасГАУ. 2022. № 3. С. 199–209.

13 Шабурова Г.В., Кулькова Ю.С. Применение овсяных отрубей и овощного сырья в рецептуре сдобного печенья // Инновационная техника и технология. 2019. № 3 (20). С. 36–41.

14 Савина О.В. Влияние порошка из мякоти тыквы на органолептические показатели качества пшеничного хлеба из муки высшего сорта // Современное производство сельскохозяйственного сырья и продуктов питания: состояние, проблемы и перспективы развития. 2025. С. 3–8.

15 Сапожникова А.Н., Копылова А.В., Обриков Д.А. Перспективы использования порошков из мякоти тыквы и плодов шиповника в хлебопечении // Вестник МГТУ. 2024. Т. 27. № 2. С. 242–255. doi: 10.21443/1560-9278-2024-27-2-242-255

16 Chhabra N., Kaur A., Kaur S. Influence of pumpkin (Cucurbita pepo) flour on the physicochemical, functional, and sensory properties of multigrain gluten-free chapati // Food Science and Technology International. 2025. doi: 10.1177/10820132251339706

17 Неронова Е.Ю., Хайдукова Е.В., Фатеева Н.В. Функциональный кисломолочный продукт «Тыквоежка» // Молочнохозяйственный вестник. 2022. № 4 (48). С. 188–196. doi: 10.52231/2225-4269_2022_4_188

18 Здобнов А.И., Цыганенко В.А., Пересичный М.И. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий: для предприятий общественного питания. М.: Айрис-Пресс, 2024. 688 с.

19 ГОСТ 31986–2012. Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

20 Химический состав российских пищевых продуктов. М.: ДеЛи принт, 2008. 236 с.

21 Структурометр СТ 2: руководство по эксплуатации. М.: Лаборатория качества, 2019. 19 с.

22 Черных В.Я. Информационно-измерительная система на базе прибора «Структурометр СТ 2» для контроля реологических характеристик пищевых сред // Управление реологическими свойствами пищевых продуктов. 2015. С. 24–29.

References

1 Golubev V.S., Berkovich M.I. Healthy Nutrition: Perception, Dynamics, Popularization. Theoretical Economics. 2020. no. 3. pp. 98–104. (in Russian).

2 Shchetinina S.Yu. National Nutrition as a Component of a Healthy Lifestyle. International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2022. no. 5–1 (68). pp. 288–295. (in Russian).

3 Divakov D.S., Lushkova A.S., Tsybuls K.K. Rational Nutrition in the Life of Modern Man, Trends and Ways of Development. Modern Scientific Research and Innovation. 2024. no. 7. Available at: https://web.snauka.ru/issues/2020/01/91370 (accessed: 06.01.2026) (in Russian).

4 Tutelyan V.A., Vyalkov A.I., Razumov A.N. et al. Scientific Foundations of Healthy Nutrition. Moscow, 2010. (in Russian).

5 Novoselova E.N. Rational Nutrition as a Health Factor: Realities and Prospects. Bulletin of Moscow University. Series 18. Sociology and Political Science. 2023. vol. 29. no. 1. pp. 127–147. doi: 10.24290/1029-3736-2023-29-1-127-147 (in Russian).

6 Tefikova S.N., Velina D.A., Orlovtseva O.A. et al. Expansion of the Assortment of Flour Confectionery Products for Specialized Nutrition. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 2. pp. 59–65. (in Russian).

7 Hussain A., Kausar T., Sehar S. et al. Utilization of pumpkin, pumpkin powders, extracts, isolates, purified bioactives and pumpkin based functional food products: A key strategy to improve health in current post COVID 19 period: An updated review. Applied Food Research. 2022. vol. 2. no. 2. article 100241. doi: 10.1016/j.afres.2022.100241.

8 Shkolnikova M.N., Abbazova V.N. Study of the Chemical Composition of Pumpkin Pulp as a Basis for Soft Drinks. Bulletin of MSTU. 2021. vol. 24. no. 4. pp. 441–449. doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-4-441-449 (in Russian).

9 Batool M., Ranjha M.M.A.N., Roobab U. et al. Nutritional Value, Phytochemical Potential, and Therapeutic Benefits of Pumpkin (Cucurbita sp.). Plants. 2022. vol. 11. no. 11. article 1394. doi: 10.3390/plants11111394.

10 Sharma P., Kaur G., Kehinde B.A., Chhikara N. et al. Pharmacological and biomedical uses of extracts of pumpkin and its relatives and applications in the food industry: A review. International Journal of Vegetable Science. 2020. vol. 26. no. 1. pp. 79–95. doi: 10.1080/19315260.2019.1606130.

11 Kalinkina N.O., Egorova E.Yu. Enrichment of Shortbread Cookies with Protein and Dietary Fiber. Polzunovsky Bulletin. 2019. no. 1. pp. 17–22. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.003 (in Russian).

12 Sapozhnikova A.N., Kopylova A.V., Gabrelyan E.E. The Use of Flour from Pumpkin Pulp and Seeds in the Recipes of Flour Products. Bulletin of KrasGAU. 2022. no. 3. pp. 199–209. (in Russian).

13 Shaburova G.V., Kulkova Yu.S. Application of Oat Bran and Vegetable Raw Materials in the Recipe of Shortbread Cookies. Innovative Technique and Technology. 2019. no. 3 (20). pp. 36–41. (in Russian).

14 Savina O.V. Influence of Pumpkin Pulp Powder on Organoleptic Quality Indicators of Wheat Bread from Premium Flour. Modern Production of Agricultural Raw Materials and Food Products: State, Problems and Development Prospects. 2025. pp. 3–8. (in Russian).

15 Sapozhnikova A.N., Kopylova A.V., Obrikov D.A. Prospects for the Use of Powders from Pumpkin Pulp and Rosehip Fruits in Baking. Bulletin of MSTU. 2024. vol. 27. no. 2. pp. 242–255. doi: 10.21443/1560-9278-2024-27-2-242-255 (in Russian).

16 Chhabra N., Kaur A., Kaur S. Influence of pumpkin (Cucurbita pepo) flour on the physicochemical, functional, and sensory properties of multigrain gluten-free chapati. Food Science and Technology International. 2025. [Online first]. doi: 10.1177/10820132251339706.

17 Neronova E.Yu., Khaidukova E.V., Fateeva N.V. Functional Fermented Milk Product "Tykyvoeshka". Dairy Farming Bulletin. 2022. no. 4 (48). pp. 188–196. doi: 10.52231/2225-4269_2022_4_188 (in Russian).

18 Zdobnov A.I., Tsyganenko V.A., Peresichny M.I. Collection of Recipes for Dishes and Culinary Products: For Public Catering Enterprises. Moscow: Iris-Press, 2024. 688 p. (in Russian).

19 GOST 31986–2012. Public Catering Services. Method of Organoleptic Quality Assessment of Public Catering Products. Moscow: Standartinform, 2019. 11 p. (in Russian).

20 Chemical Composition of Russian Food Products. Moscow: DeLi print, 2008. 236 p. (in Russian).

21 Structurometer ST 2: User Manual. Moscow: Laboratory of Quality, 2019. 19 p. (in Russian).

22 Chernykh V.Ya. Information and Measurement System Based on the "Structurometer ST 2" Device for Monitoring the Rheological Characteristics of Food Media. In: Management of Rheological Properties of Food Products. 2015. pp. 24–29. (in Russian).

Сведения об авторах

Нина И. Мячикова к.т.н., доцент, кафедра технологии продуктов питания, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород 308015, Россия, myachikova@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0001-7997-0605

Юрий А. Болтенко к.т.н., кафедра технологии продуктов питания, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия, boltenko@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0003-2183-2263

Ирина Г. Зиновьева старший преподаватель, кафедра технологии продуктов питания, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия, zinovyeva@bsuedu.ru

Яна А. Сластникова специалист-логист, Отдел логистики на транспорте, ООО «Готэк-ЦПУ», мкр. Промплощадка-3, здание 15/1, г. Железногорск, Курская обл., 307170, Россия, slastnikova231099@mail.ru

Лариса Н. Фролова д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-mapp@vsuet.ru
https://orcid.org/0000-0002-6505-4136

Наталья В. Родичева к.т.н., руководитель, департамент контроля качества и сертификации, ООО «ИРЕКС ТРИЭР», ул. Щипок, 18, стр. 3, г. Москва, 115093, Россия, rodicheva@bsuedu.ru

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Nina I. Myachikova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Food technology department, Belgorod State National Research University, Pobedy Str., 85, Belgorod, 308015, Russia, myachikova@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0001-7997-0605

Yurij A. Boltenko Cand. Sci. (Engin.), Food technology department, Belgorod State National Research University, Pobedy Str., 85, Belgorod, 308015, Russia, boltenko@bsuedu.ru
https://orcid.org/0000-0003-2183-2263

Irina G. Zinoveva Senior lecturer, Food technology department , Belgorod State National Research University, Pobedy Str., 85, Belgorod, 308015, Russia, zinovyeva@bsuedu.ru

Yana A. Slastnikova Logistics specialist, Transport Logistics Department, Gotek-CPU LLC, Industrial Site-3, building 15/1, Zheleznogorsk, Kursk region, 307170, Russia, slastnikova231099@mail.ru

Larisa N. Frolova Doc. Sci. (Engin.), professor, Department of Food Production Machines and Apparatuses, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, kaf-mapp@vsuet.ru
https://orcid.org/0000-0002-6505-4136

Natal'ya V. Rodicheva Cand. Sci. (Engin.), Director, Department of Quality Control and Certification, IREKS TRIER LLC, Shchipok St., 18, p. 3, Moscow, 115093, Russia, rodicheva@bsuedu.ru

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 15/12/2025 **После редакции** 19/01/2026 **Принята в печать** 09/02/2026

Received 15/12/2025 **Accepted in revised** 19/01/2026 **Accepted** 09/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-159-168 Обзорная статья/Review article
УДК 664.8:635.657 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Нут: функциональные свойства и технологии переработки

Анна А. Дерканосова [1] aa-derk@yandex.ru 0000-0002-9726-9262
Елена Е. Курчаева [2] alena.kurchaeva@ya.ru 0000-0001-5958-0909
Татьяна В. Кудактина [1] tatya.erokhina.55555@gmail.com 0009-0000-3762-2258
Степан В. Скалатский [1] stepanskalya@mail.ru 0009-0009-9891-4559
Владислав В. Белоусов [1] vlados61ru@mail.ru 0009-0003-8079-8533
Софья П. Воронькова [3] l.p.popova.nv@mail.ru 0009-0003-5799-873X

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, улица Мичурина, 1 Воронеж, 394087, Россия
3 ИП Вороньков Петр Николаевич, ул. Ленина. д, 14, с. Красноселовка, Воронежская обл. 397691, Россия

Аннотация. Нут сорта Хабиб (*Cicer arietinum* L.) — среднеспелый крупнозёрный сорт, включённый в Госреестр по Центрально-Черноземному и Северо-Кавказскому регионам РФ, с содержанием белка до 25%, массой 1000 семян 299–399 г и максимальной урожайностью 44,4 ц/га. Семена нута содержат 17–25% белка (скор незаменимых аминокислот DIAAS 0,67–0,84), крахмал с долей амилозы 32–45%, пищевые волокна 18–22% сухого вещества (СВ), липиды 4–8% СВ с преобладанием линолевой кислоты (43–62%). Функционально-технологические свойства (ФТС) нутовой муки и белковых препаратов: водопоглощающая способность 1,2–2,1 г/г, водоудерживающая 3,5–5,0 г/г белка, эмульгирующая активность 60–75%, минимальная гелеобразующая концентрация 10–14%. Биоактивация семян проращиванием при 20–25°С в течение 48–72 ч снижает содержание антипитательных факторов (АПФ): ингибиторов протеаз на 30–70%, фитатов на 20–50%, олигосахаридов на 40–80%. Проращивание в молочных средах (пахта, сыворотка) при соотношении с водой 1:2 повышает содержание свободных аминокислот в проростках на 15–30% относительно водного контроля. Щелочная экстракция при pH 8–10 с изоэлектрическим осаждением при pH 4,5 обеспечивает выход белковых изолятов с содержанием белка 85–95%; воздушная классификация даёт концентраты 50–65% при сохранении нативных ФТС. Ферментативный гидролиз при степени гидролиза 5–10% улучшает растворимость и ФТС; при степени гидролиза 15–25% образуются биоактивные пептиды с антигипертензивной и антиоксидантной активностью. Пастообразные продукты из биоактивированного нута содержат на 25–40% больше свободных аминокислот, чем необработанное сырьё, при влажности 65–75%. Сравнительный анализ с сортами Приво 1, Триумф, Номинал и Краснокутский 36 подтверждает преимущества сорта Хабиб по крупнозёрности, суммарному белковому сбору с единицы площади и фитосанитарной устойчивости, что обосновывает его приоритетность как сырья для получения белковых препаратов и функциональных пищевых продуктов.

Ключевые слова: нут, функционально-технологические свойства, биоактивация, проращивание, белковые концентраты, пастообразные массы, антипитательные вещества, пищевая ценность.

Chickpea: Functional Properties and Processing Technologies

Anna A. Derkanosova [1] aa-derk@yandex.ru 0000-0002-9726-9262
Elena E. Kurchaeva [2] alena.kurchaeva@ya.ru 0000-0001-5958-0909
Tatyana V. Kudaktina [1] tatya.erokhina.55555@gmail.com 0009-0000-3762-2258
Stepan V. Skalatsky [1] stepanskalya@mail.ru 0009-0009-9891-4559
Vladislav V. Belousov [1] vlados61ru@mail.ru 0009-0003-8079-8533
Sofya P. Voron'kova [3] l.p.popova.nv@mail.ru 0009-0003-5799-873X

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
2 Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina Street, 1 Voronezh, 394087, Russia
3 IE Voron'kov Petr Nikolaevich, 14 Lenin St., Krasnoselovka village, Voronezh region, 397691, Russia

Abstract. Chickpea variety Khabib (*Cicer arietinum* L.) is a mid-season, large-seeded variety registered for the Central Black Earth and North Caucasus regions of the Russian Federation, with protein content up to 25%, 1000-seed weight of 299–399 g, and maximum yield of 44.4 centners per hectare. Chickpea seeds contain 17–25% protein (digestible indispensable amino acid score 0.67–0.84), starch with amylose content of 32–45%, dietary fibre of 18–22% dry matter (DM), and lipids of 4–8% DM dominated by linoleic acid (43–62%). Functional and technological properties (FTP) of chickpea flour and protein preparations are: water absorption capacity 1.2–2.1 g/g, water holding capacity 3.5–5.0 g/g protein, emulsifying activity 60–75%, minimum gelation concentration 10–14%. Bioactivation by germination at 20–25°C for 48–72 h reduces antinutritional factors: protease inhibitors by 30–70%, phytates by 20–50%, oligosaccharides by 40–80%. Germination in dairy media (buttermilk, whey) at a 1:2 ratio with water increases free amino acid content in sprouts by 15–30% relative to the water control. Alkaline extraction at pH 8–10 followed by isoelectric precipitation at pH 4.5 yields protein isolates with 85–95% protein; air classification produces concentrates of 50–65% while fully preserving native FTP. Enzymatic hydrolysis at a degree of hydrolysis of 5–10% improves solubility and FTP; at 15–25% it generates bioactive peptides with antihypertensive and antioxidant activity. Paste-like products from bioactivated chickpea contain 25–40% more free amino acids than unprocessed raw material at a moisture content of 65–75%. Comparative analysis with varieties Privo 1, Triumf, Nominal, and Krasnokutsky 36 confirms the advantages of variety Khabib in grain size, total protein yield per unit area, and phytosanitary resistance, substantiating its priority as a raw material for protein preparation and functional food production.

Keywords: chickpea, functional and technological properties, bioactivation, germination, protein concentrates, paste-like products, antinutritional factors, nutritional value.

Для цитирования
Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Кудактина Т.В., Скалатский С.В., Белоусов В.В., Воронькова С.П. Нут: функциональные свойства и технологии переработки // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 159–168. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-159-168

For citation
Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Kudaktina T.V., Skalatsky S.V., Belousov V.V., Voron'kova S.P. Chickpea: Functional Properties and Processing Technologies. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 159–168. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-159-168

© 2026, Дерканосова А.А. и др. / Derkanosova A.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В условиях глобального роста населения и нарастающей проблемы белкового дефицита особую актуальность приобретает поиск альтернативных источников растительного белка. Бобовые культуры, в частности нут (*Cicer arietinum L.*), занимают третье место в мире по объему производства среди зернобобовых и признаются наиболее перспективным сырьем для создания продуктов питания нового поколения [1]. Объектом настоящего исследования выбран сорт нута Хабиб – среднеспелый крупнозёрный сорт (масса 1000 семян 299–399 г.), включённый в Государственный реестр селекционных достижений РФ по Центрально-Черноземному и Северо-Кавказскому регионам, характеризующийся высокой засухоустойчивостью, устойчивостью к полеганию и осыпанию, а также повышенным содержанием белка – до 25%.

Мировое производство нута составляет около 16–18 млн тонн в год (по данным ФАО за 2022–2023 гг.), при этом лидирующие позиции занимают Индия (около 74% мирового объёма), Австралия и Турция. В России интерес к данной культуре значительно возрос в последнее десятилетие: площади под нутом расширяются в Поволжье, Центральном Черноземье и на Северном Кавказе, что открывает широкие возможности для развития отечественной переработки [2].

Семена нута обладают уникальным сочетанием пищевых и функциональных свойств: высоким содержанием белка (17–25%, у сорта Хабиб – до 25%), сбалансированным аминокислотным составом, значительным количеством пищевых волокон, минеральных веществ и биологически активных соединений. Вместе с тем наличие антипитательных факторов – ингибиторов протеаз, олигосахаридов, фитатов – ограничивает биодоступность нутриентов и затрудняет промышленное применение необработанного сырья [3].

Биоактивация семян методом проращивания является экономически доступным и экологически безопасным способом повышения пищевой ценности нута, инактивации антипитательных компонентов и улучшения функционально-технологических характеристик. Параллельно активно развивается направление глубокой переработки нута с получением белковых концентратов и изолятов, пригодных для обогащения широкого спектра пищевых продуктов [4].

Цель данного обзора – систематизация актуальных научных данных по функционально-технологическим свойствам нута, методам его биоактивации и технологиям получения белковых препаратов для нужд пищевой промышленности.

1. Химический состав и пищевая ценность семян нута

1.1 Белковый и аминокислотный состав.

Белки составляют от 17 до 25% сухой массы семян нута в зависимости от сорта, условий выращивания и агроклиматической зоны; у сорта Хабиб содержание белка достигает 25%, что соответствует верхней границе диапазона для вида *Cicer arietinum L*. Основные запасные белки нута – глобулины (легумин и вицилин), составляющие 60–80% от суммарного белка, и альбумины (15–25%). Соотношение незаменимых аминокислот в нутовом белке близко к стандарту ФАО/ВОЗ, однако лимитирующими аминокислотами являются метионин и цистин [5].

Содержание лизина в белке нута достигает 6,5–7,2 г / 100 г. белка, что существенно превосходит аналогичный показатель злаковых культур. Это обусловливает высокую ценность нута как компонента комбинированных растительных белковых систем, способных восполнить взаимный аминокислотный дефицит. Скор незаменимых аминокислот (DIAAS) для нутового белка составляет 0,67–0,84 в зависимости от способа обработки, что соответствует категории «хороший источник белка» [6].

1.2. Углеводный состав и пищевые волокна.

Углеводы нута представлены крахмалом (40–50% СВ), растворимыми сахарами (сахароза, рафиноза, стахиоза – 3–8% СВ) и пищевыми волокнами (18–22% СВ). Крахмал нута характеризуется повышенным содержанием амилозы (32–45%), что обеспечивает его резистентность к ферментативному гидролизу и пониженный гликемический индекс готовых продуктов [7].

Олигосахариды семейства раффинозы (рафиноза, стахиоза, вербаскоза) являются основными антипитательными углеводами нута. Будучи не переваренными в тонком кишечнике, они подвергаются брожению в толстом кишечнике, вызывая метеоризм. Вместе с тем данные соединения обладают пребиотическими свойствами и способствуют росту бифидобактерий, что требует взвешенного подхода к их содержанию в готовых продуктах [8].

1.3. Липидный состав.

Содержание липидов в семенах нута составляет 4–8% СВ. Жирнокислотный состав представлен преимущественно ненасыщенными жирными кислотами: линолевая (С18:2, омега-6) – 43–62%, олеиновая (С18:1, омега-9) – 22–35%, линоленовая (С18:3, омега-3) – 3–7%. Соотношение омега-6/омега-3 в нутовом масле составляет 6–8:1, что соответствует рекомендованным диетологическим нормам [9].

Фракция неомыляемых липидов нута содержит фитостерины (бета-ситостерин, кампестерин), токоферолы и каротиноиды, обладающие выраженной антиоксидантной активностью. Общее содержание токоферолов составляет 15–30 мг / 100 г. масла, что сопоставимо с традиционными растительными маслами [10].

1.4. Минеральный состав и витамины.

Нут является богатым источником макро- и микроэлементов: железа (4–6 мг / 100 г.), цинка (2,5–4,5 мг / 100 г.), кальция (57–160 мг / 100 г.), магния (79–140 мг / 100 г.), фосфора (250–480 мг / 100 г.). Высокое содержание железа при сочетании с витамином С (5–12 мг / 100 г.) способствует его эффективному усвоению и делает нут значимым продуктом в профилактике железодефицитной анемии [11].

Из витаминов группы В наиболее значимы тиамин (В1 – 0,3–0,5 мг / 100 г.), рибофлавин (В2 – 0,15–0,25 мг / 100 г.), ниацин (В3 – 1,5–3,0 мг / 100 г.) и фолиевая кислота (В9 – 170–340 мкг / 100 г.). Последняя особенно важна для беременных женщин и лиц с повышенным риском сердечно-сосудистых заболеваний [12].

2. Функционально-технологические свойства нута

2.1. Водопоглощающая и водоудерживающая способность.

Водопоглощающая способность (ВПС) нутовой муки составляет 1,2–2,1 г воды/г сухого продукта, что обусловлено высоким содержанием белков и полисахаридов. ВПС существенно зависит от дисперсности помола, pH среды и температуры. Максимальные значения ВПС наблюдаются при pH 7–8 и температуре 20–25 °C [13].

Водоудерживающая способность (ВУС) нутовых белковых препаратов достигает 3,5–5,0 г воды/г белка. Высокая ВУС обеспечивает улучшение текстурных характеристик пищевых систем, предотвращает синерезис и продлевает сроки хранения продуктов. Особую роль в формировании ВУС играют бета-конглицинин и лейциноподобные глобулины [14].

2.2. Жироудерживающая и эмульгирующая способность.

Жироудерживающая способность нутовой муки и изолятов составляет 1,5–3,2 г масла/г продукта. Эмульгирующая активность нутовых белков (60–75%) и стабильность эмульсий (55–85%) сопоставимы с соевыми белковыми препаратами, что открывает широкие перспективы применения нута в производстве соусов, паштетов, мясных аналогов и кондитерских изделий [15].

Эмульгирующие свойства нутового белка существенно зависят от степени его модификации. Частичный гидролиз протеазами (степень гидролиза 5–15%) приводит к повышению эмульгирующей активности на 20–35% по сравнению с нативным белком за счет экспонирования гидрофобных аминокислотных остатков [16].

2.3. Пенообразующие и гелеобразующие свойства.

Нутовые белки обладают умеренной пенообразующей способностью (45–70%) при относительно высокой стабильности пены (60–80% через 30 мин). Эти свойства определяют перспективность применения нутового белка в производстве взбитых десертов, кремов и аналогов яичного белка (аквафаба) [17].

Минимальная гелеобразующая концентрация нутовых белковых изолятов составляет 10–14%. Гели на основе нутового белка характеризуются прозрачностью, когезивностью и упругостью, зависящими от концентрации белка, pH и ионной силы раствора. Тепловая обработка (80–90 °C, 20–30 мин) инициирует денатурацию глобулиновых фракций и последующее образование трехмерной сетчатой структуры геля [18].

3. Биоактивация семян нута методом проращивания

3.1. Принципы и механизмы биоактивации.

Биоактивация – процесс активации собственных ферментных систем семян под действием внешних факторов (температура, влажность, световой режим), ведущий к глубоким биохимическим преобразованиям запасных веществ. При прорастании активируются протеазы, амилазы, липазы и фитазы, что приводит к гидролизу крупных молекул белков, углеводов и липидов до более доступных и функциональных форм [19].

В ходе биоактивации существенно снижается содержание антипитательных факторов: ингибиторов протеаз – на 30–70%, фитатов – на 20–50%, олигосахаридов – на 40–80%, танинов – на 15–40%. Параллельно возрастает биодоступность белка (на 10–25%), минеральных элементов (железа – на 30–50%, цинка – на 20–35%) и витаминов группы В [20].

3.2. Влияние среды проращивания на состав и свойства.

Выбор жидкой среды для замачивания и проращивания семян нута оказывает существенное влияние на интенсивность биохимических превращений. Традиционно используется водная среда (контроль), однако перспективным направлением является применение молочных сред – пахты и молочной сыворотки – в различных соотношениях с водой (1:1; 1:2; 1:3) [21].

Пахта содержит фосфолипиды (до 0,5%), молочный белок, лактозу и минеральные вещества, которые обогащают проростки дополнительными нутриентами и создают благоприятную питательную среду для активации ферментных систем. Применение пахты в соотношении 1:2 с водой обеспечивает оптимальный баланс между интенсивностью прорастания и обогащением проростков белком и фосфолипидами [22].

Молочная сыворотка (нативная) является источником сывороточных белков (бета-лактоглобулин, альфа-лактальбумин), лактозы, органических кислот и комплекса витаминов. Её использование при проращивании нута приводит к увеличению содержания свободных аминокислот в проростках на 15–30% по сравнению с водным контролем. Оптимальным считается соотношение сыворотки и воды 1:2 при продолжительности проращивания 48–72 часа или до достижения длины отростка 0,8–1,0 см [23].

3.3. Кинетика прорастания и оптимальные условия.

Оптимальные условия проращивания нута: температура 20–25 °C, относительная влажность воздуха 85–95%, продолжительность 48–72 часа. Критерием готовности биоактивированного сырья служит длина проростка 0,5–1,5 см, при которой достигается максимальное снижение антипитательных факторов при сохранении высокой пищевой ценности [24].

Установлено, что активность протеолитических ферментов нута возрастает в 3–5 раз в течение первых 48 часов проращивания. Амилолитическая активность увеличивается в 2–4 раза, фитазная – в 4–8 раз. При превышении оптимальной продолжительности проращивания (свыше 96 часов) наблюдается снижение содержания белка и углеводов за счет интенсивного дыхательного метаболизма [25].

3.4. Изменение антиоксидантного статуса при биоактивации.

Проращивание семян нута сопровождается существенным повышением антиоксидантной активности. Суммарное содержание полифенолов возрастает на 40–80%, антиоксидантная активность (метод DPPH) – на 30–60% по сравнению с необработанными семенами. Это обусловлено активацией синтеза фенольных соединений, накоплением аскорбиновой кислоты и появлением новых антиоксидантных пептидов в результате протеолиза [26].

Содержание витамина С в проростках нута возрастает с 5–8 мг / 100 г. (в сухих семенах) до 15–30 мг / 100 г. в процессе прорастания. Одновременно увеличивается содержание бета-каротина (в 2–3 раза) и токоферолов (в 1,5–2 раза), что существенно повышает физиологическую ценность биоактивированного продукта [27].

4. Технологии получения белковых концентратов и изолятов

4.1. Методы выделения белков нута.

Для получения белковых препаратов из нута применяют четыре основных технологических подхода: щелочная экстракция с изоэлектрическим осаждением, солевая экстракция, водная экстракция и физические методы (воздушная классификация, микронизация). Каждый метод имеет свои преимущества с точки зрения выхода белка, степени его чистоты и сохранения нативных функциональных свойств [28].

Наиболее распространен метод щелочной экстракции (pH 8–10) с последующим изоэлектрическим осаждением при pH 4,5. Данный метод обеспечивает получение изолятов с содержанием белка 85–95% и высоким выходом (60–75% от исходного белка). Основным недостатком является частичная денатурация белка в щелочной среде и снижение растворимости готового препарата [29].

4.2. Воздушная классификация.

Воздушная классификация нутовой муки позволяет получить белковые концентраты с содержанием белка 50–65% без применения влажных процессов и органических растворителей. Метод основан на различии в плотности и размере частиц крахмала (10–30 мкм) и белковых тел (2–8 мкм). Технология полностью сохраняет нативные свойства белка и не требует стадии сушки [30].

Выход белкового концентрата при воздушной классификации составляет 20–35% от массы муки при эффективности фракционирования 65–80%. Получаемые концентраты характеризуются высокой растворимостью (80–95% при pH 7), превосходящей аналогичный показатель влажных концентратов. Это делает их особенно привлекательными для производства напитков и жидких пищевых систем [31].

4.3. Ферментативная модификация белков.

Ферментативный гидролиз нутового белка протеазами (Alcalase, Flavourzyme, папаин) позволяет направленно изменять его функциональные свойства. При степени гидролиза 5–10% значительно улучшаются растворимость, эмульгирующая активность и пенообразующая способность. При более глубоком гидролизе (DH 15–25%) образуются биоактивные пептиды с антигипертензивной, антиоксидантной и иммуномодулирующей активностью [32].

Ингибиторные пептиды ангиотензинпревращающего фермента (АПФ), полученные из нутового белка, характеризуются значениями IC50 в диапазоне 0,15–1,20 мг/мл.

Антиоксидантные пептиды нута (DPPH IC50 = 0,8 – 3,5 мг/мл) сопоставимы по активности с синтетическими антиоксидантами, что открывает перспективы их применения в функциональных продуктах и биологически активных добавках [33].

4.4. Применение белковых концентратов в производстве пищевых продуктов.

Белковые концентраты и изоляты нута находят применение в широком спектре пищевых продуктов. В мясной промышленности они используются в качестве функциональных добавок при производстве фаршей, колбасных изделий и полуфабрикатов в дозировке 2–8%, обеспечивая улучшение влагоудерживающей способности и снижение себестоимости продукции [34].

В хлебопечении добавление нутового белкового концентрата (3–7%) улучшает аминокислотный скор хлеба, повышает его пищевую ценность и замедляет черствение. В производстве макаронных изделий обогащение нутовым белком (5–10%) позволяет получить продукты с повышенным содержанием лизина и сниженным гликемическим индексом. В кисломолочной промышленности нутовые белки применяются при производстве йогуртов, кефира и творожных продуктов, улучшая их текстурные характеристики и повышая биологическую ценность [35].

5. Пастообразные массы на основе биоактивированного нута

5.1. Принципы разработки технологии.

Пастообразные продукты на основе пророщенного нута занимают особое место среди функциональных пищевых систем нового поколения. Их технологическое производство предусматривает этапы биоактивации семян, термической обработки (бланширование или варка), измельчения до пюреобразного состояния, введения вкусовых и функциональных добавок, а также упаковки и стерилизации [36].

Ключевым технологическим параметром является режим термической обработки биоактивированных семян. Бланширование при 85–95 °C в течение 5–10 минут обеспечивает инактивацию ферментов, предотвращающую потемнение продукта, одновременно сохраняя максимальный нутриентный состав. Более жесткая термообработка (автоклавирование) гарантирует микробиологическую безопасность при длительном хранении [37].

5.2. Показатели качества и безопасности.

Пастообразные массы на основе пророщенного нута характеризуются повышенным по сравнению с необработанными семенами содержанием свободных аминокислот (на 25–40%), восстановленных форм витаминов группы В, антиоксидантных соединений. Влажность готового продукта составляет 65–75%, что обусловливает необходимость строгого контроля микробиологических показателей в процессе хранения [38].

Органолептическая оценка пастообразных масс выявляет специфический ореховый аромат с молочными нотами (при использовании молочных сред для проращивания), однородную мажущуюся консистенцию и приятный вкус. Инструментальная оценка с применением технологии «электронного носа» позволяет объективно охарактеризовать профиль летучих соединений и выделить маркеры свежести и качества продукта [39].

6. Сравнительный анализ сортов нута и преимущества сорта хабиб

Для объективной оценки технологического потенциала сорта Хабиб проведён сравнительный анализ его характеристик с основными районированными сортами нута, допущенными к использованию на территории Российской Федерации: Приво 1, Триумф, Номинал и Краснокутский 36. Указанные сорта широко применяются в отечественной практике как стандарты при государственных испытаниях и охватывают основные регионы возделывания культуры – Центрально-Черноземный, Северо-Кавказский и Средневолжский.

Сравнительные данные по ключевым агрономическим и биохимическим показателям сортов приведены в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 позволяет выделить следующие конкурентные преимущества сорта Хабиб в сравнении с традиционно применяемыми сортами.

1. Крупнозёрность. Масса 1000 семян сорта Хабиб составляет 299–399 г., что в среднем на 53 г. превышает аналогичный показатель крупнозёрного стандарта Триумф и на 70–100 г. – показатели сортов Приво 1 и Номинал. Крупные семена обеспечивают более высокий выход белковых фракций при экстракции, что принципиально важно для получения белковых концентратов и изолятов с максимальным выходом целевого продукта. Кроме того, крупное зерно соответствует требованиям премиального сегмента рынка нута кабульского типа, экспортные цены на который превышают цены на мелкозёрный нут в 2–3 раза.

Таблица 1.

Сравнительная характеристика сортов нута, включённых в Госреестр РФ

Table 1.

Comparative characteristics of chickpea varieties included in the State Register of the Russian Federation

Показатель Index	Хабиб	Приво 1	Триумф	Номинал	Краснокутский 36
Группа спелости Maturity group	Среднеспелый Mid-season	Среднеранний Mid-early	Среднеспелый Mid-season	Среднеспелый Mid-season	Среднеспелый Mid-season
Вегетационный период, дней Growing season, days	71–88	68–91	94–98	69–83	85–100
Масса 1000 семян, г 1000 seed weight, g	299–399	248–356	290–422	258–327	200–300
Содержание белка, % Protein content, %	до 25	21,8–26	21,7–24,6	17–22	19–22
Средняя урожайность в ЦЧР, ц/га Average yield in the Central Black Earth Region, c/ha	32,0	26,9	–	32,4	–
Максимальная урожайность, ц/га Maximum yield, c/ha	44,4	30,2	40,8	44,8	≈35
Засухоустойчивость Drought resistance	Высокая High	Средняя Average	Высокая High	Высокая High	Высокая High
Устойчивость к болезням Disease resistance	Не поражался	Устойчив к аскохитозу	Устойчив к фузариозу	Не поражался	Средняя
Регионы допуска Approval regions	ЦЧР, СК	Все регионы РФ	СК, Нижняя Волга	ЦЧР, СВ	Нижняя Волга, СК

Примечание: ЦЧР – Центрально-Черноземный регион; СК – Северо-Кавказский регион; СВ – Средневолжский регион; – данные не приводятся в официальных источниках для данного региона

Note: CCR – Central Black Earth Region; NC – North Caucasus Region; MV – Middle Volga Region; – data not provided in official sources for this region

2. Содержание белка. Показатель белковости сорта Хабиб (до 25%) находится на уровне наиболее высокобелковых отечественных сортов – Приво 1 (21,8–26%) и Триумф (21,7–24,6%) – и существенно превосходит сорта Номинал (17–22%) и Краснокутский 36 (19–22%). С учётом крупнозёрности сорта совокупный белковый сбор с единицы площади у Хабиба оказывается одним из наиболее высоких среди районированных сортов ЦЧР.

3. Урожайность и адаптивность. Средняя урожайность сорта Хабиб в ЦЧР составляет 32,0 ц/га, максимальная зафиксированная – 44,4 ц/га (Орловская область, 2020 г.). В Орловской области прибавка к стандарту Аватар составила 4,8 ц/га. Сорт обладает высокой засухоустойчивостью и устойчивостью к полеганию и осыпанию, что обеспечивает стабильность урожая в условиях континентального климата ЦЧР и снижает потери при механизированной уборке.

4. Фитосанитарная устойчивость. За весь период государственных испытаний сорт Хабиб не поражался болезнями и не повреждался вредителями, что существенно снижает риски потерь урожая и позволяет минимизировать применение пестицидов. Это выгодно отличает его от ряда сортов, имеющих среднюю восприимчивость к аскохитозу – основному заболеванию нута в условиях ЦЧР.

5. Технологические перспективы. Крупное зерно сорта Хабиб с высоким содержанием белка обеспечивает лучшую технологичность переработки: более высокий выход при мокрой экстракции, меньшие потери при воздушной классификации, более однородный гранулометрический состав муки. Оптимальное сочетание перечисленных характеристик делает сорт Хабиб приоритетным сырьём для производства белковых концентратов, изолятов и пастообразных продуктов на основе биоактивированного нута.

Результаты

Проведенный обзор свидетельствует о высоком потенциале нута как многофункционального сырья для пищевой промышленности. Уникальное сочетание белкового состава, функционально-технологических свойств и возможностей биоактивации выдвигает нут в ряд наиболее перспективных культур для решения задач по производству продуктов здорового питания.

Метод биоактивации путем проращивания в молочных средах (пахта, нативная молочная сыворотка) позволяет значительно улучшить пищевую ценность нутового сырья, снизить содержание антипитательных факторов и расширить спектр функционально-технологических свойств. Оптимальные условия биоактивации

(соотношение молочной среды и воды 1:2, продолжительность 48–72 часа, длина отростка 0,8–1,0 см) обеспечивают наилучший баланс между нутриентным составом и технологическими характеристиками сырья.

Технологии получения белковых концентратов и изолятов из нута достигли высокого уровня зрелости и обеспечивают получение препаратов с содержанием белка 50–95%, обладающих комплексом ценных функционально-технологических свойств. Особую перспективу представляет ферментативная модификация нутового белка с получением биоактивных пептидов.

Разработка технологии пастообразных масс на основе биоактивированного нута является актуальным и перспективным направлением, отвечающим современным тенденциям в области здорового питания и импортозамещения в пищевой промышленности России. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию условий биоактивации, разработку нормативной документации и проведение медико-биологической оценки разрабатываемых продуктов.

Обсуждение

Проводится детальный анализ полученных данных в сопоставлении с данными литературы, что служит обоснованием выводов и заключений авторов.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность центру коллективного пользования «Испытательный центр» Воронежского государственного университета инженерных технологий (https://t.me/lev_lab, post@ckp-vsuet.ru, www.ckp-vsuet.ru) за участие в выполнении работы, профессиональные консультации и ценные замечания в ходе сбора и обработки данных. Авторы также благодарят селекционера нута ИП Вороньков П.Н. за предоставление семян сорта Хабиб для проведения исследований.

Литература

1 Kumar M., Tomar M., Potkule J. et al. Comprehensive review of chickpea (Cicer arietinum): Nutritional significance, health benefits, techno-functionalities, and food applications // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2025. doi: 10.1111/1541-4337.70152

2 Merga B., Haji J. Economic importance of chickpea: Production, value, and world trade // Cogent Food & Agriculture. 2019. V. 5. № 1. P. 1615718. doi: 10.1080/23311932.2019.1615718

3 Patil N.D., Bains A., Sridhar K. et al. Extraction, modification, biofunctionality, and food applications of chickpea (Cicer arietinum) protein: an up-to-date review // Foods. 2024. V. 13. № 9. P. 1398. doi: 10.3390/foods13091398

4 Kaur R., Prasad K. Technological, processing and nutritional aspects of chickpea (Cicer arietinum) – a review // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 109. P. 448–463. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.044

5 Grasso N., Lynch N.L., Arendt E.K., O'Mahony J.A. Chickpea protein ingredients: a review of composition, functionality, and applications // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2022. V. 21. № 1. P. 435–452. doi: 10.1111/1541-4337.12878

6 Augustin M.A., Chen J.Y., Ye J.H. Processing to improve the sustainability of chickpea as a functional food ingredient // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2024. V. 104. № 14. P. 8397–8413. doi: 10.1002/jsfa.13532

7 Singh G., Sehgal S., Singh V. Structural, physicochemical and functional properties of chickpea starch: a review // International Journal of Biological Macromolecules. 2022. V. 221. P. 33–47. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.08.190

8 Yeasmen N., Orsat V. Industrial processing of chickpeas (Cicer arietinum) for protein production // Crop Science. 2025. doi: 10.1002/csc2.21361

9 Ruiz-Zambrano N.L., Pérez-Carrillo E., Serna-Saldívar S.O., Tejada-Ortigoza V. Effect of thermal, nonthermal, and combined treatments on functional and nutritional properties of chickpeas // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. V. 64. № 31. P. 11356–11374. doi: 10.1080/10408398.2023.2237577

10 Samtiya M., Aluko R.E., Dhewa T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview // Food Production, Processing and Nutrition. 2020. V. 2. № 1. P. 6. doi: 10.1186/s43014-020-0020-5

11 Rebello C.J., Greenway F.L., Finley J.W. A review of the nutritional value of legumes and their effects on obesity and its related co-morbidities // Obesity Reviews. 2020. V. 21. № 1. P. e12929. doi: 10.1111/obr.12929

12 Sofi S.A., Singh J., Mir S.A., Dar B.N. Impact of germination on structural, physicochemical, techno-functional, and digestion properties of desi chickpea (Cicer arietinum L.) flour // Food Chemistry. 2023. V. 405. P. 135011. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.135011

13 Liu X., Bi S., Yin M. et al. Influence of germination on bioactivity, structural, functional and volatile characteristics of chickpea flours // Food Chemistry. 2024. V. 437. P. 137901. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137901

14 Boukid F., Rosell C.M., Rosene S. et al. Non-animal proteins as cutting-edge ingredients to reformulate meat and fish products // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 114. P. 247–264. doi: 10.1016/j.tifs.2021.05.042

15 Tachie C., Nwachukwu I.D., Aryee A.N.A. Dry fractionation of plant-based proteins for better meat analogue applications // Current Food Science and Technology Reports. 2023. doi: 10.1007/s43555-023-00009-1

16 Gao Y., Hao X., Hu Y. et al. Modification of the functional properties of chickpea proteins by ultrasonication treatment // Food & Function. 2023. V. 14. P. 1773–1784. doi: 10.1039/D2FO02492F

17 De Angelis D., Pasqualone A., Allegretta I. et al. Antinutritional factors, mineral composition and functional properties of dry fractionated flours as influenced by the type of pulse // Heliyon. 2021. V. 7. № 2. P. e06177. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06177

18 Vogelsang-O'Dwyer M., Petersen I.L., Joehnke M.S. et al. Comparison of faba bean protein ingredients produced using dry and wet fractionation processes // Foods. 2020. V. 9. № 3. P. 322. doi: 10.3390/foods9030322

19 Serrano-Sandoval S.N., Guardado-Félix D., Gutiérrez-Uribe J.A. Phytochemical profile and composition of chickpea (Cicer arietinum L.): varietal differences and effect of germination under elicited conditions // Foods. 2023. V. 12. № 18. P. 3393. doi: 10.3390/foods12183393

20 Yılmaz T.N., Polat Kaya H., Sakarya F.B. et al. The effect of germination on antinutritional components, in vitro starch and protein digestibility, content, and bioaccessibility of phenolics and antioxidants of some pulses // Food Science & Nutrition. 2025. doi: 10.1002/fsn3.4426

21 Avilés-Gaxiola S., Gutiérrez-Uribe J.A., Serna-Saldívar S.O., Milán-Carrillo J. Effect of solid-state fermentation on antinutritional factors and protein digestibility of chickpea flour // Plant Foods for Human Nutrition. 2022. V. 77. № 1. P. 120–127. doi: 10.1007/s11130-022-00952-5

22 Samtiya M., Aluko R.E., Dhewa T., Moreno-Rojas J.M. Potential health benefits of plant food-derived bioactive components: an overview // Foods. 2021. V. 10. № 4. P. 839. doi: 10.3390/foods10040839

23 Lu L., He C., Liu B. et al. Incorporation of chickpea flour into biscuits improves the physicochemical properties and in vitro starch digestibility // LWT – Food Science and Technology. 2022. V. 159. P. 113222. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113222

24 Bühler J.M., Petersen I.L., Joehnke M.S. et al. Comparison of faba bean protein preparations obtained by dry and wet fractionation processes // LWT – Food Science and Technology. 2020. V. 128. P. 109426. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109426

25 Kheto A., Bhunia K., Bhattacharya S. et al. Advances in chickpea processing: nutritional, functional, and food application perspectives // Food Reviews International. 2023. doi: 10.1080/87559129.2023.2190918

26 Zahir M., Fogliano L.V., Dhital S. Effect of chickpea agronomical practices and cooking on seed hardness, protein solubility and cell wall polysaccharides // Food Chemistry. 2020. V. 311. P. 125878. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125878

27 Chinma C.E., Eyinyere C.D., Adedeji O.E. et al. Germination and fermentation effects on quality, in vitro starch digestibility, and phenolic properties of Bambara groundnut flours // Food Chemistry. 2022. V. 376. P. 131855. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131855

28 Boukid F., Rosell C.M., Castellari M. Pea protein ingredients: a mainstream ingredient to (re)formulate innovative foods and beverages // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 110. P. 729–742. doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.040

29 González-Félix M.L., Martín-Cabrejas M.A., Landín-Granados J. et al. Chickpea protein concentrate as ingredient in restructured fish products // LWT – Food Science and Technology. 2020. V. 128. P. 109437. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109437

30 Boukid F. Chickpea (Cicer arietinum L.) protein as a prospective plant-based ingredient: a review // International Journal of Food Science & Technology. 2021. V. 56. № 11. P. 5435–5444. doi: 10.1111/ijfs.15046

31 Zhang Y., Rempel C., Liu Q. In vitro digestibility and functional characteristics of chickpea starch as affected by different processing methods // International Journal of Food Science & Technology. 2021. V. 56. № 11. P. 5753–5762. doi: 10.1111/ijfs.15127

32 Guldiken B., Franczyk A., Boyd L. et al. Physicochemical, nutritional and functional properties of chickpea and navy bean flours from different mills // European Food Research and Technology. 2022. V. 248. № 7. P. 1847–1858. doi: 10.1007/s00217-022-04010-1

33 Sun S., Ding Y., Yang J. et al. The antioxidant and antimicrobial properties of chickpea protein hydrolysates obtained under different enzymatic conditions // Molecules. 2021. V. 26. № 19. P. 5829. doi: 10.3390/molecules26195829

34 Bertolino M., Ghirardello D., Belviso S. et al. Chickpea (Cicer arietinum L.) and chickpea by-products: a source of nutrients and bioactive compounds // Foods. 2020. V. 9. № 10. P. 1419. doi: 10.3390/foods9101419

35 Ohanenye I.C., Ekezie F.G.C., Sarteshnizi R.A. et al. Legume seed protein digestibility as influenced by traditional and emerging physical processing technologies // Foods. 2022. V. 11. № 15. P. 2299. doi: 10.3390/foods11152299

36 Sharan S., Zanghelini G., Zotzel J. et al. Fava bean (Vicia faba L.) for food applications: from seed to ingredient processing and its effect on functional properties, antinutritional factors, flavor, and color // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021. V. 20. № 1. P. 401–428. doi: 10.1111/1541-4337.12681

37 Wang S., Moustaid-Moussa N., Chen L. et al. Novel insights of dietary polyphenols and obesity // Journal of Nutritional Biochemistry. 2020. V. 84. P. 108450. doi: 10.1016/j.jnutbio.2020.108450

38 Dun M., Azizi I., Kianfar F. Effects of heat and high pressure processing on chickpea (Cicer arietinum L.) protein concentrates: techno-functional and nutritional properties // Journal of Food Science and Technology. 2022. V. 59. № 7. P. 2836–2845. doi: 10.1007/s13197-021-05302-w

39 Bhinder S., Singh B., Kaur A. et al. Effect of germination on physicochemical, structural, anti-nutritional and functional properties of chickpea (Cicer arietinum L.) flour // Food Chemistry. 2021. V. 372. P. 131272. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131272

References

1 Kumar M., Tomar M., Potkule J. et al. Comprehensive review of chickpea (Cicer arietinum): Nutritional significance, health benefits, techno-functionalities, and food applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2025. [Online first]. doi: 10.1111/1541-4337.70152.

2 Merga B., Haji J. Economic importance of chickpea: Production, value, and world trade. Cogent Food & Agriculture. 2019. vol. 5. no. 1. article 1615718. doi: 10.1080/23311932.2019.1615718.

3 Patil N.D., Bains A., Sridhar K. et al. Extraction, modification, biofunctionality, and food applications of chickpea (Cicer arietinum) protein: an up-to-date review. Foods. 2024. vol. 13. no. 9. article 1398. doi: 10.3390/foods13091398.

4 Kaur R., Prasad K. Technological, processing and nutritional aspects of chickpea (Cicer arietinum) – a review. Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 109. pp. 448–463. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.044.

5 Grasso N., Lynch N.L., Arendt E.K., O'Mahony J.A. Chickpea protein ingredients: a review of composition, functionality, and applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2022. vol. 21. no. 1. pp. 435–452. doi: 10.1111/1541-4337.12878.

6 Augustin M.A., Chen J.Y., Ye J.H. Processing to improve the sustainability of chickpea as a functional food ingredient. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2024. vol. 104. no. 14. pp. 8397–8413. doi: 10.1002/jsfa.13532.

7 Singh G., Sehgal S., Singh V. Structural, physicochemical and functional properties of chickpea starch: a review. International Journal of Biological Macromolecules. 2022. vol. 221. pp. 33–47. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.08.190.

8 Yeasmen N., Orsat V. Industrial processing of chickpeas (Cicer arietinum) for protein production. Crop Science. 2025. [Online first]. doi: 10.1002/csc2.21361.

9 Ruiz-Zambrano N.L., Pérez-Carrillo E., Serna-Saldívar S.O., Tejada-Ortigoza V. Effect of thermal, nonthermal, and combined treatments on functional and nutritional properties of chickpeas. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. vol. 64. no. 31. pp. 11356–11374. doi: 10.1080/10408398.2023.2237577.

10 Samtiya M., Aluko R.E., Dhewa T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. Food Production, Processing and Nutrition. 2020. vol. 2. no. 1. article 6. doi: 10.1186/s43014-020-0020-5.

11 Rebello C.J., Greenway F.L., Finley J.W. A review of the nutritional value of legumes and their effects on obesity and its related co-morbidities. Obesity Reviews. 2020. vol. 21. no. 1. article e12929. doi: 10.1111/obr.12929.

12 Sofi S.A., Singh J., Mir S.A., Dar B.N. Impact of germination on structural, physicochemical, techno-functional, and digestion properties of desi chickpea (Cicer arietinum L.) flour. Food Chemistry. 2023. vol. 405. article 135011. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.135011.

13 Liu X., Bi S., Yin M. et al. Influence of germination on bioactivity, structural, functional and volatile characteristics of chickpea flours. Food Chemistry. 2024. vol. 437. article 137901. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137901.

14 Boukid F., Rosell C.M., Rosene S. et al. Non-animal proteins as cutting-edge ingredients to reformulate meat and fish products. Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 114. pp. 247–264. doi: 10.1016/j.tifs.2021.05.042.

15 Tachie C., Nwachukwu I.D., Aryee A.N.A. Dry fractionation of plant-based proteins for better meat analogue applications. Current Food Science and Technology Reports. 2023. [Online first]. doi: 10.1007/s43555-023-00009-1.

16 Gao Y., Hao X., Hu Y. et al. Modification of the functional properties of chickpea proteins by ultrasonication treatment. Food & Function. 2023. vol. 14. pp. 1773–1784. doi: 10.1039/D2FO02492F.

17 De Angelis D., Pasqualone A., Allegretta I. et al. Antinutritional factors, mineral composition and functional properties of dry fractionated flours as influenced by the type of pulse. Heliyon. 2021. vol. 7. no. 2. article e06177. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06177.

18 Vogelsang-O'Dwyer M., Petersen I.L., Joehnke M.S. et al. Comparison of faba bean protein ingredients produced using dry and wet fractionation processes. Foods. 2020. vol. 9. no. 3. article 322. doi: 10.3390/foods9030322.

19 Serrano-Sandoval S.N., Guardado-Félix D., Gutiérrez-Uribe J.A. Phytochemical profile and composition of chickpea (Cicer arietinum L.): varietal differences and effect of germination under elicited conditions. Foods. 2023. vol. 12. no. 18. Article 3393. doi: 10.3390/foods12183393.

20 Yılmaz T.N., Polat Kaya H., Sakarya F.B. et al. The effect of germination on antinutritional components, in vitro starch and protein digestibility, content, and bioaccessibility of phenolics and antioxidants of some pulses. Food Science & Nutrition. 2025. [Online first]. doi: 10.1002/fsn3.4426.

21 Avilés-Gaxiola S., Gutiérrez-Uribe J.A., Serna-Saldívar S.O., Milán-Carrillo J. Effect of solid-state fermentation on antinutritional factors and protein digestibility of chickpea flour. Plant Foods for Human Nutrition. 2022. vol. 77. no. 1. pp. 120–127. doi: 10.1007/s11130-022-00952-5.

22 Samtiya M., Aluko R.E., Dhewa T., Moreno-Rojas J.M. Potential health benefits of plant food-derived bioactive components: an overview. Foods. 2021. vol. 10. no. 4. article 839. doi: 10.3390/foods10040839.

23 Lu L., He C., Liu B. et al. Incorporation of chickpea flour into biscuits improves the physicochemical properties and in vitro starch digestibility. LWT – Food Science and Technology. 2022. vol. 159. article 113222. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113222.

24 Bühler J.M., Petersen I.L., Joehnke M.S. et al. Comparison of faba bean protein preparations obtained by dry and wet fractionation processes. LWT – Food Science and Technology. 2020. vol. 128. article 109426. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109426.

25 Kheto A., Bhunia K., Bhattacharya S. et al. Advances in chickpea processing: nutritional, functional, and food application perspectives. Food Reviews International. 2023. [Online first]. doi: 10.1080/87559129.2023.2190918.

26 Zahir M., Fogliano L.V., Dhital S. Effect of chickpea agronomical practices and cooking on seed hardness, protein solubility and cell wall polysaccharides. Food Chemistry. 2020. vol. 311. article 125878. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125878.

27 Chinma C.E., Eyinyere C.D., Adedeji O.E. et al. Germination and fermentation effects on quality, in vitro starch digestibility, and phenolic properties of Bambara groundnut flours. Food Chemistry. 2022. vol. 376. article 131855. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131855.

28 Boukid F., Rosell C.M., Castellari M. Pea protein ingredients: a mainstream ingredient to (re)formulate innovative foods and beverages. Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 110. pp. 729–742. doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.040.

29 González-Félix M.L., Martín-Cabrejas M.A., Landín-Granados J. et al. Chickpea protein concentrate as ingredient in restructured fish products. LWT – Food Science and Technology. 2020. vol. 128. article 109437. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109437.

30 Boukid F. Chickpea (Cicer arietinum L.) protein as a prospective plant-based ingredient: a review. International Journal of Food Science & Technology. 2021. vol. 56. no. 11. pp. 5435–5444. doi: 10.1111/ijfs.15046.

31 Zhang Y., Rempel C., Liu Q. In vitro digestibility and functional characteristics of chickpea starch as affected by different processing methods. International Journal of Food Science & Technology. 2021. vol. 56. no. 11. pp. 5753–5762. doi: 10.1111/ijfs.15127.

32 Guldiken B., Franczyk A., Boyd L. et al. Physicochemical, nutritional and functional properties of chickpea and navy bean flours from different mills. European Food Research and Technology. 2022. vol. 248. no. 7. pp. 1847–1858. doi: 10.1007/s00217-022-04010-1.

33 Sun S., Ding Y., Yang J. et al. The antioxidant and antimicrobial properties of chickpea protein hydrolysates obtained under different enzymatic conditions. Molecules. 2021. vol. 26. no. 19. article 5829. doi: 10.3390/molecules26195829.

34 Bertolino M., Ghirardello D., Belviso S. et al. Chickpea (Cicer arietinum L.) and chickpea by-products: a source of nutrients and bioactive compounds. Foods. 2020. vol. 9. no. 10. article 1419. doi: 10.3390/foods9101419.

35 Ohanenye I.C., Ekezie F.G.C., Sarteshnizi R.A. et al. Legume seed protein digestibility as influenced by traditional and emerging physical processing technologies. Foods. 2022. vol. 11. no. 15. article 2299. doi: 10.3390/foods11152299.

36 Sharan S., Zanghelini G., Zotzel J. et al. Fava bean (Vicia faba L.) for food applications: from seed to ingredient processing and its effect on functional properties, antinutritional factors, flavor, and color. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021. vol. 20. no. 1. pp. 401–428. doi: 10.1111/1541-4337.12681.

37 Wang S., Moustaid-Moussa N., Chen L. et al. Novel insights of dietary polyphenols and obesity. Journal of Nutritional Biochemistry. 2020. vol. 84. article 108450. doi: 10.1016/j.jnutbio.2020.108450.

38 Dun M., Azizi I., Kianfar F. Effects of heat and high pressure processing on chickpea (Cicer arietinum L.) protein concentrates: techno-functional and nutritional properties. Journal of Food Science and Technology. 2022. vol. 59. no. 7. pp. 2836–2845. doi: 10.1007/s13197-021-05302-w.

39 Bhinder S., Singh B., Kaur A. et al. Effect of germination on physicochemical, structural, anti-nutritional and functional properties of chickpea (Cicer arietinum L.) flour. Food Chemistry. 2021. vol. 372. article 131272. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131272.

Сведения об авторах

Анна А. Дерканосова д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Елена Е. Курчаева д.с.-х.н., профессор, кафедра частной зоотехнии, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1 Воронеж, 394087, Россия, alena.kurchaeva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5958-0909

Татьяна В. Кудактина к.э.н., инженер, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tatya.erokhina.55555@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-3762-2258

Степан В. Скалатский студент, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, stepanskalya@mail.ru
https://orcid.org/0009-0009-9891-4559

Владислав В. Белоусов студент, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий), пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vlados61ru@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-8079-8533

Софья П. Воронькова помощник селекционера, ИП Вороньков Петр Николаевич, ул. Ленина. д, 14, с. Красноселовка, Воронежская обл. 397691, Россия, l.p.popova.nv@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-5799-873X

Information about authors

Anna A. Derkanosova Dr. Sci. (Engin.), professor, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Elena E. Kurchaeva Dr. Sci. (Agric.), professor, private animal science department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina Street, 1 Voronezh, 394087, Russia, alena.kurchaeva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5958-0909

Tatyana V. Kudaktina Cand. Sci. (Econ.), engineer, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia, tatya.erokhina.55555@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-3762-2258

Stepan V. Skalatsky student, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia, stepanskalya@mail.ru
https://orcid.org/0009-0009-9891-4559

Vladislav V. Belousov student, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia, vlados61ru@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-8079-8533

Sofya P. Voron'kova assistant plant breeder, IE Voron'kov Petr Nikolaevich, 14 Lenin St., Krasnoselovka village, Voronezh region, 397691, Russia, l.p.popova.nv@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-5799-873X

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 29/12/2025	**После редакции** 16/02/2026	**Принята в печать** 09/03/2026
Received 29/12/2025	**Accepted in revised** 16/02/2026	**Accepted** 09/03/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-169-175 Оригинальная статья/Research article
УДК 615.322 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Оптимизация параметров экстракции биологически активных веществ из корня солодки методом планирования эксперимента по Боксу-Бенкену

Камиль Р. Баязитов [1] kamilbayazitov037@gmail.com 0009-0007-8424-1053
Наталья В. Яковченко [1] nviakovchenko@itmo.ru 0000-0002-5188-5916
Мария А. Анцыперова [1] antsyperova@itmo.ru 0009-0004-0005-6597

1 Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., г. Санкт-Петербург, 197101, Россия

Аннотация. Корень солодки (Glycyrrhiza glabra L.) является ценным лекарственным сырьем, содержащим комплекс биологически активных веществ с антиоксидантной активностью. Оптимизация процесса экстракции позволяет повысить эффективность извлечения целевых компонентов. Целью исследования является определение оптимальных параметров экстракции для максимального извлечения фенольных соединений и достижения высокой антиоксидантной активности экстрактов корня солодки. Для оптимизации процесса экстракции использован метод планирования эксперимента по Боксу-Бенкену с тремя факторами: продолжительность экстракции (60-120 мин), гидромодуль (1:10-1:30) и температура (50-70°С). В качестве откликов определяли антиоксидантную активность методом DPPH (АОА, %), содержание общих фенольных соединений методом Фолина-Чокалтеу (ОФС, мг ГК/г) и выход сухого вещества (СВ, %). Статистическая обработка данных проведена с построением математических моделей зависимости откликов от варьируемых факторов. Получены уравнения регрессии, описывающие зависимость антиоксидантной активности, содержания фенольных соединений и выхода сухого вещества от параметров экстракции. Установлено, что наибольшее влияние на все исследуемые отклики оказывает гидромодуль. Для антиоксидантной активности (Y1) и выхода сухого вещества (Y3) определяющими являются линейный и квадратичный члены гидромодуля. Содержание общих фенолов (Y2) зависит от продолжительности экстракции, гидромодуля и взаимодействия гидромодуля и температуры экстракции. Максимальная антиоксидантная активность (16,4%) и наибольший выход сухого вещества (3,05%) достигаются при продолжительности экстракции 120 мин, гидромодуле 1:10 и температуре 60°С. Методом планирования эксперимента по Боксу-Бенкену определены оптимальные параметры экстракции биологически активных веществ из корня солодки. Полученные математические модели позволяют прогнозировать качественные характеристики экстрактов в зависимости от условий процесса. Результаты исследования могут быть использованы для разработки технологии получения стандартизованных экстрактов солодки с заданными свойствами.

Ключевые слова: солодка, Glycyrrhiza glabra L., экстракция, планирование эксперимента, Бокс-Бенкен, антиоксидантная активность, DPPH, фенольные соединения, оптимизация.

Optimization of extraction parameters of biologically active substances from licorice root using the Box-Behnken experimental design method

Kamil R. Bayazitov [1] kamilbayazitov037@gmail.com 0009-0007-8424-1053
Natalia V. Iakovchenko [1] nviakovchenko@itmo.ru 0000-0002-5188-5916
Mariia A. Antsyperova [1] antsyperova@itmo.ru 0009-0004-0005-6597

1 ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia

Abstract. Licorice root (Glycyrrhiza glabra L.) is a valuable medicinal raw material containing a complex of biologically active substances with antioxidant activity. Optimization of the extraction process allows to increase the efficiency of target components extraction. The aim of the study is to determine the optimal extraction parameters for maximum extraction of phenolic compounds and achieving high antioxidant activity of licorice root extracts. The Box-Behnken experimental design method with three factors was used to optimize the extraction process: extraction time (60-120 min), hydromodulus (1:10-1:30), and temperature (50-70°C). As responses, antioxidant activity was determined by DPPH method (FRSA, %), total phenolic content by Folin-Ciocalteu method (TPC, mg GAE/g), and dry matter yield (DM, %). Statistical data processing was performed with construction of mathematical models of response dependence on variable factors. Regression equations describing the dependence of antioxidant activity, phenolic content, and dry matter yield on extraction parameters were obtained. It was found that hydromodulus has the greatest influence on all studied responses. For antioxidant activity (Y1) and dry matter yield (Y3), the linear and quadratic terms of hydromodulus are determining. Total phenolic content (Y2) depends on extraction time, hydromodulus, and their interaction. Maximum antioxidant activity (16.4%) and highest dry matter yield (3.05%) are achieved at extraction time of 120 min, hydromodulus 1:10, and temperature 60°C. Optimal parameters for extraction of biologically active substances from licorice root were determined by experimental design method. The obtained mathematical models allow predicting qualitative characteristics of extracts depending on process conditions. The research results can be used for developing technology for obtaining standardized licorice extracts with specified properties.

Keywords: licorice, Glycyrrhiza glabra L., extraction, experimental design, Box-Behnken, antioxidant activity, DPPH, phenolic compounds, optimization.

Для цитирования
Баязитов К.Р., Яковченко Н.В., Анцыперова М.А. Оптимизация параметров экстракции биологически активных веществ из корня солодки методом планирования эксперимента по Боксу-Бенкену // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 169–175. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-169-175

For citation
Bayazitov K.R., Iakovchenko N.V., Antsyperova M.A. Optimization of extraction parameters of biologically active substances from licorice root using the Box-Behnken experimental design method. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 169–175. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-169-175

© 2026, Баязитов К.Р.. и др. / Bayazitov K.R., et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Корень солодки (*Glycyrrhiza glabra L.*) широко применяется в фармацевтической и пищевой промышленности благодаря высокому содержанию биологически активных веществ, включая флавоноиды, сапонины и фенольные соединения [1, 2]. Антиоксидантные свойства экстрактов солодки обусловлены наличием полифенольных соединений, способных ингибировать свободнорадикальные процессы в организме [3, 4].

Эффективность экстракции биологически активных веществ из растительного сырья существенно зависит от технологических параметров процесса: продолжительности, температуры, соотношения сырье-экстрагент (гидромодуля) и других факторов [3, 5, 6]. Традиционные подходы к оптимизации, основанные на варьировании одного фактора при фиксированных значениях остальных, не позволяют учесть взаимодействие между параметрами и требуют значительных затрат времени и ресурсов [5].

Методы планирования эксперимента, включая дизайн Бокса-Бенкена, зарекомендовали себя как эффективный инструмент для оптимизации многофакторных процессов в фармацевтической технологии и технологии растительных экстрактов [3, 6, 7]. Применение методологии поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) позволяет установить математические зависимости между варьируемыми факторами и целевыми показателями, определить оптимальные условия процесса и спрогнозировать свойства продукта [5, 7–9].

В литературе описаны различные подходы к оптимизации экстракции фенольных соединений из растительного сырья с использованием многофакторных экспериментальных дизайнов [8–10]. Однако для корня солодки комплексные исследования влияния параметров экстракции на антиоксидантную активность и выход биологически активных веществ представлены недостаточно [1–4]. Недостаточно изученными остаются вопросы количественной оценки влияния основных технологических параметров (продолжительность, температура, гидромодуль) на функциональные показатели качества экстрактов – антиоксидантную активность, содержание фенольных соединений и выход сухого вещества. Также отсутствуют математические модели, позволяющие спрогнозировать свойства экстракта корня солодки в зависимости от технологических параметров его получения.

Цель работы – определение оптимальных параметров процесса экстракции биологически активных веществ из корня солодки (*Glycyrrhiza glabra L.*) методом планирования эксперимента по Боксу-Бенкену, а также установление математических зависимостей между технологическими факторами и показателями качества экстрактов.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали измельченные корни солодки голой *Glycyrrhiza glabra L.* (Россия, «Лесная линия», г. Чебоксары, ИП Азмуханов Э.Г.). Экстракция проводилась согласно ОФС 1.4.1.0021 питьевой водой (ГОСТ 32220–2013) [11, 12].

Для оптимизации параметров экстракции применяли метод Бокса-Бенкена с тремя факторами на трех уровнях [13]. В качестве независимых переменных (факторов) выбраны:

- x_1 – продолжительность экстракции (60, 90, 120 мин);
- x_2 – гидромодуль (1:10, 1:20, 1:30);
- x_3 – температура экстракции (50, 60, 70 °C).

В качестве откликов (зависимых переменных) определены показатели качества экстракта:

- Y_1 – антиоксидантная активность по методу DPPH (АОА, %);
- Y_2 – содержание общих фенольных соединений (ОФС, мг галловой кислоты / г сырья);
- Y_3 – выход сухого вещества (СВ, %).

План эксперимента включал 15 опытов, в том числе 3 повторения в центральной точке для оценки воспроизводимости результатов (таблица 1). Каждый из опытов повторялся трёхкратно.

Антиоксидантную активность (АОА) определяли спектрофотометрическим методом по способности экстрактов ингибировать стабильный радикал, используя 2,2 – дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH, Sigma-Aldrich США) [4]

Содержание общих фенольных соединений (ОФС) определяли спектрофотометрическим методом с реактивом Фолина-Чокалтеу (АО "ЛенРеактив", Россия) и построением калибровочной по галловой кислоте (Sigma-Aldrich, США) согласно ГОСТ Р ИСО 14502–1–2010 [14]. Содержание общих фенолов в экстрактах выражали в миллиграммах эквивалента галловой кислоты на 1 г сырья (мг ГК/г).

Выход сухих веществ (СВ) определяли гравиметрическим методом, высушивая аликвоты экстракта до постоянной массы при температуре 105 °C по ГОСТ 15113.4–2021 и выражали в процентах к массе исходного сырья [15].

Таблица 1.

План эксперимента по экстракции биологически активных веществ из корня солодки методом Бокса-Бенкена

Table 1.

Experiment plan for extracting biologically active substances from licorice root using the Box-Benken method

Опыт Test	Факторы Factors			Продолжительность, мин Duration, min	Гидромодуль Hydromodule	Температура, °С Temperature, °С
	x_1	x_2	x_3			
1	0	0	0	90	1:20	60
2	0	0	0	90	1:20	60
3	0	0	0	90	1:20	60
4	0	1	1	90	1:30	70
5	0	-1	-1	90	1:10	50
6	0	1	-1	90	1:30	50
7	0	-1	1	90	1:10	70
8	-1	1	0	60	1:30	60
9	-1	-1	0	60	1:10	60
10	-1	0	1	60	1:20	70
11	-1	0	-1	60	1:20	50
12	1	-1	0	120	1:10	60
13	1	1	0	120	1:30	60
14	1	0	1	120	1:20	70
15	1	0	-1	120	1:20	50

Примечание: факторы: x_1 – продолжительность экстракции; x_2 – гидромодуль; x_3 – температура экстракции. Кодированные значения факторов: -1 (нижний уровень), 0 (центральный уровень), +1 (верхний уровень).

Note: factors: x_1 – extraction duration; x_2 – hydromodule; x_3 – extraction temperature. Coded factor values: -1 (lower level), 0 (central level), +1 (upper level).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом множественной регрессии с использованием полиномиальной модели второго порядка. Адекватность полученных моделей оценивали по коэффициенту детерминации (R^2) и критерию Фишера. Статистически незначимые коэффициенты исключали из уравнений регрессии. Обработка произведена с помощью Python 3.12.12.

Результаты

По составленной матрице эксперимента по Боксу-Бенкену проведена серия экспериментов по экстракции биологически активных веществ из корня солодки. В каждом из полученных экстрактов определены антиоксидантная активность (АОА), содержание общих фенольных соединений (ОФС), выход сухих веществ (СВ). Результаты показателей отображены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты определения показателей качества в экстрактах корня солодки

Table 2.

Results of determining quality indicators in licorice root extracts

Опыт Test	Факторы Factors			Антиоксидантная активность (АОА), % Free radical scavenging activity (FRSA), %	Общие фенольные соединения (ОФС), мг ГК/г Total phenolic compounds (TPC), mg GA/g	Сухие вещества (СВ), % Dry matter (DM), %
	XI	X2	X3			
1	0	0	0	2,5	10,05	1,4
2	0	0	0	2,3	9,85	1,45
3	0	0	0	2,4	10,1	1,35
4	0	1	1	2,1	11,45	1,05
5	0	-1	-1	13,5	6,02	2,75
6	0	1	-1	3,8	13,38	0,95
7	0	-1	1	9,2	8,82	2,4
8	-1	1	0	4,1	10,51	0,75
9	-1	-1	0	14,8	6,69	2,95
10	-1	0	1	8,9	8,08	1,25
11	-1	0	-1	6,6	8,32	1,1
12	1	-1	0	16,4	7,48	3,05
13	1	1	0	5,4	12,72	1,15
14	1	0	1	3,3	9,71	1,65
15	1	0	-1	4,8	8,69	1,35

Примечание: факторы: x_1 – продолжительность экстракции; x_2 – гидромодуль; x_3 – температура экстракции. Кодированные значения факторов: -1 (нижний уровень), 0 (центральный уровень), +1 (верхний уровень).

Note: factors: x_1 – extraction duration; x_2 – hydromodule; x_3 – extraction temperature. Coded factor values: -1 (lower level), 0 (central level), +1 (upper level).

На основе экспериментальных данных, представленных в таблице 2, методом множественной регрессии получены полиномиальные уравнения второго порядка, описывающие зависимость откликов от варьируемых факторов.

Полное уравнение регрессии для антиоксидантной активности (Y_1) представлено в формуле (1). После исключения статистически незначимых коэффициентов получено редуцированное уравнение (2).

$$Y_1 = 2,4000 - 0,5625\,x_1 - 4,8125x_2 - 0,6500x_3 + \\ +3,2625x_1^2 + 4,5125\,x_2^2 + 0,2375x_3^2 - \\ -0,0750\,x_1x_2 + 0,9500x_1x_3 + 0,6500x_2x_3 \quad (1)$$

$$Y_1 = 2,40 - 4,79x_2 + 3,21x_1^2 + 4,46x_2^2 \quad (2)$$

где Y_1 – антиоксидантная активность, x_1 – продолжительность экстракции; x_2 – гидромодуль; x_3 – температура экстракции.

Анализ регрессии показывает, что антиоксидантная активность экстрактов солодки (Y_1) определяется исключительно гидромодулем (x_2). Отрицательный линейный коэффициент (-4,79) и положительный квадратичный коэффициент (+4,46) указывают на наличие экстремума – минимума антиоксидантной активности при средних значениях гидромодуля (1:20). Экспериментально максимальная антиоксидантная активность (16,4 %) достигнута при следующих условиях: продолжительность экстракции 120 мин, гидромодуль 1:10, температура 60 °С. Высокая антиоксидантная активность (14,20 %) также наблюдалась в опыте при продолжительности экстракции 60 мин, гидромодуле 1:10 и температуре 60 °С.

Таким образом, для достижения высокой антиоксидантной активности рекомендуется использовать минимальный гидромодуль (1:10), что обеспечивает более концентрированные экстракты. Температура экстракции в исследованном диапазоне не оказывает статистически значимого влияния на данный показатель.

Уравнение регрессии для содержания общих фенольных соединений (Y_2) представлено в формуле (3). После исключения статистически незначимых коэффициентов получено редуцированное уравнение (4).

$$Y_2 = 10,00 + 0,63\,x_1 + 2,38x_2 + 0,21x_3 - \\ -0,93x_1^2 + 0,28x_2^2 - 0,37x_3^2 + 0,36x_1x_2 + \\ +0,32x_1x_3 - 1,18x_2x_3 \quad (3)$$

$$Y_2 = 10,00 + 0,63\,x_1 + 2,38x_2 - 0,93x_1^2 - \\ -0,37x_3^2 + 0,36x_1x_2 + 0,32x_1x_3 - 1,18x_2x_3 \quad (4)$$

где Y_2 – содержание общих фенольных соединений, x_1 – продолжительность экстракции; x_2 – гидромодуль; x_3 – температура экстракции.

Содержание общих фенольных соединений (Y_2) зависит от продолжительности экстракции (x_1), гидромодуля (x_2), а также температуры экстракции (x_3) и их взаимодействия согласно уравнению. Положительный коэффициент (+0,63) свидетельствует о том, что увеличение времени экстракции способствует более полному извлечению фенольных соединений. Положительный коэффициент (+2,38) указывает на благоприятное влияние увеличения гидромодуля (большего количества экстрагента). Отрицательный коэффициент взаимодействия (-1,18) свидетельствует о том, что эффект гидромодуля зависит от температуры: при высоких значениях обоих факторов содержание фенолов снижается. Экспериментально максимальное содержание фенольных соединений (13,38 мг ГК/г) было получено при продолжительности экстракции 90 мин, гидромодуле 1:30 и температуре 50 °С.

Полное уравнение регрессии для выхода сухого вещества (Y_3) представлено в формуле (5). После исключения статистически незначимых коэффициентов получено редуцированное уравнение (6).

$$Y_3 = 1,40 + 0,14\,x_{-1} - 0,91x_2 + 0,03x_3 + \\ +0,06x_1^2 + 0,51x_2^2 - 0,13x_3^2 + 0,08x_1x_2 + \\ +0,04x_1x_3 + 0,11x_2x_3 \quad (5)$$

$$Y_3 = 1,40 - 0,91\,x_2 + 0,51x_2^2 \quad (6)$$

где Y_3 – выход сухого вещества, x_1 – продолжительность экстракции; x_2 – гидромодуль; x_3 – температура экстракции.

Выход сухого вещества (Y_3), аналогично антиоксидантной активности, определяется главным образом гидромодулем. Отрицательный линейный коэффициент (-0,91) и положительный квадратичный коэффициент (+0,51) также указывают на параболическую зависимость с минимумом при средних значениях гидромодуля. Экспериментально максимальный выход сухого вещества (3,05 %) был достигнут при продолжительности экстракции 120 мин, гидромодуле 1:10 и температуре 60 °С – тех же условиях, что обеспечили максимальную антиоксидантную активность. Высокий выход сухих веществ (2,95 %) также был получен при продолжительности экстракции 60 мин, гидромодуле 1:10, температуре 60 °С. Использование малого гидромодуля (1:10) приводит к получению более концентрированных экстрактов с высоким содержанием сухих веществ, что экономически выгодно для дальнейшей технологической переработки.

Анализ полученных математических моделей показывает, что оптимальные условия для различных целевых показателей совпадают не полностью. Для максимизации антиоксидантной активности и выхода сухого вещества: гидромодуль 1:10, продолжительность экстракции 120 мин, температура 60 °С, при этом максимизация содержания фенольных соединений происходит при гидромодуле 1:30, продолжительности экстракции 90 мин и температуре (50 °С).

Если приоритетом является получение экстрактов с высокой антиоксидантной активностью, что наиболее важно для фармацевтического применения, оптимальными можно считать следующие параметры: продолжительность экстракции 120 мин, гидромодуль: 1:10, температура: 60 °С. При указанных условиях прогнозируемые значения откликов составляют: антиоксидантная активность ≈ 15–16 %, содержание общих фенольных соединений ≈ 12 мг ГК/г, выход сухих веществ ≈ 3 %.

Обсуждение

Применение метода планирования эксперимента по Боксу-Бенкену позволило установить количественные зависимости между параметрами экстракции и показателями качества экстрактов корня солодки. Полученные результаты согласуются с общими закономерностями процессов экстракции растительного сырья.

Выявленное доминирующее влияние гидромодуля на антиоксидантную активность и выход сухого вещества объясняется тем, что при малом соотношении сырье-экстрагент создается более высокий градиент концентрации — движущая сила массопереноса, что способствует интенсификации процесса. Одновременно малый объем экстрагента приводит к получению более концентрированных растворов.

Положительное влияние времени экстракции на содержание фенольных соединений соответствует кинетике процесса массопереноса: увеличение продолжительности контакта сырья с экстрагентом способствует более полному извлечению целевых компонентов. Однако отсутствие значимого влияния продолжительности экстракции на антиоксидантную активность может быть связано с тем, что наиболее активные антиоксиданты извлекаются уже на начальных стадиях процесса.

Взаимодействие гидромодуля и температуры (отрицательный коэффициент в уравнении 4) указывает на возможность термической деградации или окисления части фенольных соединений при высоких температурах в разбавленных экстрактах.

Заключение

Проведена оптимизация процесса извлечения биологически активных веществ из корня солодки методом планирования эксперимента по Боксу-Бенкену с тремя факторами (продолжительность экстракции, гидромодуль, температура). Полученные математические модели описывают зависимость антиоксидантной активности, содержания общих фенольных соединений и выхода сухих веществ от параметров экстракции, а также могут использоваться для прогнозирования свойств экстракта в зависимости от технологических параметров его получения.

Установлено, что наибольшее влияние на антиоксидантную активность и выход сухих веществ оказывает гидромодуль (соотношение сырье-экстрагент). Минимальный гидромодуль (1:10) обеспечивает максимальные значения этих показателей. Содержание общих фенольных соединений зависит от времени экстракции, гидромодуля и взаимодействия гидромодуля с температурой, при этом увеличение времени до 120 мин способствует более полному извлечению фенолов.

Определены оптимальные параметры экстракции для получения продуктов с максимальной антиоксидантной активностью: продолжительность экстракции 120 мин, гидромодуль 1:10, температура 60 °С. При данных условиях антиоксидантная активность составляет 16,4 %, содержание фенольных соединений – 7,48 мг ГК/г, выход сухого вещества – 3,05 %.

Полученные математические модели могут быть использованы для прогнозирования свойств экстрактов в исследованном диапазоне факторов. Однако для экстраполяции за пределы изученной области необходимы дополнительные эксперименты.

Практическая значимость результатов заключается в возможности целенаправленного управления процессом экстракции для получения стандартизованных экстрактов корня солодки с контролируемыми антиоксидантными свойствами и содержанием биологически активных веществ. Для фармацевтического применения рекомендуются условия, обеспечивающие максимальную антиоксидантную активность, тогда как для пищевой промышленности может быть предпочтительна максимизация содержания фенольных соединений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИРМА № 625108, Университет ИТМО.

Литература

1 Samani B.H., Sharifi A., Jamshidi-kia F. et al. Advanced extraction of Glycyrrhiza glabra root extract using a combined ultrasonic and cold plasma reactor // Scientific Reports. 2025. V. 15. Art. 9994. doi: 10.1038/s41598-025-94781-w

2 Ciganović P., Jakimiuk K., Tomczyk M., Zovko Končić S. Glycerolic licorice extracts as active cosmeceutical ingredients: extraction optimization, chemical characterization, and biological activity // Antioxidants. 2024. V. 8. № 10. Art. 445. doi: 10.3390/antiox8100445

3 Liang Y., Wen Q., Yang Z. et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of glycyrrhizic acid and glabridin from Glycyrrhiza glabra L. using response surface methodology and development of a green analytical method // Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2024. V. 37. Art. 101385. doi: 10.1016/j.scp.2023.101385

4 Semenescu I., Avram S., Similie D. et al. Phytochemical, antioxidant, antimicrobial and safety profile of Glycyrrhiza glabra L. extract obtained from Romania // Plants. 2024. V. 13. № 23. Art. 3265. doi: 10.3390/plants13233265

5 Yin H., Zhang Y., Hu T. et al. Optimization of cellulase-assisted extraction of total flavonoids via response surface methodology based on antioxidant activity // Processes. 2023. V. 11. № 7. Art. 1978. doi: 10.3390/pr11071978

6 Abdelrahman A.M.E., Babiker E.E., Al-Juhaimi F.Y. et al. Response surface methodology optimization of microwave and pulsed electric field pretreatments for enhancing bioactive properties of licorice stem powder // LWT – Food Science and Technology. 2025. Art. 118282. doi: 10.1016/j.lwt.2025.118282

7 Ayanglaa N.W., Kumara V., Guptab R.C. et al. Response surface methodology and artificial neural network modelling for optimization of solid-liquid extraction and rapid HPTLC analysis of glycyrrhizin in Glycyrrhiza glabra root // South African Journal of Botany. 2022. V. 148. P. 11–20. doi: 10.1016/j.sajb.2022.03.045

8 Qin R., Song J., Wang Q. et al. Optimal extraction of antioxidants, flavonoids, and phenolic acids from the leaves of Apocynum venetum L. by response surface methodology with integrated chemical profiles and bioactivity evaluation // Molecules. 2025. V. 30. № 19. Art. 4006. doi: 10.3390/molecules30194006

9 Mašković J.M., Jakovljević V., Živković V. et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolics from Satureja hortensis L. and antioxidant activity: response surface methodology approach // Processes. 2024. V. 12. № 9. Art. 2042. doi: 10.3390/pr12092042

10 Xiang Q., Wang J., Tao K. et al. Optimization of phenolic-enriched extracts from olive leaves via ball milling-assisted extraction using response surface methodology // Molecules. 2024. V. 29. № 15. Art. 3658. doi: 10.3390/molecules29153658

11 ОФС.1.4.1.0021. Экстракты // Государственная фармакопея Российской Федерации. XV изд. М., 2023.

12 Страшко Н.И. Проблемы бутилированной питьевой воды в России // Актуальные проблемы социально-экономического развития общества: сб. тр. по мат. V Национальной науч.-практ. конф. Керчь, 2023. С. 151–154.

13 Cocîrlea M.D., Simionescu N., Călin T. et al. Box–Behnken Design-Based Optimization of Extraction Parameters of Phenolics, Antioxidant Activity, and In Vitro Bioactive and Cytotoxic Properties of Rhus typhina Fruits // Applied Sciences. 2024. V. 14. № 23. Art. 11096. doi: 10.3390/app142311096

14 Пасичник Е.Ю., Цветов Н.С. Особенности применения методов определения общего содержания биологически активных веществ (полифенолов и флавоноидов, общей антиоксидантной активности) в присутствии глубоких эвтектических растворителей // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. № 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-metodov-opredeleniya-obschego-soderzhaniya-biologicheski-aktivnyh-veschestv-polifenolov-i-flavonoidov (дата обращения: 06.02.2026).

15 Mauer L.J. Moisture and Total Solids Analysis // Ismail B.P., Nielsen S.S. (eds) Nielsen's Food Analysis. Food Science Text Series. Cham: Springer, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-50643-7_15

16 Chen X., Cui W.Q., Zhang Y. et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction of glabridin and isoliquiritigenin from Glycyrrhiza glabra: Optimization, extraction mechanism and in vitro bioactivities // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. V. 83. Art. 105946. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105946

17 Karaogul E., Nedjip G. RSM-Based Optimization of Bioactive Extraction and Characterization from Olea europaea Leaves: Antioxidant and Phenolic Profile by LC–MS/MS // Food Analytical Methods. 2025. V. 18. P. 776–797. doi: 10.1007/s12161-024-02734-2

18 Zhang Q., Liu N., Zhou Q. et al. Optimization of Total Triterpenoids Extraction from Red Beet (Beta vulgaris L.) Using Response Surface Methodology and Evaluation of Their Antioxidant Activity // Sugar Tech. 2025. V. 27. P. 2000–2012. doi: 10.1007/s12355-025-01634-x

19 Aydar A.Y., Aydın T., Karabaş E. et al. Optimizing freeze-drying parameters for enhanced bioactive compound encapsulation in olive seed extracts // Journal of Food Measurement and Characterization. 2026. V. 20. P. 918–930. doi: 10.1007/s11694-025-03696-7

20 Turgay Ö., Çelik E., Güler N., Akgönen Ş. Application of Box-Behnken Experimental Design Method in Licorice Extraction // Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi. 2024. V. 17. Özel Sayı (1). P. 45–50. doi: 10.47027/duvetfd.1486962

References

1 Samani B.H., Sharifi A., Jamshidi-kia F. et al. Advanced extraction of Glycyrrhiza glabra root extract using a combined ultrasonic and cold plasma reactor. Scientific Reports. 2025. vol. 15. article 9994. doi: 10.1038/s41598-025-94781-w.

2 Ciganović P., Jakimiuk K., Tomczyk M., Zovko Končić S. Glycerolic licorice extracts as active cosmeceutical ingredients: extraction optimization, chemical characterization, and biological activity. Antioxidants. 2024. vol. 8. no. 10. article 445. doi: 10.3390/antiox8100445.

3 Liang Y., Wen Q., Yang Z. et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of glycyrrhizic acid and glabridin from Glycyrrhiza glabra L. using response surface methodology and development of a green analytical method. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2024. vol. 37. article 101385. doi: 10.1016/j.scp.2023.101385.

4 Semenescu I., Avram S., Similie D. et al. Phytochemical, antioxidant, antimicrobial and safety profile of Glycyrrhiza glabra L. extract obtained from Romania. Plants. 2024. vol. 13. no. 23. article 3265. doi: 10.3390/plants13233265.

5 Yin H., Zhang Y., Hu T. et al. Optimization of cellulase-assisted extraction of total flavonoids via response surface methodology based on antioxidant activity. Processes. 2023. vol. 11. no. 7. article 1978. doi: 10.3390/pr11071978.

6 Abdelrahman A.M.E., Babiker E.E., Al-Juhaimi F.Y. et al. Response surface methodology optimization of microwave and pulsed electric field pretreatments for enhancing bioactive properties of licorice stem powder. LWT – Food Science and Technology. 2025. article 118282. doi: 10.1016/j.lwt.2025.118282.

7 Ayanglaa N.W., Kumara V., Guptab R.C. et al. Response surface methodology and artificial neural network modelling for optimization of solid-liquid extraction and rapid HPTLC analysis of glycyrrhizin in Glycyrrhiza glabra root. South African Journal of Botany. 2022. vol. 148. pp. 11–20. doi: 10.1016/j.sajb.2022.03.045.

8 Qin R., Song J., Wang Q. et al. Optimal extraction of antioxidants, flavonoids, and phenolic acids from the leaves of Apocynum venetum L. by response surface methodology with integrated chemical profiles and bioactivity evaluation. Molecules. 2025. vol. 30. no. 19. article 4006. doi: 10.3390/molecules30194006.

9 Mašković J.M., Jakovljević V., Živković V. et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolics from Satureja hortensis L. and antioxidant activity: response surface methodology approach. Processes. 2024. vol. 12. no. 9. article 2042. doi: 10.3390/pr12092042.

10 Xiang Q., Wang J., Tao K. et al. Optimization of phenolic-enriched extracts from olive leaves via ball milling-assisted extraction using response surface methodology. Molecules. 2024. vol. 29. no. 15. article 3658. doi: 10.3390/molecules29153658.

11 OFS.1.4.1.0021. Extracts. In: State Pharmacopoeia of the Russian Federation. XV ed. Moscow, 2023. (in Russian).

12 Strashko N.I. Problems of Bottled Drinking Water in Russia. In: Current Problems of Socio-Economic Development of Society: Collection of Works based on the Materials of the V National Scientific and Practical Conference. Kerch, 2023. pp. 151–154. (in Russian).

13 Cocîrlea M.D., Simionescu N., Călin T. et al. Box–Behnken Design-Based Optimization of Extraction Parameters of Phenolics, Antioxidant Activity, and In Vitro Bioactive and Cytotoxic Properties of Rhus typhina Fruits. Applied Sciences. 2024. vol. 14. no. 23. article 11096. doi: 10.3390/app142311096.

14 Pasichnik E.Yu., Tsvetov N.S. Features of the Application of Methods for Determining the Total Content of Biologically Active Substances (Polyphenols and Flavonoids, Total Antioxidant Activity) in the Presence of Deep Eutectic Solvents. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences. 2022. no. 1. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-metodov-opredeleniya-obschego-soderzhaniya-biologicheski-aktivnyh-veschestv-polifenolov-i-flavonoidov (accessed: 06.02.2026) (in Russian).

15 Mauer L.J. Moisture and Total Solids Analysis. In: Ismail B.P., Nielsen S.S. (eds.) Nielsen's Food Analysis. Food Science Text Series. Cham: Springer, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-50643-7_15.

16 Chen X., Cui W.Q., Zhang Y. et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction of glabridin and isoliquiritigenin from Glycyrrhiza glabra: Optimization, extraction mechanism and in vitro bioactivities. Ultrasonics Sonochemistry. 2022. vol. 83. article 105946. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105946.

17 Karaogul E., Nedjip G. RSM-Based Optimization of Bioactive Extraction and Characterization from Olea europaea Leaves: Antioxidant and Phenolic Profile by LC–MS/MS. Food Analytical Methods. 2025. vol. 18. pp. 776–797. doi: 10.1007/s12161-024-02734-2.

18 Zhang Q., Liu N., Zhou Q. et al. Optimization of Total Triterpenoids Extraction from Red Beet (Beta vulgaris L.) Using Response Surface Methodology and Evaluation of Their Antioxidant Activity. Sugar Tech. 2025. vol. 27. pp. 2000–2012. doi: 10.1007/s12355-025-01634-x.

19 Aydar A.Y., Aydın T., Karabaş E. et al. Optimizing freeze-drying parameters for enhanced bioactive compound encapsulation in olive seed extracts. Journal of Food Measurement and Characterization. 2026. vol. 20. pp. 918–930. doi: 10.1007/s11694-025-03696-7.

20 Turgay Ö., Çelik E., Güler N., Akgönen Ş. Application of Box-Behnken Experimental Design Method in Licorice Extraction. Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi. 2024. vol. 17. Özel Sayı (1). pp. 45–50. doi: 10.47027/duvetfd.1486962.

Сведения об авторах

Камиль Р. Баязитов аспирант, факультет биотехнологий, ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Кронверкский пр., д. 49, лит. А., г. Санкт-Петербург, 197101, Россия, kamilbayazitov037@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-8424-1053

Наталья В. Яковченко к.т.н., доцент, факультет биотехнологий, ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Кронверкский пр., д. 49, лит. А., г. Санкт-Петербург, 197101, Россия, nviakovchenko@itmo.ru
https://orcid.org/0000-0002-5188-5916

Мария А. Анцыперова к.т.н., доцент, факультет биотехнологий, ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Кронверкский пр., д. 49, лит. А., г. Санкт-Петербург, 197101, Россия, antsyperova@itmo.ru
https://orcid.org/0009-0004-0005-6597

Information about authors

Kamil R. Bayazitov PhD Student, Faculty of Biotechnology, ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia, kamilbayazitov037@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-8424-1053

Natalia V. Iakovchenko Cand. Sci. (Engin.), associate professor, Faculty of Biotechnology, ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia, nviakovchenko@itmo.ru
https://orcid.org/0000-0002-5188-5916

Mariia A. Antsyperova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, Faculty of Biotechnology, ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russia, antsyperova@itmo.ru
https://orcid.org/0009-0004-0005-6597

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 25/12/2025	**После редакции** 18/01/2026	**Принята в печать** 20/02/2026
Received 25/12/2025	**Accepted in revised** 18/01/2026	**Accepted** 20/02/2026

DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-176-183 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.858:66.061 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Оптимизация ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений из ягод облепихи (*Hippophae rhamnoides L.*) методом Бокса-Бенкена

Максим С. Иванов [1] msivanov@itmo.ru 0009-0000-5754-5026
Наталья В. Яковченко [1] nviakovchenko@itmo.ru 0000-0002-5188-5916
Евгения В. Кравцова [1] evkravtcova@itmo.ru 0000-0003-1393-3347
Валерий А. Ширяев [2] valryshirbox@gmail.com 0009-0005-4007-7795

1 Университет ИТМО, улица Ломоносова, д. 9, г. Санкт-Петербург, 192002, Россия

Аннотация. Облепиха *(Hippophae rhamnoides L.)* является ценным источником биологически активных веществ, в том числе фенольных соединений с выраженной антиоксидантной активностью. Целью исследования являлась оптимизация параметров ультразвуковой водной экстракции ягод облепихи для максимизации выхода фенольных соединений и антиоксидантной активности с использованием метода планирования эксперимента Бокса-Бенкена. В качестве независимых переменных выбраны температура экстракции (50–90 °С), время ультразвуковой обработки сонотродом (0–5 мин в рамках 45 мин общего времени экстракции) и гидромодуль (1:10–1:30). Оценивались три отклика: антирадикальная активность IC50, общее содержание фенольных соединений (ОСФС) по методу Фолина-Чокальтеу и содержание сухих веществ СВ (%). Проведено 15 экспериментов, включая три повтора в центральной точке. Разработаны математические модели второго порядка с высокими коэффициентами детерминации (R^2 = 0.898 для IC50, R^2 = 0.983 для ОСФС, R^2 = 0.889 для СВ). Установлено, что температура экстракции оказывает значимое положительное влияние на IC50 (-2,45) и на ОСФС (+3.74). А гидромодуль на СВ – отрицательное влияние (-1,11). Время ультразвуковой обработки статистически незначимо влияло на все исследуемые отклики. Определены оптимальные параметры: для максимизации FRSA — температура 90 °С, гидромодуль 1:12–15 (прогноз IC50 ≈ 5,4–7,6); для максимизации ОСФС – температура 90 °С, гидромодуль 1:30 (прогноз ТРС ≈ 22 мг ГК/г). Разработанные модели могут применяться для промышленного получения экстрактов облепихи с заданными свойствами.

Ключевые слова: облепиха (Hippophae rhamnoides L.), фенольные соединения, ультразвуковая экстракция, сонотрод, оптимизация, метод Бокса-Бенкена, антиоксидантная активность, DPPH, планирование эксперимента.

Optimization of ultrasound aqueous extraction of phenolic compounds from sea buckthorn berries (*Hippophae rhamnoides L.*) using Box-Behnken design

Maksim S. Ivanov [1] msivanov@itmo.ru 0009-0000-5754-5026
Natalia V. Iakovchenko [1] nviakovchenko@itmo.ru 0000-0002-5188-5916
Evgeniya V. Kravtcova [1] evkravtcova@itmo.ru 0000-0003-1393-3347
Valerii A. Shiriaev [2] valryshirbox@gmail.com 0009-0005-4007-7795

1 ITMO University, 9 Lomonosov Street, Saint Petersburg, 192002, Russia

Abstract. Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides L.*) is a valuable source of bioactive compounds, including phenolic compounds with pronounced antioxidant activity. The aim of this study was to optimize ultrasound-assisted aqueous extraction parameters from sea buckthorn berries to maximize phenolic compounds yield and antioxidant activity using Box-Behnken experimental design. Extraction temperature (50–90 °C), ultrasonic treatment time with sonotrode (0–5 min within 45 min total extraction time), and liquid-to-solid ratio (1:10–1:30) were selected as independent variables. Three responses were evaluated: free radical scavenging activity FRSA (%), total phenolic content TPS by Folin-Ciocalteu method, and dry matter content DM (%). Fifteen experiments were conducted, including three replicates at the center point. Second-order mathematical models with high determination coefficients were developed (R^2 = 0.898 for IC50, R^2 = 0.983 for TPC, R^2 = 0.889 for DM). It was established that extraction temperature has a significant positive effect on IC50 (-2,45), and TPC (+3.74). As for liquid-to-solid ratio – negative effect (-1,11). Ultrasound treatment time had no statistically significant effect on all studied responses. Optimal parameters were determined: for IC50 miniization – temperature 90 °C, liquid-to-solid ratio 1:12–15 (predicted FRSA ≈ 5,4–7,6); for TPC maximization – temperature 50 °C, liquid-to-solid ratio 1:30 (predicted TPS ≈ 22 mg GAE/g). The developed models can be applied for industrial production of sea buckthorn extracts with specified properties

Keywords: sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.), phenolic compounds, ultrasound-assisted extraction, sonotrode, optimization, Box-Behnken design, antioxidant activity, DPPH, experimental design.

Для цитирования
Иванов М.С., Яковченко Н.В., Кравцова Е.В., Ширяев В.А. Оптимизация ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений из ягод облепихи (*Hippophae rhamnoides L.*) методом Бокса-Бенкена // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 176–183. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-176-183

For citation
Ivanov M.S., Iakovchenko N.V., Kravtcova E.V., Shiriaev V.A., Optimization of ultrasound aqueous extraction of phenolic compounds from sea buckthorn berries (*Hippophae rhamnoides L.*) using Box-Behnken design. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 176–183. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-176-183

© 2026, Иванов М.С. и др. / Ivanov M.S. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Облепиха крушиновидная (*Hippophae rhamnoides L.*) является одним из наиболее ценных видов дикорастущих плодово-ягодных растений, распространённых в умеренном климате Евразии. Ягоды облепихи содержат широкий спектр биологически активных веществ, включая витамины, каротиноиды, органические кислоты, флавоноиды и другие фенольные соединения [1, 2, 20]. Фенольные соединения облепихи проявляют выраженную антиоксидантную, противовоспалительную и антимикробную активность, что определяет перспективность их использования в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности [3, 4].

Плоды облепихи характеризуются высоким содержанием органических кислот, которые влияют на вкус, стабильность и состав экстрактов [21].

В настоящее время актуальной задачей является разработка эффективных технологий извлечения биологически активных веществ из растительного сырья. Традиционные методы экстракции часто характеризуются низкой эффективностью, длительностью процесса и высокими энергозатратами [5]. Ультразвуковая экстракция (УЗ-экстракция) является перспективной альтернативой традиционным методам, поскольку позволяет интенсифицировать процесс массообмена за счёт явления акустической кавитации [2, 6, 7]. При схлопывании кавитационных пузырьков возникают локальные зоны высокого давления и температуры, что приводит к разрушению клеточных стенок растительного сырья и ускорению диффузии целевых компонентов в экстрагент [8].

Перспективным направлением является также вовлечение в переработку побочных продуктов (шрота, жома и вегетативных частей) с целью расширения сырьевой базы и повышения ресурсной эффективности технологий [22].

Wu и соавт. [1] показали, что выбор растворителя и условий экстракции существенно влияет на фенольный профиль и антиоксидантную активность экстрактов облепихи. Sanwal и соавт. [11] оптимизировали параметры ультразвуковой экстракции масла из семян облепихи, продемонстрировав возможность повышения выхода биологически активных веществ. Hosni и соавт. [10] применили метод Бокса-Бенкена для оптимизации УЗ-экстракции антиоксидантов из *Melastoma malabathricum*, достигнув значительного увеличения выхода фенольных соединений.

Метод поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) является эффективным статистическим инструментом для оптимизации многофакторных процессов [15, 16, 19]. Планирование эксперимента по Боксу-Бенкену позволяет минимизировать число опытов при построении адекватных математических моделей, описывающих влияние технологических факторов на целевые показатели [15, 16].

Несмотря на значительное число работ, посвящённых экстракции биологически активных веществ из облепихи, в литературе недостаточно представлены комплексные исследования по оптимизации параметров ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений с применением погружных ультразвуковых излучателей (сонотродов). Водная экстракция является более безопасной, экологичной и экономически целесообразной альтернативой использованию органических растворителей, особенно для пищевых применений [17].

Цель работы – оптимизация параметров ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений из ягод облепихи с использованием сонотрода методом планирования эксперимента Бокса-Бенкена

Материалы и методы

Материалы исследования. В качестве объекта исследования использовали ягоды облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides L.*) урожая 2024 года. Ягоды были собраны в стадии полной зрелости, промыты фильтрованной водой, высушены и измельчены до размера частиц 2–3 мм.

Планирование эксперимента. Для оптимизации процесса экстракции применяли метод планирования эксперимента Бокса-Бенкена с тремя факторами на трёх уровнях. В качестве независимых переменных были выбраны:

- x_1 – температура экстракции, °C (50, 70, 90);
- x_2 – время ультразвуковой обработки сонотродом, мин (0, 2.5, 5);
- x_3 – гидромодуль, соотношение вода: сырьё (1:10, 1:15, 1:30).

Общее время экстракции составляло 45 минут. Ультразвуковая обработка проводилась в начале процесса в течение заданного времени, после чего экстракция продолжалась при постоянном перемешивании.

Матрица планирования включала 15 экспериментов: 12 факторных точек и 3 повтора в центре плана для оценки ошибки эксперимента.

Методика экстракции. Навеску измельчённых ягод облепихи помещали в стеклянный стакан объёмом 250 мл, добавляли дистиллированную воду в соответствии с заданным гидромодулем. Ультразвуковую обработку проводили погружной ультразвуковой установкой (И100–6/4 (производитель ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ», Россия) при заданной температуре и времени обработки. После ультразвуковой

обработки экстракцию продолжали при постоянном перемешивании на магнитной мешалке до достижения общего времени 45 минут. По окончании процесса экстракт охлаждали, фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента» и доводили объём до метки дистиллированной водой.

Определение общего содержания фенольных соединений (ОСФС). Определение проводили по методу Фолина-Чокальтеу в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14502–1–2010. К 1 мл разбавленного раствора экстракта добавляли 5 мл 10% реактива Фолина–Чокальтеу (разбавленного 1:9). Через 3–8 мин добавляли 4 мл 7.5% раствора карбоната натрия и выдерживали в темноте в течение 60 мин при комнатной температуре. Оптическую плотность измеряли при длине волны 765 нм на спектрофотометре. Калибровочный график строили по раствору галловой кислоты (0.5 мг/мл). Результаты выражали в мг эквивалента галловой кислоты на г навески сырья (мг ГК/г) [5].

Определение содержания сухих веществ (СВ) Содержание сухих веществ определяли гравиметрическим методом путём высушивания навески экстракта массой 5 г при температуре 105 °С до постоянной массы. Результаты выражали в процентах.

Определение антирадикальной активности методом DPPH (IC50). Антирадикальную активность определяли по способности экстрактов ингибировать стабильный радикал 2,2 – дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH). К 0.05 мл образца добавляли 3.95 мл раствора DPPH в метаноле (0.1 мг/мл) в пробирке. Через 60 мин инкубации при комнатной температуре измеряли оптическую плотность при длине волны 518 нм. Контрольную пробу готовили аналогично, заменяя образец на метанол. Измерения проводили в трёх повторностях [12].

$$FRSA = \frac{A_{DPPH} - A_{\text{образец}}}{A_{DPPH}} \times 100\% \qquad (1)$$

где A_{DPPH} – оптическая плотность контрольного раствора DPPH; $A_{образец}$ – оптическая плотность раствора с образцом.

Для определения значения IC50 производились измерения FRSA в 5 точках для построения калибровочного графика.

Для описания зависимости откликов от факторов использовали полиномиальные модели второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} b_{ij} x_i x_j \qquad (2)$$

Расчёт коэффициентов регрессии и оценку адекватности моделей проводили с использованием программного обеспечения Python. Качество моделей оценивали по коэффициенту детерминации R^2 и скорректированному R^2.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлена матрица планирования эксперимента с экспериментальными значениями откликов.

Таблица 1.

План эксперимента и экспериментальные значения откликов

Table 1.

Experimental design and response values

Опыт Test	XI: Температура, °С Temperature °C	X2: УЗ (мин) US (min)	X3: Гидромодуль (1:Y) Solid-to-liquid ratio (1:Y)	XI	X2	X3	IC50, мг/мл mg/ml	СВ,% DM. %	ОСФС, мг ГК/г навески TPC, mg GAE/g
1	50	0	15	-1	-1	0	11,8	1,95	14,2
2	90	0	15	1	-1	0	7,2	2,25	20,5
3	50	5	15	-1	1	0	12,5	2,45	13,5
4	90	5	15	1	1	0	5,4	1,95	21,8
5	50	2,5	10	-1	0	-1	12,1	3,15	13,8
6	90	2,5	10	1	0	-1	7,6	3,85	20,9
7	50	2,5	30	-1	0	1	11,2	0,75	14,6
8	90	2,5	30	1	0	1	7,8	1,15	22,8
9	70	0	10	0	-1	-1	11,9	2,95	15,2
10	70	5	10	0	1	-1	11,4	2,9	15,8
11	70	0	30	0	-1	1	10,2	0,85	17,3
12	70	5	30	0	1	1	10,8	1,2	18,5
13 (Ц)	70	2,5	15	0	0	0	11,2	2,05	16,1
14 (Ц)	70	2,5	15	0	0	0	10,95	1,95	15,9
15 (Ц)	70	2,5	15	0	0	0	11,1	2	16

На основе экспериментальных данных построены редуцированные математические модели (после исключения незначимых членов).

Модель для антирадикальной активности (IC50):

$$Y_{IC50} = 11,08 - 2,45x_1 - 0,13x_2 - 0,38x_3 - 1,63x_1^2$$
$$-0,23x_2^2 + 0,22x_3^2 - 0,63x1x2 + 0,28x_1x_3 + 0,28x_2x_3$$
$$Y_{IC50} = 11,08 - 2,45x_1 - 1,63x_1^2$$
$$R^2 = 0,964; R^2_{adj} = 0,898$$

Температура экстракции (x_1) оказывает решающее влияние на антиоксидантную способность: коэффициент – 2,45 указывает на то, что при повышении температуры значение IC50 интенсивно снижается, что эквивалентно росту активности экстракта. Наличие значимого отрицательного квадратичного эффекта ($x_1^2 = -1,63$, $p = 0,006$) свидетельствует о нелинейном характере зависимости: при приближении к 90 °C скорость улучшения показателя возрастает. Факторы времени ультразвуковой обработки (x_2) и гидромодуля (x_3) в данных условиях оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$).

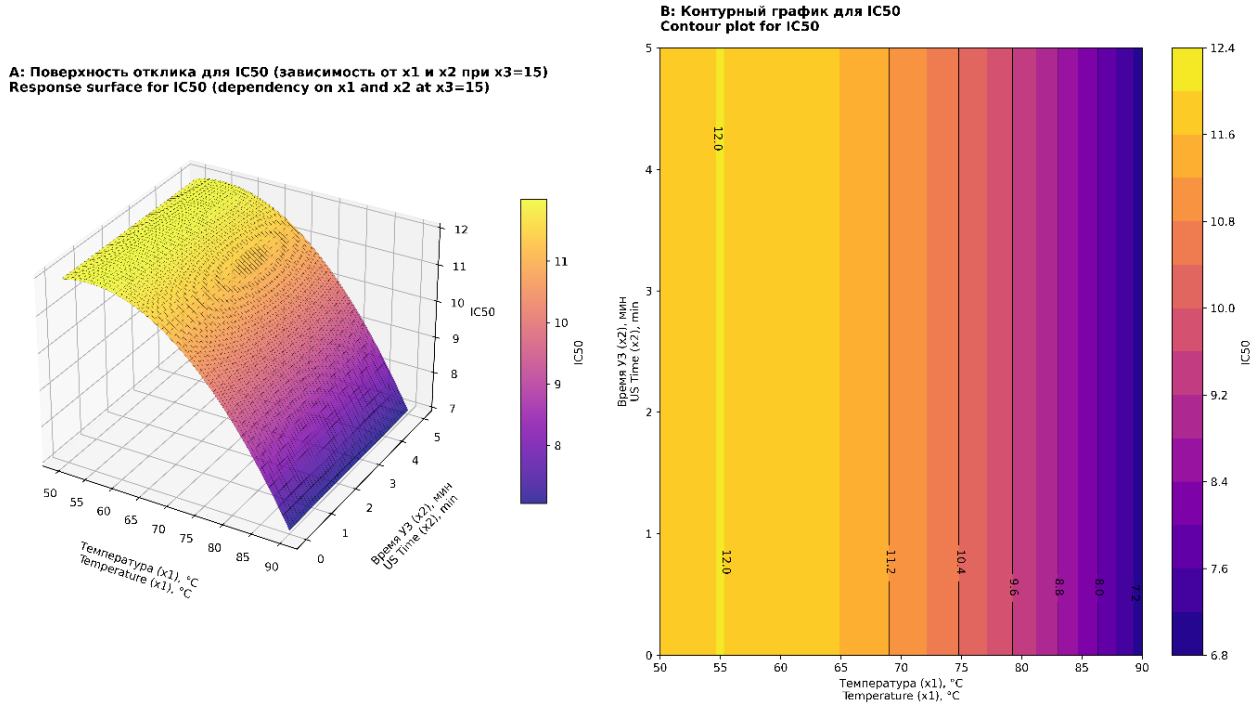


Рисунок 1. Поверхность отклика и контурный график для IC50 (зависимость от x1 и x2 при x3 = 15)
Figure 1. Response surface and contour plot for IC50 (dependence on x1 and x2 at x3 = 15)

Модель для общего содержания фенольных соединений (ТРС):

$$Y_{TPC} = 16,00 + 3,74x_1 + 0,30x_2 + 0,94x_3 + 1,41x_1^2$$
$$+0,09x2^2 + 0,61x3^2 + 0,50x_1x_2 + 0,28x_1x_3 + 0,15x_2x_3$$
$$Y_{TPC} = 16,00 + 3,74x_1 + 0,94x_3 + 1,41x_1^2 + 0,61x_3^2$$
$$R^2 = 0,994; R^2_{adj} = 0,983$$

На выход полифенольных соединений статистически значимое влияние оказывают температура (x_1) и гидромодуль (x_3). Температура является доминирующим фактором (линейный эффект +3,74). Гидромодуль также вносит значимый положительный вклад (+0,94, $p = 0,001$). Обе зависимости носят выраженный криволинейный характер, о чем свидетельствуют положительные квадратичные коэффициенты (x_1^2 и x_3^2). Это указывает на ускорение экстракции при переходе к верхним границам факторов. В отличие от предыдущих моделей, время ультразвуковой обработки (x_2) здесь близко к порогу значимости ($p = 0,089$), однако формально считается незначимым. Эффекты взаимодействия между факторами не выявлены.

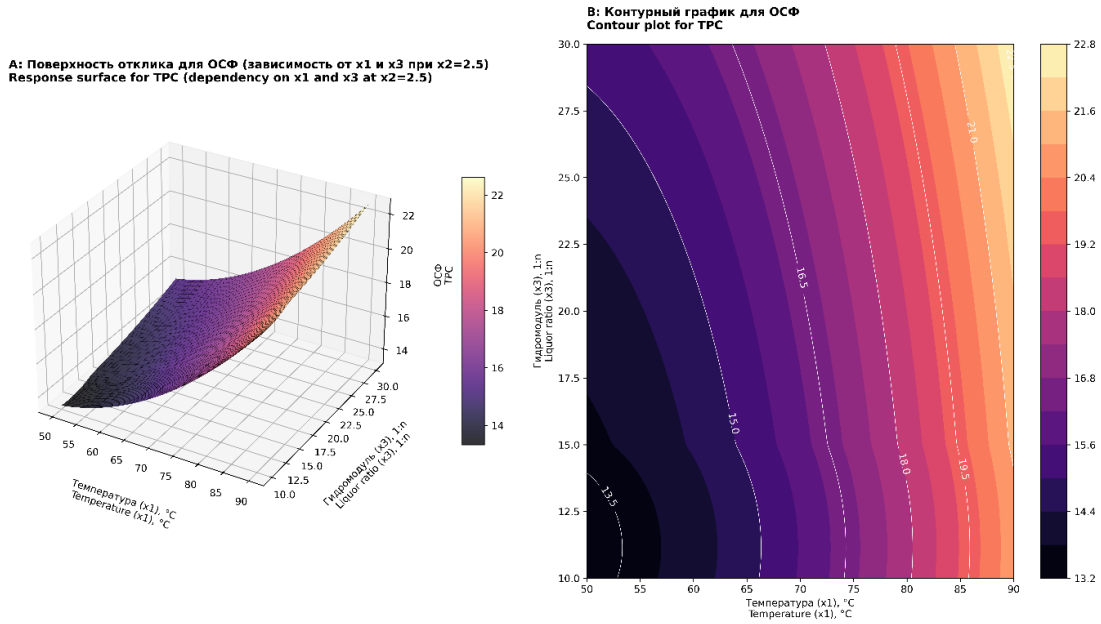


Рисунок 2. Поверхность отклика и контурный график для ОСФС (зависимость от x1 и x3 при x2 = 2.5)
Figure 2. Response surface and contour plot for OSF (dependence on x1 and x3 at x2 = 2.5)

Модель для содержания сухих веществ (СВ):

$$Y_{DM} = 2,00 + 0,11x_1 + 0,06x_2 - 1,11x_3 + 0,20x_1^2 - $$
$$-0,05x_2^2 + 0,03x_3^2 - 0,20x_1x_2 - 0,08x_1x_3 + 0,10x_2x_3$$

$$Y_{DM} = 2,00 - 1,11x_3$$

$$R^2 = 0,960; R^2_{adj} = 0,889$$

Содержание сухих веществ в данной системе практически полностью определяется гидромодулем (x_3). Отрицательный коэффициент (-1,11) при высокой значимости ($p < 0,001$) подтверждает действие эффекта разбавления: увеличение объема растворителя закономерно снижает концентрацию сухих веществ. Все остальные факторы (температура и время УЗ) и их взаимодействия статистически незначимы ($p > 0,05$). Модель обладает высокой предсказуемостью ($R^2 = 0,960$), описывая процесс как строго линейный.

В таблице 2 приведены оптимальные значения факторов для различных критериев оптимизации.

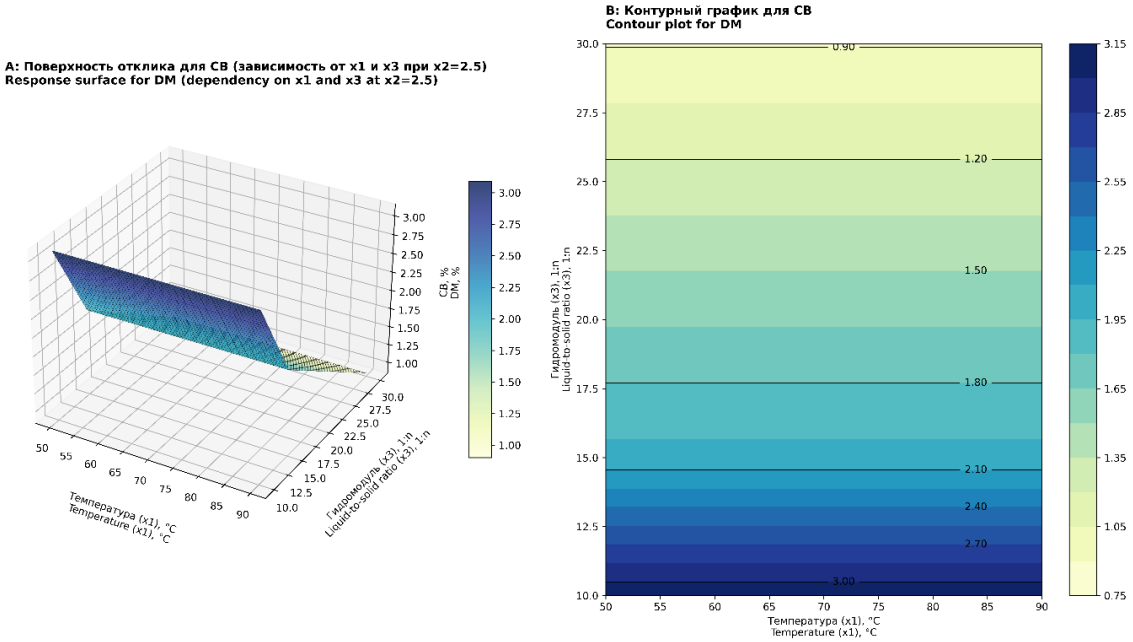


Рисунок 3. Поверхность отклика и контурный график для СВ (зависимость от x1 и x3 при x2 = 2.5)
Figure 3. Response surface and contour plot for SV (dependence on x1 and x3 at x2 = 2.5)

Таблица 2.

Оптимальные параметры экстракции

Table 2.

Optimal extraction parameters

Критерий	Температура, °C	Время УЗ, мин	Гидромодуль	Прогноз
Criterion	Temperature, °C	US time, min	Ratio	Prediction
Минимум IC50 / Min IC50	90	любое / any	1:12–15	IC50 ≈ 5,4 – 7,6
Максимум TPS / Max TPS	90	любое / any	1:30	ОСФС ≈ 22 мг ГК/г
Максимум СВ / Max DM	90	любое / any	1:10	СВ ≈ 2.2%
Компромисс / Compromise	90	0–2.5	1:15–20	IC50 ≈ 10, ОСФС ≈ 16 мг ГК/г

Полученные результаты согласуются с данными литературы о влиянии температуры на эффективность экстракции фенольных соединений. Wu и соавт. [1] при оптимизации экстракции облепихи также установили положительное влияние температуры на антиоксидантную активность. В нашем исследовании повышение температуры от 50 до 90 °C снижает IC50 примерно на 39%.

Важным результатом является установление статистической незначимости времени ультразвуковой обработки для всех откликов. Это согласуется с данными Hosni и соавт. [10], показавших, что при УЗ-экстракции 80% целевых соединений извлекается в первые минуты обработки. Отсутствие значимого эффекта времени УЗ может быть объяснено тем, что даже кратковременное воздействие сонотрода достаточно для разрушения клеточных структур, а дальнейшее увеличение времени не повышает выход целевых компонентов.

Выявлен конфликт оптимумов для IC50 и ОСФС: максимальная антирадикальная активность достигается при более низком гидромодуле, тогда как максимальное содержание фенолов – при более высоком гидромодуле. Это требует выбора приоритетного критерия или использования компромиссного режима в зависимости от целевого назначения экстракта.

Адекватность разработанных моделей подтверждается значениями R^2 = 0.889–0.983. По данным литературы [15] отмечают, что значения $R^2adj > 0.70$ свидетельствуют о хорошей предсказательной способности модели.

Водная экстракция с применением сонотрода является перспективной для производства пищевых продуктов, поскольку исключает использование органических растворителей и позволяет сократить время обработки [17, 18].

Заключение

1. Разработаны адекватные математические модели второго порядка, описывающие зависимость антирадикальной активности IC50 (R^2 = 0.898), общего содержания фенольных соединений ОСФС (R^2 = 0.983) и содержания сухих веществ DM (R^2 = 0.889) от параметров экстракции.

2. Установлено, что температура экстракции является наиболее значимым фактором для IC50 (-2,45) и для ОСФС (+3,74). Время ультразвуковой обработки сонотродом в диапазоне 0–5 мин статистически незначимо для всех откликов.

3. Определены оптимальные параметры: для максимизации антирадикальной активности – температура 90 °C, гидромодуль 1:12–15 (IC50 ≈ 5,4 – 7,6); для максимизации выхода фенольных соединений – температура 90 °C, гидромодуль 1:30 (ОСФС ≈ 22 мг ГК/г).

4. Незначимость времени УЗ-обработки позволяет минимизировать энергозатраты производства без снижения качества экстракта.

Литература

1 Wu D., Yang Z., Li J. et al. Optimizing the solvent selection of the ultrasound-assisted extraction of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) pomace: phenolic profiles and antioxidant activity // Foods. 2024. V. 13. № 3. P. 482. doi: 10.3390/foods13030482

2 Singh B., Oberoi S., Kaur A. Phenolic compounds in sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) and their health-promoting activities: a review // International Journal of Food Science & Technology. 2024. V. 59. P. 3145–3162. doi: 10.1111/ijfs.17143

3 He Q., Yang K., Wu X. et al. Phenolic compounds, antioxidant activity and sensory evaluation of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) leaf tea // Food Science & Nutrition. 2022. V. 10. № 12. P. 4258–4270. doi: 10.1002/fsn3.3155

4 Luntraru C., Apostol L., Oprea O. et al. Reclaim and valorization of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides) by-products: antioxidant activity and chemical characterization // Foods. 2022. V. 11. № 3. P. 462. doi: 10.3390/foods11030462

5 Lawag I., Nolden E.S., Schaper A.A.M. et al. A modified Folin–Ciocalteu assay for the determination of total phenolics content in honey // Applied Sciences. 2023. V. 13. № 4. P. 2135. doi: 10.3390/app13042135

6 Radulescu C., Olteanu R., Stihi C. et al. Chemometric assessment of spectroscopic techniques and antioxidant activity for Hippophae rhamnoides L. extracts // Analytical Letters. 2020. V. 53. № 8. P. 1201–1220. doi: 10.1080/00032719.2019.1590379

7 Naseem Z., Hanif M., Zahid M. et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent-based extraction of phytochemicals from Mentha arvensis // Biomass Conversion and Biorefinery. 2023. V. 13. P. 9361–9373. doi: 10.1007/s13399-021-01617-4

8 Brzezińska R., Górska A., Wirkowska-Wojdyła M., Piasecka I. Response surface methodology as a tool for optimization of extraction process of bioactive compounds from spent coffee grounds // Applied Sciences. 2023. V. 13. № 13. P. 7634. doi: 10.3390/app13137634

9 Rodrigues R.P., Sousa A.M., Gando-Ferreira L., Quina M. Grape pomace as a natural source of phenolic compounds: solvent screening and extraction optimization // Molecules. 2023. V. 28. № 6. P. 2715. doi: 10.3390/molecules28062715

10 Hosni K., Hassen I., Sebei H. Optimization of ultrasound-assisted extraction of antioxidant compounds from plant materials using Box–Behnken design // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. V. 72. P. 105417. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105417

11 Sanwal S., Rai N., Buragohain J. Ultrasound-assisted extraction of oil from sea buckthorn seeds: process optimization and quality evaluation // Journal of Food Process Engineering. 2021. V. 44. № 9. P. e13768. doi: 10.1111/jfpe.13768

12 Chen Y., Wang L., Li S. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from plant matrices: recent advances and challenges // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. V. 84. P. 105952. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105952

13 Kowalska H., Czajkowska K., Cichowska J., Lenart A. What's new in biorefinery of agricultural wastes? // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 110. P. 1–13. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.035

14 Тринеева О.В. Биологически активные вещества плодов облепихи крушиновидной (Hippophae rhamnoides L.) при хранении с применением различных способов консервации // Хранение и переработка сельхозсырья. 2022. № 1. С. 32–54. doi: 10.36107/spfp.2022.269

15 Петров С.М., Филатов С.Л., Михайличенко М.С., Подгорнова Н.М. Интенсификация производства пектина из свекловичного жома с помощью ультразвуковой и микроволновой экстракции // Системы и средства биотехнологии. 2024. № 1. С. 13–17. doi: 10.20914/2304-4691-2024-1-13-17

16 Ковалёва Н.А., Тринеева О.В., Чувикова И.В., Дьякова Н.А. Применение ультразвуковой экстракции для выделения флавоноидов из листьев облепихи крушиновидной (Hippophae rhamnoides L.) // Биофармацевтический журнал. 2024. Т. 16. № 1. С. 12–18. doi: 10.30906/2073-8099-2024-16-1-12-18

17 Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G. et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products: mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications // Green Extraction of Natural Products. Elsevier, 2024. P. 257–292. doi: 10.1016/B978-0-12-821884-6.00012-7

18 Еремеева Н.Б., Макарова Н.В. Изучение содержания антиоксидантов и их активности в концентрированных экстрактах ягод клюквы, облепихи, ежевики, калины и рябины // Химия растительного сырья. 2021. № 4. С. 157–164. doi: 10.14258/jcprm.2021049365

19 Тринеева О.В., Рудая М.А. Комплексное исследование профиля свободных органических кислот плодов облепихи крушиновидной (Hippophae rhamnoides L.) различных сортов // Химия растительного сырья. 2021. № 4. С. 231–239. doi: 10.14258/jcprm.2021049215

20 Аверьянова Е.В., Школьникова М.Н., Рожнов Е.Д., Баташов Е.С. Биоконверсия облепихового шрота в физиологически активные ингредиенты // Химия растительного сырья. 2023. № 1. С. 297–305. doi: 10.14258/jcprm.20230111884

21 Aranda-Ledesma N.E., Aguilar-Zárate P., Bautista-Hernández I. et al. The optimization of ultrasound-assisted extraction for bioactive compounds from Flourensia cernua and Jatropha dioica and the evaluation of their functional properties // Horticulturae. 2024. V. 10. № 7. P. 709. doi: 10.3390/horticulturae10070709

22 Siddiqui S.A., Bahmid N.A., Taha A. et al. Factors affecting the extraction of (poly)phenols from plant matrices and recent advances in ultrasound-assisted extraction: a critical review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2025. doi: 10.1080/10408347.2023.2266846

References

1 Wu D., Yang Z., Li J. et al. Optimizing the solvent selection of the ultrasound-assisted extraction of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) pomace: phenolic profiles and antioxidant activity. Foods. 2024. vol. 13. no. 3. article 482. doi: 10.3390/foods13030482.

2 Singh B., Oberoi S., Kaur A. Phenolic compounds in sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) and their health-promoting activities: a review. International Journal of Food Science & Technology. 2024. vol. 59. pp. 3145–3162. doi: 10.1111/ijfs.17143.

3 He Q., Yang K., Wu X. et al. Phenolic compounds, antioxidant activity and sensory evaluation of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) leaf tea. Food Science & Nutrition. 2022. vol. 10. no. 12. pp. 4258–4270. doi: 10.1002/fsn3.3155.

4 Luntraru C., Apostol L., Oprea O. et al. Reclaim and valorization of sea buckthorn (Hippophae rhamnoides) by-products: antioxidant activity and chemical characterization. Foods. 2022. vol. 11. no. 3. article 462. doi: 10.3390/foods11030462.

5 Lawag I., Nolden E.S., Schaper A.A.M. et al. A modified Folin–Ciocalteu assay for the determination of total phenolics content in honey. Applied Sciences. 2023. vol. 13. no. 4. article 2135. doi: 10.3390/app13042135.

6 Radulescu C., Olteanu R., Stihi C. et al. Chemometric assessment of spectroscopic techniques and antioxidant activity for Hippophae rhamnoides L. extracts. Analytical Letters. 2020. vol. 53. no. 8. pp. 1201–1220. doi: 10.1080/00032719.2019.1590379.

7 Naseem Z., Hanif M., Zahid M. et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent-based extraction of phytochemicals from Mentha arvensis. Biomass Conversion and Biorefinery. 2023. vol. 13. pp. 9361–9373. doi: 10.1007/s13399-021-01617-4.

8 Brzezińska R., Górska A., Wirkowska-Wojdyła M., Piasecka I. Response surface methodology as a tool for optimization of extraction process of bioactive compounds from spent coffee grounds. Applied Sciences. 2023. vol. 13. no. 13. article 7634. doi: 10.3390/app13137634.

9 Rodrigues R.P., Sousa A.M., Gando-Ferreira L., Quina M. Grape pomace as a natural source of phenolic compounds: solvent screening and extraction optimization. Molecules. 2023. vol. 28. no. 6. article 2715. doi: 10.3390/molecules28062715.

10 Hosni K., Hassen I., Sebei H. Optimization of ultrasound-assisted extraction of antioxidant compounds from plant materials using Box–Behnken design. Ultrasonics Sonochemistry. 2021. vol. 72. article 105417. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105417.

11 Sanwal S., Rai N., Buragohain J. Ultrasound-assisted extraction of oil from sea buckthorn seeds: process optimization and quality evaluation. Journal of Food Process Engineering. 2021. vol. 44. no. 9. article e13768. doi: 10.1111/jfpe.13768.

12 Chen Y., Wang L., Li S. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from plant matrices: recent advances and challenges. Ultrasonics Sonochemistry. 2022. vol. 84. article 105952. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105952.

13 Kowalska H., Czajkowska K., Cichowska J., Lenart A. What's new in biorefinery of agricultural wastes? Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 110. pp. 1–13. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.035.

14 Trineeva O.V. Biologically Active Substances of Sea Buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) Fruits during Storage Using Various Preservation Methods. Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2022. no. 1. pp. 32–54. doi: 10.36107/spfp.2022.269 (in Russian).

15 Petrov S.M., Filatov S.L., Mikhailichenko M.S., Podgornova N.M. Intensification of Pectin Production from Beet Pulp Using Ultrasonic and Microwave Extraction. Systems and Means of Biotechnology. 2024. no. 1. pp. 13–17. doi: 10.20914/2304-4691-2024-1-13-17 (in Russian).

16 Kovaleva N.A., Trineeva O.V., Chuvikova I.V., Dyakova N.A. Application of Ultrasound Extraction for the Isolation of Flavonoids from Leaves of Sea Buckthorn (Hippophae rhamnoides L.). Biopharmaceutical Journal. 2024. vol. 16. no. 1. pp. 12–18. doi: 10.30906/2073-8099-2024-16-1-12-18 (in Russian).

17 Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G. et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products: mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. In: Green Extraction of Natural Products. Elsevier, 2024. pp. 257–292. doi: 10.1016/B978-0-12-821884-6.00012-7.

18 Eremeeva N.B., Makarova N.V. Study of the Content of Antioxidants and Their Activity in Concentrated Extracts of Cranberry, Sea Buckthorn, Blackberry, Viburnum and Rowan Berries. Chemistry of Plant Raw Materials. 2021. no. 4. pp. 157–164. doi: 10.14258/jcprm.2021049365 (in Russian).

19 Trineeva O.V., Rudaya M.A. Comprehensive Study of the Profile of Free Organic Acids of Sea Buckthorn (Hippophae rhamnoides L.) Fruits of Various Varieties. Chemistry of Plant Raw Materials. 2021. no. 4. pp. 231–239. doi: 10.14258/jcprm.2021049215 (in Russian).

20 Averyanova E.V., Shkolnikova M.N., Rozhnov E.D., Batashov E.S. Bioconversion of Sea Buckthorn Meal into Physiologically Active Ingredients. Chemistry of Plant Raw Materials. 2023. no. 1. pp. 297–305. doi: 10.14258/jcprm.20230111884 (in Russian).

21 Aranda-Ledesma N.E., Aguilar-Zárate P., Bautista-Hernández I. et al. The optimization of ultrasound-assisted extraction for bioactive compounds from Flourensia cernua and Jatropha dioica and the evaluation of their functional properties. Horticulturae. 2024. vol. 10. no. 7. article 709. doi: 10.3390/horticulturae10070709.

22 Siddiqui S.A., Bahmid N.A., Taha A. et al. Factors affecting the extraction of (poly)phenols from plant matrices and recent advances in ultrasound-assisted extraction: a critical review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2025. [Online first]. doi: 10.1080/10408347.2023.2266846.

Сведения об авторах

Максим С. Иванов, аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 192002, Россия, msivanov@itmo.ru
https://orcid.org/0009-0000-5754-5026
Наталья В. Яковченко к.т.н., факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 192002, Россия, nviakovchenko@itmo.ru
https://orcid.org/0000-0002-5188-5916
Евгения В. Кравцова к.т.н., факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Ломоносова, 9, г. ВСанкт-Петербург, 192002, Россия), evkravtcova@itmo.ru
https://orcid.org/0000-0003-1393-3347
Валерий А. Ширяев аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 192002, Россия, valryshirbox@gmail.com
https://orcid.org/0009-0005-4007-7795

Information about authors

Maksim S. Ivanov Postgraduate student, Faculty of Biotechnology, ITMO University, Lomonosova street 9, Saint Petersburg, 192002, Russia, msivanov@itmo.ru
https://orcid.org/0009-0000-5754-5026
Natalia V. Iakovchenko Cand. Sci. (Engin.), Faculty of Biotechnology, ITMO University, Lomonosova street 9, Saint Petersburg, 192002, Russia, nviakovchenko@itmo.ru
https://orcid.org/0000-0002-5188-5916
Evgeniya V. Kravtcova Cand. Sci. (Engin.), Faculty of Biotechnology, ITMO University, Lomonosova street 9, Saint Petersburg, 192002, Russia, evkravtcova@itmo.ru
https://orcid.org/0000-0003-1393-3347
Valerii A. Shiriaev Postgraduate student, Faculty of Biotechnology, ITMO University, Lomonosova street 9, Saint Petersburg, 192002, Russia, valryshirbox@gmail.com
https://orcid.org/0009-0005-4007-7795

Вклад авторов

Максим С. Иванов, сбор и первичная обработка экспериментальных данных; оформление таблиц/рисунков; написание первоначального текста рукописи, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Наталья В. Яковченко научное руководство; разработка методологии (выбор факторов, дизайн Бокса–Бенкена, план эксперимента); контроль корректности аналитических определений ОФСФ и антиоксидантной активности; интерпретация результатов; критическое редактирование рукописи

Евгения В. Кравцова консультация в ходе исследования, статистическая обработка результатов и валидация моделей (RSM, регрессионный анализ, проверка адекватности); программная реализация расчетов (Python); проверка воспроизводимости расчётов; редактирование текста, оформление рукописи под требования журнала

Валерий А. Ширяев написание манускрипта, редактура перед подачей, помощь в проведении анализов

Contribution

Maksim S. Ivanov data collection and primary processing of experimental results; preparation of tables/figures; drafting the initial version of the manuscript; revision of the manuscript prior to submission and taking responsibility for plagiarism.

Natalia V. Iakovchenko scientific supervision; methodology development (factor selection, Box–Behnken design, experimental plan); control of analytical procedures for TPC and antioxidant activity; results interpretation; critical review and editing.

Evgeniya V. Kravtcova Consultation during the study; statistical analysis of the results and model validation (RSM, regression analysis, adequacy assessment); software implementation of calculations (Python); verification of calculation reproducibility; text editing and manuscript formatting according to the journal requirements.

Valerii A. Shiriaev wrote the manuscript, correct it before submitting, assist in experiments

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/12/2025	**После редакции** 12/01/2026	**Принята в печать** 02/02/2026

Received 11/12/2025	**Accepted in revised** 12/01/2026	**Accepted** 02/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-184-191 Выберите тип статьи.
УДК 637.14:641 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка и исследование технологии творожного десерта

Наталья А. Черных	1	na.sarnitskaya@omgau.org	0000-0002-1614-5090
Наталья Б. Гаврилова	1	nb.gavrilova@omgau.org	0000-0001-8544-4214
Сергей А. Коновалов	1	sa.konovalov@omgau.org	0000-0003-3537-8081
Константин К. Полянский	2, 3	mto.vrn@mail.ru	0000-0002-8817-1466
Анна А. Дерканосова	2	aa-derk@ya.ru	0000-0002-9726-9262
Алиса А. Торшина	2	alislis.tor@ya.ru	0000-0003-3150-8686

1 Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
3 Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса. 67А. Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. В настоящее время в области разработки функциональных пищевых продуктов наблюдается устойчивая тенденция к применению натурального растительного сырья и ингредиентов, полученных в результате его переработки. Сочетание традиционного творожного продукта с ферментированными пшеничными отрубями и плодово-ягодным наполнителем представляет собой актуальное направление в области разработки специализированного питания. Это не только позволяет решить задачу обогащения пищевого рациона, но и отвечает на вызовы современного общества в области повышения качества питания, профилактики различных заболеваний, таких как ожирение, диабет, сердечно-сосудистые заболевания, связанные с несбалансированным питанием. Разработана рецептура творожного десерта с использованием ферментированных пшеничных отрубей и плодово-ягодного наполнителя. В качестве растительных ингредиентов использованы пшеничные отруби и плодово-ягодным наполнитель состоящий из яблок, клюквы и шиповника. Для устранения специфического отрубного вкуса и запаха проводили биотрансформацию пшеничных отрубей. После 5-ти часов биотрансформации пшеничных отрубей ферментными препаратами (ФП) Амилосубтилин, Глюкоаваморин, ЦеллоЛюкс А количество глюкозы в 1,5 раза выше по сравнении с нативными пшеничными отрубями. По результатам исследования физико-химических показателей установило, что в готовом продукте содержание влаги – 71,08 ± 0,20 %, сухих веществ – 28,72 ± 0,20 %, белка – 13,94 ± 0,25 %; жира – 3,49 ± 0,49 %; углеводов – 11,26 ± 0,50 %. Титруемая кислотность выработанного творожного десерта 244 °Т. Таким образом применение ферментированных пшеничных отрубей в творожном десерте позволяет нивелировать вкус, что улучшает не только органолептические свойствами, но и повышает его пищевую ценностью.

Ключевые слова: биотрансформация, пшеничные отруби, плодово-ягодный наполнитель, пребиотики, фортификация, творожный десерт, функциональные свойства..

Development and research of cottage cheese dessert technology

Natalia A. Chernykh	1	na.sarnitskaya@omgau.org	0000-0002-1614-5090
Natalia B. Gavrilova	1	nb.gavrilova@omgau.org	0000-0001-8544-4214
Sergey A. Konovalov	1	sa.konovalov@omgau.org	0000-0003-3537-8081
Konstantin K. Polyansky	2, 3	mto.vrn@mail.ru	0000-0002-8817-1466
Anna A. Derkanosova	2	aa-derk@ya.ru	0000-0002-9726-9262
Alisa A. Torshina	2	alislis.tor@ya.ru	0000-0003-3150-8686

1 Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Ploshchad, 1 str., Omsk, 644008, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
3 Voronezh Branch of the Plekhanov Russian University of Economics

Abstract. Currently, in the field of functional food products development, there is a steady trend towards the use of natural plant raw materials and ingredients obtained as a result of its processing. The combination of a traditional curd product with fermented wheat bran and fruit and berry filling is an urgent trend in the development of specialized nutrition. This not only allows us to solve the problem of enriching the diet, but also responds to the challenges of modern society in the field of improving the quality of nutrition, preventing various diseases such as obesity, diabetes, and cardiovascular diseases associated with an unbalanced diet. A recipe for a curd dessert using fermented wheat bran and fruit and berry filling has been developed. Wheat bran and a fruit and berry filling consisting of apples, cranberries and rosehips were used as vegetable ingredients. To eliminate the specific bran taste and odor, wheat bran was biotransformed. After 5 hours of biotransformation of wheat bran with enzyme preparations (AF) Amylosubtilin, Glucoavamorin, CelloLux A, the amount of glucose is 1.5 times higher compared to native wheat bran. According to the results of the study of physico-chemical parameters, it was found that the moisture content in the finished product was 71.08 ± 0.20%, dry matter – 28.72 ± 0.20%, protein – 13.94 ± 0.25%; fat – 3.49 ± 0.49%; carbohydrates – 11.26 ± 0.50%. The titrated acidity of the produced curd dessert is 244 °T. Thus, the use of fermented wheat bran in a curd dessert makes it possible to level the taste, which improves not only the organoleptic properties, but also increases its nutritional value.

Keywords: biotransformation, wheat bran, fruit and berry filler, prebiotics, fortification, cottage cheese dessert, functional properties..

Для цитирования
Черных Н.А., Гаврилова Н.Б., Коновалов С.А., Полянский К.К., Дерканосова А.А., Торшина А.А. Разработка и исследование технологии творожного десерта // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 184–191. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-184-191

For citation
Chernykh N.A., Gavrilova N.B., Konovalov S.A., Polyansky K.K., Derkanosova A.A., Torshina A.A. Development and research of cottage cheese dessert technology. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 184–191. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-184-191

© 2026, Черных Н.А. и др. / Chernykh N.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Анализируя современное развитие и спрос на продукты сбалансированного и специализированного питания прослеживается необходимость в биоактивных соединениях с низкой добавленной стоимостью для их обогащения [1]. Агропромышленный сектор сталкивается с образованием большого количества растительных отходов. Их вовлечение в новый производственный процесс снизит нагрузку на окружающую среду, а технологические инновации позволяют извлекать ценные биоактивные вещества для дальнейшего использования в пищевой промышленности, косметологии и других отраслях [2, 3, 4]. Интеграция этих соединений в функциональные продукты и нутрицевтики предоставляет возможность разработки технологии производства продуктов питания с повышенной пищевой ценностью, направленных на укрепление здоровья и предотвращение хронических заболеваний [5, 6, 7]. Соответственно растет спрос на здоровые и питательные продукты, в том числе и на десерты. Особое внимание уделяется продуктам с пониженным содержанием сахара, жира и добавлением растительных ингредиентов, обогащающих состав продукта полезными веществами.

В работе Т.В. Пилипенко изучены функциональные свойства растительных добавок: листьев грецкого ореха, ягод жимолости, плодов фейхоа, и их изменение после термической сушки и замораживании. По результатам исследования в молодых листьях грецкого ореха высокое содержание витамина С в сравнении с ягодами жимолости в 5,5 раз и плодов фейхоа в 28,5 раз, а также более чем в 35 раз выше содержание йода. После процесса замораживания и термической сушки образцов произошли потери витамина С и йода в 2,2 раза. На основании проведенных исследований был разработан молочный десерт с внесением в рецептуру листьев грецкого ореха и порошка жимолости для обогащения витаминами С, Р, йодом, калием, железом и профилактики йоддефицитных заболеваний [8].

На кафедре продуктов питания и пищевой биотехнологии учеными разработан молочный десерт с функциональными ингредиентами на основе сиропа дикорастущего растительного сырья, с внесением лактата железа, аскорбиновой кислоты, сорбито-паточного сиропа, агар-агара и подсластителя. Отмечено, что сиропы дикорастущих ягод содержащие аскорбиновую кислоту восстанавливает железо и образует с ним хелатные комплексы, повышая усвояемость железа. Использование ягод клюквы, черники, ежевики обогащается молочный десерт водорастворимыми витаминами, минеральными веществами, что повышает его пищевую ценность [9].

В исследовании биотехнологии творожного десерта с высокой пищевой ценностью и пребиотическими свойствами вносили инулин в гелеобразном виде, уменьшали содержание рецептурных компонентов сливок и сахара. Для предания натуральной сладости творожному десерту исследовали дозировки наполнителей (малина, вишня, черника) 5,0 %, 10,0%, 15,0 % и 20,0 %. По результатам органолептической оценки высший балл получили образцы с внесением 15,0 % наполнителя к массе творожного десерта Определено, что кисломолочный продукт с использованием продуктов переработки растительного сырья обеспечивает удовлетворение на 20 % в пищевых волокнах, в белке на 10,2 % от суточной нормы [10].

Использование инновационных методов переработки растительных отходов агропромышленного сектора позволит извлекать ценные соединения с высокой эффективностью. При этом важно учитывать особенности каждого вида растительных отходов, оптимизируя процессы экстракции и биотрансформации для максимальной пользы здоровья [11]. Биотрансформация с использованием ферментов и микроорганизмов открывает возможности для преобразования отходов в соединения с улучшенной биодоступностью и функциональными свойствами [12, 13, 14].

В связи с этим, актуальным становится использование побочных продуктов зерновой промышленности в качестве функциональных добавок в молочные продукты [15]. Такой подход не только расширяет ассортимент продукции с улучшенными потребительскими свойствами, но и способствует решению проблемы утилизации отходов производства, снижая нагрузку на окружающую среду и повышая рентабельность работы предприятий.

Целью данного исследования является разработка новой технологии производства творожного десерта, обогащенного растительными ингредиентами, и изучение его физико-химических свойств.

Материалы и методы

В экспериментальных исследованиях использованы следующие объекты молоко с м. д. ж. 1,8 % (ГОСТ 31658-2012), микробный сычужный фермент «Meito», мезофильная закваска MicroMilk ММ30, пробиотическая закваска «Бифидум Плюс», пшеничные отруби, ферментные препараты (ФП): Амилосубтилин, Глюкоаваморин, ЦеллоЛюкс А, плодово-ягодный наполнитель. Для получения биологически активной добавки в лабораторных условиях на кафедре продуктов питания и пищевой биотехнологии Омского ГАУ проводили биотрансформацию пшеничных отрубей.

Творожный десерт исследовали в научно-исследовательской лаборатории КемГУ (г. Кемерово). Общее содержание углеводов по ГОСТ 54667-2011. Аминокислотный состав (качественного и количественного) в рамках методики после предварительного кислотного гидролиза согласно ГОСТ 34132—2017. Определение водорастворимых витаминов по ГОСТ Р 55482-2013. Определение фракционного состава белка ОФС.1.2.1.0023.15. Методика экстрагирования жира ГОСТ 5867-2023, ГОСТ 13496.15-97. Методы определения содержания сырого жира». Количество глюкозы в процессе биотрансформации пшеничных отрубей определяли тест системой «Глюкоза-GOD» производства «Вектор-Бест». Кислотность творожного десерта определяли по ГОСТ Р 54669-2011. Массовую долю влаги творожного десерта определяли по ГОСТ 3626-73.

Результаты

При разработке творожного десерта с добавлением ферментированных пшеничных отрубей необходимо учитывать их влияние на технологические свойства продукта. Важно подобрать оптимальную концентрацию, чтобы сохранить консистенцию продукта и предотвратить отделение сыворотки.

Кроме того, необходимо учитывать органолептические особенности отрубей, специфический вкус и запах, которые могут негативно повлиять на восприятие продукта потребителем [12]. Для устранения специфического вкуса и аромата проводили биотрансформацию пшеничных отрубей. Процесс биотрансформации пшеничных отрубей ФП: Амилосубтилин 0,5 %, Глюкоаваморин 0,3%, ЦеллоЛюкс А 0,3 % к массе пшеничных отрубей, с гидромодулем - пшеничные отруби : вода, в соотношении 1 : 8 при температуре (55±2) °С исследовали по накоплению глюкозы в течение 6 часов (рисунок 1).

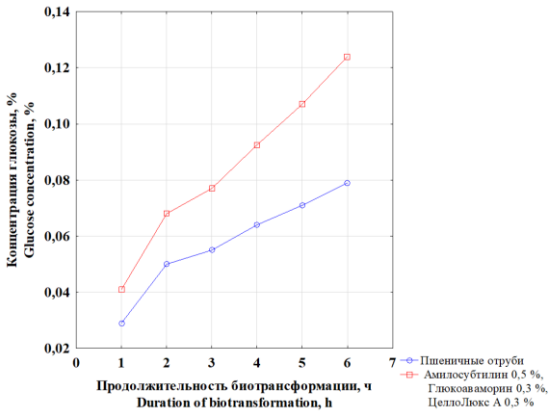


Рисунок 1. Изменение концентрации глюкозы в процессе биотрансформации пшеничных отрубей ФП Амилосубтилин 0,5 %, Глюкоаваморин 0,3%, ЦеллоЛюкс А 0,3 %

Figure 1. Changes in glucose concentration during biotransformation of wheat bran Amylosubtilin 0.5%, Glucoavamorin 0.3%, CelloLux A 0.3%

В результате биотрансформации пшеничных отрубей ФП Амилосубтилин, Глюкоаваморин, ЦеллоЛюкс А в течение 6 часов определено увеличение концентрации глюкозы в 1,5 раз в сравнении с нативными отрубями (рисунок 1). После проведения органолептической оценки отмечено смягчение вкуса пшеничных отрубей в результате биотрансформации.

Предварительное приготовление плодово-ягодного наполнителя включает сортировку, мойку, очищение от кожуры и семян, диспергирование яблок, клюквы, шиповника в вакуумном куттере и их термизацию при (75±2) °С с последующим охлаждением до (20±2) °С. После этого пюре ягод асептически вносят в творожный десерт, перемешивают и подают на фасование.

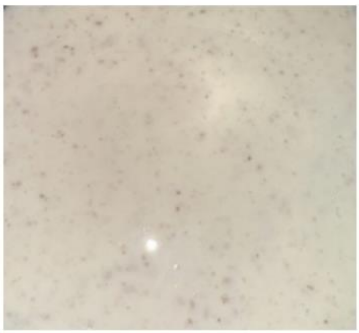
Содержащиеся в клюквенном пюре органические кислоты придают готовому продукту кисло-сладкий вкус, приятный аромат, кремовый цвет. Клюквенное пюре обладает функциональными свойствами, благодаря содержанию витамина С, флавоноидов, азотистых и дубильных веществ уменьшается окислительное повреждение структуры клеток, витаминов РР, К, В1, В2, микро- и макроэлементов, пектиновых веществ предотвращаются развитие хронических заболеваний, таких как сердечно-сосудистые заболевания, старение, диабет, воспаление, рак [16, 17].

В плодах шиповника содержатся такие биоактивные соединения, как витамины А, Е, группы В, жирные кислоты, а также особенно высокое содержание аскорбиновой кислоты и фенольных соединений, которые обладают антиоксидантной активностью [18, 19].

Яблочное пюре не только придает приятный сладковатый вкус фруктовому пюре, но и обладает легким профилактическим эффектом, снижая уровень холестерина и улучшая пищеварение, благодаря высокому содержанию пектина, клетчатки и витаминов С и группы В [20]. Для производства творожного десерта молоко с м.д.ж. 1,8 % очищали, нагревали до температуры (32±2) °С и вносили 3,0 % ферментированных пшеничные отруби к массе молока, перемешивая 5 минут.

После смесь пастеризовали при температуре (85±2) °С с выдержкой 20 секунд, далее смесь охлаждали до температуры заквашивания (30±2) °С и заквашивали мезофильной закваской MicroMilk ММ30 и пробиотической закваской «Бифидум Плюс», интенсивно перемешивали в течение 20 минут. В полученную смесь добавляли хлористый кальций и пепсин, перемешивали в течение 3 минут и отправляли на сквашивание. Окончание сквашивания определяли по кислотности сгустка, равной (71±2) °Т. Творожный сгусток отделяли от сыворотки самопрессованием до

массовой доли влаги, равной 80,0 %. Полученный творог смешивали в течение 10 минут с плодово-ягодным наполнителем в количестве 15,0 % к массе творога. Готовый творожный десерт фасовали, упаковывали и хранили при температуре (4±2) °С (рисунок 2).



Подготовленные компоненты смеси ингредиентов

Prepared ingredients of a mixture of ingredients



Сквашивание смеси ингредиентов

Fermentation of a mixture of ingredients



Творожный десерт

Cottage cheese dessert



Творожный десерт, обогащенный ферментированными пшеничными отрубями и плодово-ягодным наполнителем

Cottage cheese dessert enriched with fermented wheat bran and fruit and berry filling

Рисунок 2. Технологический процесс творожного десерта, обогащенного ферментированными пшеничными отрубями и плодово-ягодным наполнителем

Figure 2. Technological process of cottage cheese dessert enriched with fermented wheat bran and fruit and berry filling

Результаты исследования физико-химических показателей выработанного творожного десерта представлены в таблице 1.

В результате исследования химического состава творожного десерта, обогащенного ферментированными пшеничными отрубями и плодово-ягодным наполнителем (таблица 1), определено содержание влаги – 71,08 ± 0,20 %, сухих веществ – 28,72 ± 0,20 %, в том числе белка – 13,94 ± 0,25 %; жира – 3,49 ± 0,49 %; углеводов – 11,26 ± 0,50 %.

Данные таблицы 2 показывают, что творожный десерт, обогащенный ферментированными пшеничными отрубями и плодово-ягодным наполнителем содержит весь набор незаменимых аминокислот.

Таблица 1.

Физико-химические показатели творожного пастообразного продукта

Table 1.

Physico-chemical parameters of the curd paste product

Наименование образца Name of the sample	Массовая доля белка, % Mass fraction of protein, %	Массовая доля жира, % Mass fraction of fat, %	Массовая доля, углеводов % Mass fraction of carbohydrates %	Массовая доля влаги, % Mass fraction of moisture, %,	Кислотность, °Т Acidity, °Т
Творожный десерт, обогащенный ферментированными пшеничными отрубями и плодово-ягодным наполнителем Curd dessert enriched with fermented wheat bran and fruit and berry filler	13.94±0.25	3.49±0.49	11.26±0.50	71.08 ± 0.20	244

Таблица 2.

Компонентный состав основных аминокислот

Table 2.

The component composition of the main amino acids

Наименование АМК Naming of amino acids	Творожный десерт | Cottage cheese dessert
	мг/1г исходного образца mg/1g of the initial sample
Триптофан | Tryptophan	1,89
Глутаминовая кислота | Glutamic acid	4,35
Серин | Serin	3,73
Глицин | Glycine	5,35
Гистидин | Histidine	3,18
Глутамин | Glutamine	3,20
Аргинин | Arginine	4,23
Лизин | Lysine	1,91
Треанин | Treanin	1,40
Аланин | Alanine	5,52
Пролин | Proline	61,73
Аспарагин | Asparagine	3,70
Тирозин | Tyrosine	1,83
Цистеин | Cysteine	4,80
Метионин | Methionine	1,99
Валин | Valin	1,76
Цистин | Cystine	2,37
Изолейцин | Isoleucine	3,16
Лейцин | Leucine	4,59
Фенилаланин | Phenylalanine	6,23

Плодово-ягодный наполнитель, содержащий яблоки, клюкву и шиповник, придает творожному десерту кисло-сладкий вкус, характерный цвет и аромат благодаря высокому содержанию органических кислот. Такое сочетание компонентов в наполнителе так же значительно повышает в новом виде творожного десерта содержание витаминов С, РР, В6, В9 (таблица 3).

Таблица 3.

Качественное и количественное содержание водорастворимых витаминов (ГОСТ Р 55482-2013)

Table 3.

Qualitative and quantitative content of water-soluble vitamins (GOST R 55482-2013)

Наименование образца Name of the sample	Водорастворимые витамины, мг/100 г продукта Water-soluble vitamins, mg/100 g of product			
	PP	B_6	B_9	C
Творожный десерт, обогащенный ферментированными пшеничными отрубями и плодово-ягодным наполнителем Cottage cheese dessert enriched with fermented wheat bran and fruit and berry filling	5,68±1,10	2,44±0,80	0,90±0,31	2,77±1,10

Обсуждение

Результаты нашего исследования в сравнении с разработанным творожным десертом, обогащенным ягодным наполнителем и инулином [10], демонстрируют меньшее содержание массовой доли жира в 2,2 раза, увеличение содержания белков и углеводов в 1,5 и 1,3 раза соответственно.

Творожный десерт с использованием ферментированных пшеничных отрубей и плодово-ягодного наполнителя обеспечивает удовлетворение суточной потребности содержанием: белков на 13,6 %; пищевых волокон на 8,0 %; витаминов: B_6 на 100,0 %; РР на 37,9 %; ~~B9~~ на 112,5 %; С на 3,0 %, а также обогащает его минералами, природными биологически активными веществами, органическими кислотами.

Заключение

Таким образом при внесении в творожный десерт ферментированных пшеничных отрубей и плодово-ягодного наполнителя содержание водорастворимых витаминов составляет: РР – (5,68±1,10) мг/100 г; В6 – (2,44±0,80) мг/100 г; В9 – (0,90±0,31) мг/100 г; С – (2,77±1,10) мг/100 г, а также обогащает готовый продукт пищевыми волокнами, что расширяет линейку продуктов с функциональными свойствами.

Литература

1 Kurek M., Debeaufort F., Voilley A. Achievements in applications of antioxidants and bioactive compounds in food: from agriculture to health benefits // Antioxidants. 2024. V. 13. № 10. P. 1247. doi: 10.3390/antiox13101247

2 Celeiro M., Lončarić A. Plant bioactive compounds from agro-industrial by-products for improvement of nutritional quality of foods // Frontiers in Nutrition. 2024. V. 11. P. 1448549. doi: 10.3389/fnut.2024.1448549

3 Shawky E., Gibbons S., Selim D.A. Bio-sourcing from byproducts: A comprehensive review of bioactive molecules in Agri-Food Waste (AFW) Streams for valorization and sustainable applications // Bioresource Technology. 2025. V. 431. P. 132640. doi: 10.1016/j.biortech.2025.132640

4 Мезенова О.Я. Современная пищевая биотехнология: основные проблемы и вызовы // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 35–46. doi: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-35-46

5 Saini R.K., Khan M.I., Kumar V. et al. Bioactive compounds of agro-industrial by-products: current trends, recovery, and possible utilization // Antioxidants. 2025. V. 14. № 6. P. 650. doi: 10.3390/antiox14060650

6 Comunian T.A., Silva M.P., Souza C.J.F. The use of food by-products as a novel for functional foods: Their use as ingredients and for the encapsulation process // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 108. P. 269–280. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.003

7 Melini V., Melini F., Luziatelli F., Ruzzi M. Functional ingredients from agri-food waste: Effect of inclusion thereof on phenolic compound content and bioaccessibility in bakery products // Antioxidants. 2020. V. 9. № 12. P. 1216. doi: 10.3390/antiox9121216

8 Пилипенко Т.В., Рогинская Е.О. Разработка молочного десерта, обогащенного функциональными растительными добавками // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2018. Т. 6. № 1. С. 40–48. doi: 10.14529/food180105

9 Коновалов С.А., Гаврилова Н.Б., Полянский К.К. и др. Современная биотехнология производства молочного десерта с функциональными ингредиентами // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 1. С. 70–83. doi: 10.20914/2310-1202-2024-1-70-83

10 Боброва А.В., Ничипоренко А.А. Использование продуктов переработки растительного сырья в технологии творожного десерта // Молочнохозяйственный вестник. 2023. Т. 4. № 52. С. 153–165. doi: 10.52231/2225-4269_2023_4_153

11 Abbaspour N. Fermentation's pivotal role in shaping the future of plant-based foods: An integrative review of fermentation processes and their impact on sensory and health benefits // Applied Food Research. 2024. V. 4. № 2. P. 100468. doi: 10.1016/j.afres.2024.100468

12 Погорелова Н.А., Сарницкая Н.А., Нардин Д.С. Эффективность конверсии комплексом гидролитических ферментов биополимеров пшеничных отрубей // Химия растительного сырья. 2024. № 2. С. 340–354. doi: 10.14258/jcprm.20240213107

13 Погорелова Н.А., Гаврилова Н.Б. Конверсия пшеничных отрубей в целевые продукты биосинтеза // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 1. С. 49–59. doi: 10.21603/2074-9414-2023-1-2414

14 Погорелова Н.А., Гаврилова Н.Б., Рогачев Е.А., Щетинина Е.М. Определение эффективности способов конверсии пшеничных отрубей для использования их в технологии продуктов питания // Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 1. С. 48–57. doi: 10.36107/spfp.2020.228

15 Sirajuddin S., Masni M., Salam A. The level of preference of instant rice bran milk products innovation with various flavor variants as functional food // Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences. 2021. V. 9. № A. P. 567–571. doi: 10.3889/oamjms.2021.6469

16 Blumberg J.B., Camesano T.A., Cassidy A. et al. Cranberries and their bioactive constituents in human health // Advances in Nutrition. 2013. V. 4. № 6. P. 618–632. doi: 10.3945/an.113.004473

17 Лютикова М.Н., Ботиров Э.Х. Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы // Химия растительного сырья. 2015. № 2. С. 5–27. doi: 10.14258/jcprm.201502429

18 Živanović N., Božanić Tanjga B., Simin N. et al. In vitro functional properties of rosehips from 'Aurora' Edible Garden Rose's collection // Foods. 2024. V. 13. № 20. P. 3272. doi: 10.3390/foods13203272

19 Peña F., Valencia S., Tereucán G. et al. Bioactive compounds and antioxidant activity in the fruit of rosehip (Rosa canina L. and Rosa rubiginosa L.) // Molecules. 2023. V. 28. № 8. P. 3544. doi: 10.3390/molecules28083544

20 Волнин А.А., Мишуров А.В., Михина А.А. и др. Исследование аминокислотного состава кормовой добавки методом ионообменной хроматографии // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 1 (75). С. 199–205. doi: 10.20914/2310-1202-2018-1-199-205

21 Bourvellec C.L., Bouzerzour K., Ginies C. et al. Phenolic and polysaccharidic composition of applesauce is close to that of apple flesh // Journal of Food Composition and Analysis. 2011. V. 24. № 4–5. P. 537–547. doi: 10.1016/j.jfca.2010.12.012

References

1 Kurek M., Debeaufort F., Voilley A. Achievements in applications of antioxidants and bioactive compounds in food: from agriculture to health benefits. Antioxidants. 2024. vol. 13. no. 10. article 1247. doi: 10.3390/antiox13101247.

2 Celeiro M., Lončarić A. Plant bioactive compounds from agro-industrial by-products for improvement of nutritional quality of foods. Frontiers in Nutrition. 2024. vol. 11. article 1448549. doi: 10.3389/fnut.2024.1448549.

3 Shawky E., Gibbons S., Selim D.A. Bio-sourcing from byproducts: A comprehensive review of bioactive molecules in Agri-Food Waste (AFW) Streams for valorization and sustainable applications. Bioresource Technology. 2025. vol. 431. article 132640. doi: 10.1016/j.biortech.2025.132640.

4 Mezenova O.Ya. Modern Food Biotechnology: Main Problems and Challenges. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2023. no. 1. pp. 35–46. doi: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-35-46 (in Russian).

5 Saini R.K., Khan M.I., Kumar V. et al. Bioactive compounds of agro-industrial by-products: current trends, recovery, and possible utilization. Antioxidants. 2025. vol. 14. no. 6. article 650. doi: 10.3390/antiox14060650.

6 Comunian T.A., Silva M.P., Souza C.J.F. The use of food by-products as a novel for functional foods: Their use as ingredients and for the encapsulation process. Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 108. pp. 269–280. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.003.

7 Melini V., Melini F., Luziatelli F., Ruzzi M. Functional ingredients from agri-food waste: Effect of inclusion thereof on phenolic compound content and bioaccessibility in bakery products. Antioxidants. 2020. vol. 9. no. 12. article 1216. doi: 10.3390/antiox9121216.

8 Pilipenko T.V., Roginskaya E.O. Development of a Dairy Dessert Enriched with Functional Plant Additives. Bulletin of SUSU. Series: Food and Biotechnology. 2018. vol. 6. no. 1. pp. 40–48. doi: 10.14529/food180105 (in Russian).

9 Konovalov S.A., Gavrilova N.B., Polyansky K.K. et al. Modern Biotechnology for the Production of Dairy Dessert with Functional Ingredients. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 1. pp. 70–83. doi: 10.20914/2310-1202-2024-1-70-83 (in Russian).

10 Bobrova A.V., Nichiporenko A.A. The Use of Processed Plant Raw Materials in the Technology of Curd Dessert. Dairy Farming Bulletin. 2023. vol. 4. no. 52. pp. 153–165. doi: 10.52231/2225-4269_2023_4_153 (in Russian).

11 Abbaspour N. Fermentation's pivotal role in shaping the future of plant-based foods: An integrative review of fermentation processes and their impact on sensory and health benefits. Applied Food Research. 2024. vol. 4. no. 2. article 100468. doi: 10.1016/j.afres.2024.100468.

12 Pogorelova N.A., Sarnitskaya N.A., Nardin D.S. Conversion Efficiency of Wheat Bran Biopolymers by a Complex of Hydrolytic Enzymes. Chemistry of Plant Raw Materials. 2024. no. 2. pp. 340–354. doi: 10.14258/jcprm.20240213107 (in Russian).

13 Pogorelova N.A., Gavrilova N.B. Conversion of Wheat Bran into Target Biosynthesis Products. Technique and Technology of Food Production. 2023. vol. 53. no. 1. pp. 49–59. doi: 10.21603/2074-9414-2023-1-2414 (in Russian).

14 Pogorelova N.A., Gavrilova N.B., Rogachev E.A., Shchetinina E.M. Determination of the Effectiveness of Methods for Converting Wheat Bran for Use in Food Technology. Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2020. no. 1. pp. 48–57. doi: 10.36107/spfp.2020.228 (in Russian).

15 Sirajuddin S., Masni M., Salam A. The level of preference of instant rice bran milk products innovation with various flavor variants as functional food. Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences. 2021. vol. 9. no. A. pp. 567–571. doi: 10.3889/oamjms.2021.6469.

16 Blumberg J.B., Camesano T.A., Cassidy A. et al. Cranberries and their bioactive constituents in human health. Advances in Nutrition. 2013. vol. 4. no. 6. pp. 618–632. doi: 10.3945/an.113.004473.

17 Lyutikova M.N., Botirov E.Kh. Chemical Composition and Practical Application of Lingonberry and Cranberry Berries. Chemistry of Plant Raw Materials. 2015. no. 2. pp. 5–27. doi: 10.14258/jcprm.201502429 (in Russian).

18 Živanović N., Božanić Tanjga B., Simin N. et al. In vitro functional properties of rosehips from 'Aurora' Edible Garden Rose's collection. Foods. 2024. vol. 13. no. 20. article 3272. doi: 10.3390/foods13203272.

19 Peña F., Valencia S., Tereucán G. et al. Bioactive compounds and antioxidant activity in the fruit of rosehip (Rosa canina L. and Rosa rubiginosa L.). Molecules. 2023. vol. 28. no. 8. article 3544. doi: 10.3390/molecules28083544.

20 Volnin A.A., Mishurov A.V., Mikhina A.A. et al. Study of the Amino Acid Composition of Feed Additive by Ion Exchange Chromatography. Bulletin of VSUET. 2018. vol. 80. no. 1 (75). pp. 199–205. doi: 10.20914/2310-1202-2018-1-199-205 (in Russian).

21 Bourvellec C.L., Bouzerzour K., Ginies C. et al. Phenolic and polysaccharidic composition of applesauce is close to that of apple flesh. Journal of Food Composition and Analysis. 2011. vol. 24. no. 4–5. pp. 537–547. doi: 10.1016/j.jfca.2010.12.012.

Сведения об авторах

Наталья А. Черных аспирант, кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Россия, na.sarnitskaya@omgau.org
https://orcid.org/0000-0002-1614-5090

Наталья Б. Гаврилова д.т.н., профессор, кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Россия, nb.gavrilova@omgau.org
https://orcid.org/0000-0001-8544-4214

Сергей А. Коновалов к.т.н., доцент, кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Россия, sa.konovalov@omgau.org
https://orcid.org/0000-0003-3537-8081

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнес процессами, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса. 67А Воронеж, 394030, Россия, профессор-консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036 mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Information about authors

Natalia A. Chernykh graduate student, food and food biotechnology departmen, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Ploshchad str., Omsk, 644008, Russia, na.sarnitskaya@omgau.org
https://orcid.org/0000-0002-1614-5090

Natalia B. Gavrilova Dr. Sci. (Engin.), professor, food and food biotechnology departmen, Название учреждения / организации (полностью, без сокращений), Адрес (улица, дом, город, индекс, страна), nb.gavrilova@omgau.org
https://orcid.org/0000-0001-8544-4214

Sergey A. Konovalov Cand. Sci (Engin.), associate professor, food and food biotechnology departmen, Omsk State Agrarian University named after. P.A. Stolypin,, Institutskaya square, 1, Omsk, 644008, Russia), sa.konovalov@omgau.org
https://orcid.org/0000-0003-3537-8081

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, department of management of socio-economic systems and business processes, Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karla Marksa, 67A, Voronezh, 394030, Russia, consulting professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

Анна А. Дерканосова д.т.н. профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революций, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262
Алиса А. Торшина к.т.н., инженер-химик, Испытательный центр, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революций, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alislis.tor@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-3150-8686

Вклад авторов

Наталья А. Черных провела эксперимент, обзор литературных источников по исследуемой проблеме, выполнила расчёты, написала и подготовила рукопись, включая презентацию и визуализацию результатов.

Наталья Б. Гаврилова обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провела эксперимент, выполнил расчёты

Сергей А. Коновалов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат
Константин К. Полянский н консультация в ходе исследования
Анна А. Дерканосова консультация в ходе исследовани
Алиса А. Торшина консультация в ходе исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Anna A. Derkanosova Dr. Sci. (Engin.), professorr, department of management of socio-economic systems and business processes, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av.,19 Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262
Alisa A. Torshina Cand. Sci (Engin.), chemical engineer , Testing Center, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av.,19 Voronezh, 394036, Russia, alislis.tor@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-3150-8686

Contribution

Natalia A. Chernykh conducted an experiment, reviewed literature sources on the problem under study, performed calculations, wrote and prepared a manuscript, including a presentation and visualization of the results
Natalia B. Gavrilova conducted a review of literary sources, contributed to the interpretation of data and to the compilation of the manuscript
Sergey A. Konovalov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism
Konstantin K. Polyansky consultation during the study
Anna A. Derkanosova consultation during the study
Alisa A. Torshina consultation during the study

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 27/01/2025	**После редакции** 17/02/2025	**Принята в печать** 02/03/2026

Received 27/01/2025	**Accepted in revised** 17/02/2025	**Accepted** 02/03/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-192-199 Оригинальная статья/Research article
УДК 640 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Потребительские предпочтения на рынке полуфабрикатов на основе грибов

Юрий А. Петрушов [1] ypetrushov.02@mail.ru 0009-0008-2777-1944
Сергей Л. Калачев [1] kalatchev.sl@rea.ru 0009-0003-5926-4350

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются потребительские предпочтения на рынке полуфабрикатов на основе грибов в Российской Федерации. Актуальность исследования обусловлена устойчивым ростом интереса потребителей к продуктам быстрого приготовления, сочетающим удобство использования, высокую пищевую ценность и соответствие принципам здорового питания. Современные изменения образа жизни, увеличение темпа городской жизни, а также распространение идей рационального и экологически ориентированного потребления способствуют расширению спроса на грибные полуфабрикаты как альтернативу традиционным мясным продуктам. Целью исследования является выявление ключевых факторов, влияющих на формирование потребительских предпочтений, а также анализ уровня удовлетворённости потребителей ассортиментом и качеством представленной на рынке продукции. В исследовании рассматриваются такие параметры, как вкусовые характеристики, ценовая доступность, состав и пищевая ценность продукции, удобство упаковки и уровень осведомленности покупателей о свойствах грибных полуфабрикатов. Методологической основой исследования послужили методы анализа и обобщения научной литературы, изучение статистических данных, а также результаты маркетинговых исследований. Дополнительно было проведено анкетирование среди потребителей с целью получения первичной информации о мотивах выбора и предпочтениях при покупке полуфабрикатов на основе грибов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рекомендаций по совершенствованию ассортиментной политики и повышению конкурентоспособности отечественных производителей.

Ключевые слова: полуфабрикаты, грибы, эноки, шампиньоны, анкетирование.

Consumer preferences in the mushroom-based semi-finished products market

Yurii A. Petrushov [1] ypetrushov.02@mail.ru 0009-0008-2777-1944
Sergey L. Kalatchev [1] kalatchev.sl@rea.ru 0009-0003-5926-4350

1 Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane, 36, Moscow, 117997, Russia

Abstract. This article examines consumer preferences in the mushroom-based semi-finished products market in the Russian Federation. The relevance of the study is due to the steady growth of consumer interest in fast food products that combine ease of use, high nutritional value and compliance with the principles of healthy nutrition. Modern lifestyle changes, an increase in the pace of urban life, as well as the spread of ideas of rational and environmentally oriented consumption contribute to the expansion of demand for mushroom semi-finished products as an alternative to traditional meat products. The purpose of the study is to identify the key factors influencing the formation of consumer preferences, as well as to analyze the level of consumer satisfaction with the range and quality of products presented on the market. The study examines such parameters as taste characteristics, affordability, composition and nutritional value of products, convenience of packaging and the level of customer awareness about the properties of mushroom semi-finished products. The methodological basis of the research was the methods of analysis and generalization of scientific literature, the study of statistical data, as well as the results of marketing research. Additionally, a survey was conducted among consumers in order to obtain primary information about the motives of choice and preferences when buying semi-finished products based on mushrooms. The results obtained can be used in the development of recommendations for improving assortment policy and increasing the competitiveness of domestic producers.

Keywords: semi-finished products, mushrooms, enoki, champignons, questionnaires.

Введение

Удовлетворение потребностей населения обусловливается с одной стороны качеством товаров, с другой их ассортиментом. Ассортимент продовольственных товаров необходимо совершенствовать в направлении повышения физиологической полноценности [1], а также в векторе расширения разнообразия их органолептических свойств.

В последние годы в крупных мегаполисах России отмечается повышение спроса на замороженные полуфабрикаты и готовые блюда. Так, в 2024 году производство замороженных готовых первых и вторых блюд в России увеличилось на 11% и достигло 207 млн порций» [9].

Приготовление питания из такой фактически готовой продукции существенно сокращает время и трудозатраты потребителя. Однако

Для цитирования

Петрушов Ю.А., Калачев С.Л. Потребительские предпочтения на рынке полуфабрикатов на основе грибов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 192–199. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-192-199

For citation

Petrushov Y.A., Kalatchev S.L. Consumer preferences in the mushroom-based semi-finished products market. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 192–199. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-192-199

© 2026, Петрушов Ю.А. и др. / Petrushov Y.A. et al.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

большинство потребителей пока предпочитает готовить блюда самостоятельно, при этом использовать полуфабрикаты мясного и растительного происхождения [13]. В последние годы к их ассортименту добавились полуфабрикаты, изготовленные с использованием съедобных грибов. Многие активно используют такие полуфабрикаты при составлении рационов здорового питания, фитнесс – питания [3]. Полуфабрикаты с грибами используют также предприятия общественного питания.

В продаже полуфабрикаты из лесных грибов лисичек, белых грибов, маслята, опят осенних, подосиновиков и др. Потребительские свойства лесных съедобных грибов изучались во второй половине 20 века, в этом период сформирован и большой ассортимент продуктов их переработки. Такая продукция обладает достаточно высокой ценой и малодоступна значительной части населения [10].

Поэтому наиболее часто в торговом ассортименте магазинов розничной торговли продаются полуфабрикаты из культивируемых шампиньонов. Однако ассортимент культивируемых съедобных грибов существенно глубже и в него входят вешенка обыкновенная, вешенка степная (эринги), шиитаке, опенок зимний (эноки), шимиджи [2].

В отношении этих культивируемых грибов, в частности относительно новых, для российского рынка (вешенка степная (эринги), шиитаке, опенок зимний (эноки), шимиджи) исследования практически не проводились. Недостаточно изучено и отношение российских потребителей к такой продукции.

Материалы и методы

В целях проведения исследования потребительских предпочтений нами подготовлен и проведен опрос потребителей методом CAWI, то есть респонденты самостоятельно заполняли анкету через веб-сервис «Google Forms». Для проведения опроса была составлена анкета, которая включала 26 открытых и закрытых вопросов.

Анкетирование проводили в период с 28 октября по 29 ноября 2025 г.

В анкетировании приняли участие более 1500 респондентов.

Таблица 1.
Количественная структура респондентов (по возрасту)

Table 1.
Quantitative structure of respondents (by age)

Возраст | Age Пол | Sex	18–29	30–44	45–59	60+	Всего Total
Мужчины | Men	198	187	147	109	641
Женщины | Women	294	266	216	97	873

Таблица 2.
Количественная структура респондентов (по занятости)

Table 2.
Quantitative structure of respondents (by employment)

Пол | Sex	Работающие (полный день) Employed (full-time)	Работающие (частичная занятость) Employed (part-time)	Безработные Unemployed	Студенты Students	Пенсионеры Pensioners	Всего | Total
Мужчины Men	245	126	38	154	78	641
Женщины Women	217	247	156	209	44	873

Выборка представлена мужчинами возрастных групп от 18–29 лет (31%) и 30–44 лет (29%). Среди женщин наибольшее количество приходится на возрастные группы 18–29 лет (37%) и 30–44 лет (30%).

Среди респондентов 31% работали на полную ставку, что указывает на умеренный уровень занятости в выборке. 25% имели частичную занятость, 13% были безработными, что отражает экономическую ситуацию среди участников опроса. 24% были студентами, что подчеркивает важность их мнения в качестве будущих потребителей. 8% составили пенсионеры, что демонстрирует влияние возрастного состава на выбор продуктов.

Из опрошенных респондентов в г. Москве проживает 100 человек (1%), в Московской области – 50 человек (2%) с наибольшей концентрацией в таких крупных городах Подмосковья, как г. Подольск – 1 человек (1%), г. Мытищи – 1 человек (1%) и Красногорск – 1 человек (1%).

В опросе также был учтен уровень образования респондентов. Всего, из общего количества респондентов, 52% обладают высшим образованием (789 человек), неоконченное высшее образование имеют 24% (367 человек), а респонденты, обладающие ученой степенью, составили долю в 6% (92 человека). Остальные респонденты – 24% от общего количества (367 человек) имеют среднее или среднее специальное образование.

Информация о вопросах представлена в таблице 3.

Таблица 3.

Некоторые вопросы и варианты ответов

Table 3.

Some questions and answer options

Вопрос	Question	Варианты ответа	Answer options
1	2	3	4
1. Как часто Вы покупаете культивируемые грибы (шампиньоны, вешенка и т. д.)?	1. How often do you buy cultivated mushrooms (champignons, oyster mushrooms, etc.)?	Несколько раз в неделю	Several times a week
		Раз в неделю	Once a week
		2–3 раза в месяц	2-3 times a month
		Раз в месяц	Once a month
		Реже 1 раза в месяц	Less than 1 time a month
		Никогда	Never
2. Какие культивируемые грибы Вам больше всего нравятся	2. Which cultivated mushrooms do you like the most	Шампиньоны королевские	Royal mushrooms
		Шампиньоны коричневые	Brown mushrooms
		Шампиньоны белые	White mushrooms
		Шампиньоны мини	Mini mushrooms
		Вешенка степная (эринги)	Steppe oyster mushroom (eringi)
		Шиитаке	Shiitake
		Эноки	Enoki
		Опята	Honey mushrooms
		Шимеджи	Shimeji
		Бунапи	Bunapi
3. В каком виде Вы покупаете съедобные грибы и продукты их переработки?	3. In what form do you buy edible mushrooms and their processed products?	Свежие целые	Fresh whole
		Свежие резанные	Fresh cut
		Замороженные целые	Frozen Whole
		Замороженные резанные	Frozen Cut
		Консервированные целые	Canned whole
		Консервированные резанные	Canned cut
		Сушеные резанные	Dried cut
		Готовые жареные	Ready-made fried
		Готовый грибной суп	Ready-made mushroom soup
		Покупаю, когда грибы входят в рецептуру других готовых продуктов (салатов, котлет, картофельного пюре, супов, пицца, пироги)	I buy them when mushrooms are included in the recipe of other ready-made products (salads, cutlets, mashed potatoes, soups, pizza, pies)
		Не покупаю	I don't buy
4. Где Вы обычно покупаете съедобные грибы?	4. Where do you usually buy edible mushrooms?	В торговых центрах	In shopping malls
		В гипермаркетах, супермаркетах	In hypermarkets, supermarkets
		В небольших магазинах «У дома», в минимаркетах	In small convenience stores, in minimarkets
		В палатках и киосках	In tents and kiosks
		На рынках, ярмарках	At markets, fairs
		В интернет-магазинах	In online stores
		В ресторанах и кафе	In restaurants and cafes
		Не приобретаю указанный товар	I do not purchase the specified product
5. Какие факторы наиболее важны для Вас при выборе съедобных грибов?	5. What factors are most important to you when choosing edible mushrooms?	Свежесть/срок годности	Freshness/shelf life
		Розничная цена	Retail Price
		Страна/регион производства (отечественные / импорт)	Country/Region of Production (Domestic / Import)
		Изготовитель	Manufacturer
		Внешний вид/качество (цельные/без повреждений)	Appearance/Quality (One-piece/No Damage)
		Наличие органического / экологического сертификата	Availability of an organic/ecological certificate
		Упаковка/удобство использования (например, нарезанные, готовые смеси)	Packaging/usability (e.g., sliced, ready-made mixes)
		Наличие полуфабрикатов / готовых блюд из грибов	Availability of semi-finished / ready meals from mushrooms
6. Какую сумму Вы обычно платите за 1 кг свежих шампиньонов?	6. How much do you usually pay for 1 kg of fresh mushrooms?	до 100 руб.	up to 100 rubles
		100–200 руб.	100–200 rubles
		200–300 руб.	200–300 rubles
		300–400 руб.	300–400 rubles
		400–500 руб.	400–500 rubles
		500–600 руб.	500–600 rubles
		600–700 руб.	600–700 rubles
		700–800 руб.	700–800 rubles
		800–900 руб.	800–900 rubles
		900–1000 руб.	900–1000 rubles
		Более 1000 руб.	More than 1000 rubles.

Продолжение таблицы 3| Continuation of table 3|

1	2	3	4
7. Согласны ли Вы платить больше (+10–20%) за грибы с пометкой «органические»/«экологически чистые»?	7. Are you willing to pay more (+10-20%) for mushrooms marked "organic"/"organic"?	Да, готов(а) платить +20% и более	Yes, I am ready to pay +20% or more
		Да, готов(а) платить +10%	Yes, I am ready to pay +10%
		Нет, не готов(а) платить дороже	No, I am not ready to pay more
		Затрудняюсь ответить	Difficult to answer
8. Чем вас привлекают полуфабрикаты из съедобных грибов?	8. What attracts you to semi-finished edible mushrooms?	Удобство и скорость приготовления	Convenience and speed of cooking
		Долгий срок хранения	Long shelf life
		Экономия времени / стоимости	Time/cost savings
		Вкус/качество	Taste/quality
		Наличие в магазине	Availability in the store
9. Что чаще всего отталкивает Вас от покупки культивируемых грибов?	9. What most often discourages you from buying cultivated mushrooms?	Высокая цена	High price
		Низкое качество продукции	Low product quality
		Сложность хранения (быстро портятся)	Difficulty of storage (spoils quickly)
		Нехватка блюд / идей как готовить	Lack of dishes / ideas on how to cook
		Предпочитаю другие продукты	Prefer other products
10. Сталкивались ли Вы с фальсификацией съедобных грибов и продуктов их переработки? Если да, то укажите, каких грибов и продуктов их переработки.	10. Have you encountered falsification of edible mushrooms and products of their processing? If so, indicate which mushrooms and their processed products.	Свободный ответ	Free Response
11. Готовы ли Вы пробовать новые виды съедобных культивируемых грибов и использовать их для приготовления пищи?	11. Are you ready to try new types of edible cultivated mushrooms and use them for cooking?	Да, готов (-а)	Yes, ready
		Нет, опасаюсь	No, I'm afraid
		Не могу ответить на вопрос, хочу сначала получить информацию и изучить их	I can't answer the question, I want to get information first and study them
		Другое	Other

Результаты и их обсуждение

Исследование, проведенное методом анкетирования, позволило выявить следующие особенности потребительского поведения и предпочтений в отношении, продаваемых в розничной торговле грибов и грибных полуфабрикатов.

Отвечая на вопрос о частоте покупок, респонденты указали, что покупают культивируемые грибы раз в неделю 4% (61 человек), 2–3 раза в месяц 13% (197 человек), раз в месяц 48% (727 человек), реже 1 раза в месяц 32% (484 человека), никогда 3% (45 человек).

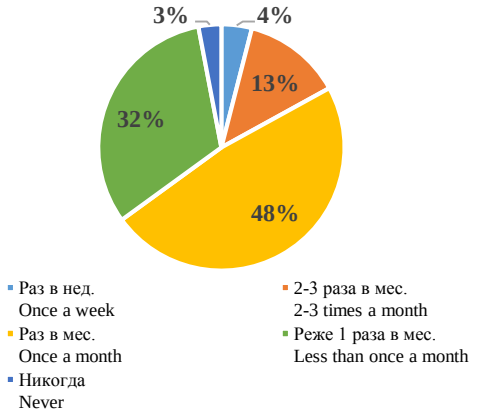


Рисунок 1. Частота покупок культивируемых грибов респондентами

Figure 1. Frequency of purchases of cultivated mushrooms by respondents

Респонденты отметили, что им больше нравятся шампиньоны белые – 82%; вешенка – 56%; шампиньоны королевские – 34%; шампиньоны мини – 18%; шиитаке – 12%; эноки – 8%; другие виды (опята, шимеджи и прочие) – 6%.

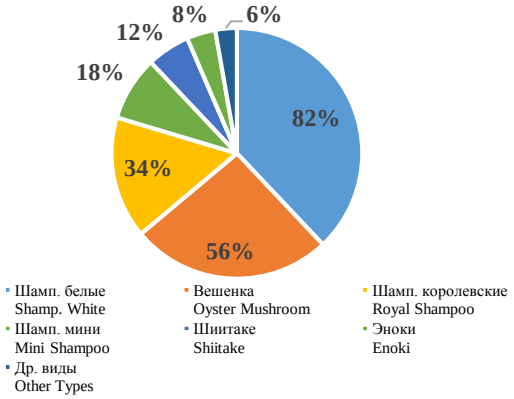


Рисунок 2. Предпочтения респондентов по видам грибов

Figure 2. Respondents' preferences for types of mushrooms

Потребительский выбор между свежими и переработанными грибами респонденты выразили следующим образом – свежие целые грибы покупают – 68%; замороженные целые – 42%; консервированные целые – 24%; полуфабрикаты (нарезанные, смеси) – 18%; готовые блюда (супы, жаренные грибы) – 10%; грибы в составе готовых продуктов (пицца, салаты) – 8%.

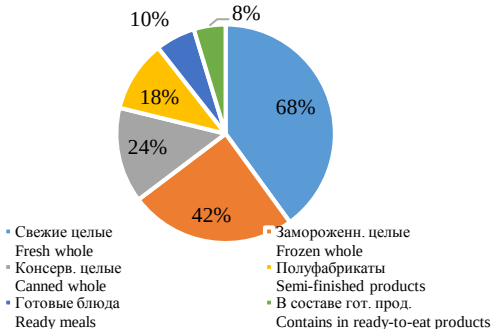


Рисунок 3. Предпочтения респондентов по видам обработки грибов

Figure 3. Respondents' preferences for types of mushroom processing

Места покупки грибов респондентами распределились следующим образом – супермаркеты / гипермаркеты – 74% (1114 человек); магазины «У дома» – 42% (632 человека); рынки / ярмарки – 28% (423 человека); интернет- магазины – 16% (249 человек); торговые центры – 12% (188 человек); не покупают – 2% (35 человек).



Рисунок 4. Предпочтения респондентов по местам покупки съедобных грибов

Figure 4. Respondents' preferences for places to purchase edible mushrooms

Ключевые факторы выбора (можно было выбрать до 3): свежесть / срок годности – 89% (1291 выбор); цена – 72% (1086 выборов); внешний вид/ качество – 64% (961 выбор); упаковка / удобство – 38% (575 выборов); бренд / изготовитель – 26% (394 выбора); экологический сертификат – 14% (211 выборов).

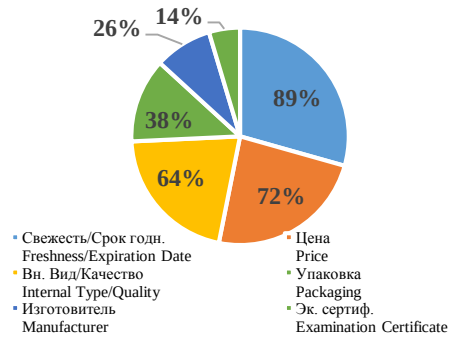


Рисунок 5. Ключевые факторы у респондентов при выборе / покупке съедобных грибов

Figure 5. Key factors for respondents when choosing/buying edible mushrooms

Средняя цена за один килограмм свежих шампиньонов: до 300 рублей – 20% (302 человек); 300–400 рублей – 43% (651 человек); 400–500 рублей – 15% (227 человек); свыше 500 рублей – 22% (333 человек).

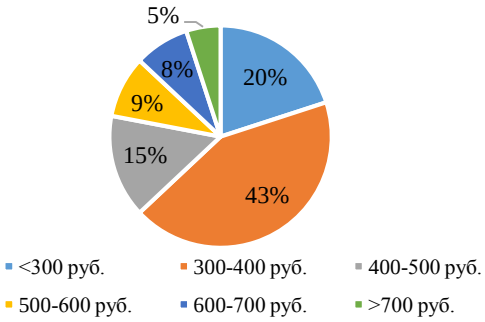


Рисунок 6. Диапазон цен за 1 кг свежих шампиньонов

Figure 6. Price range for 1 kg of fresh champignons

Определение готовности респондентов платить больше за «органические» грибы (+ 10 – 20%) показало, что готовы только – 34% (512 человек), нет – 52% (786 человек), затруднились ответить – 14% (216 человек).

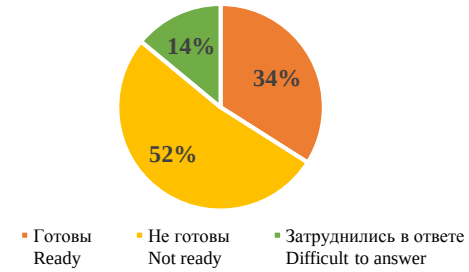


Рисунок 7. Готовность покупателей платить больше за «органическую» продукцию

Figure 7. Consumers are willing to pay more for organic products

Причины выбора полуфабрикатов (можно было выбрать несколько) респондентами распределились следующим образом: удобство и скорость приготовления – 76% (1143 ответа); долгий срок хранения – 42% (639 ответов); экономия времени – 38% (577 ответов); вкус / качество – 24% (368 ответов); наличие в магазине – 12% (181 ответ).

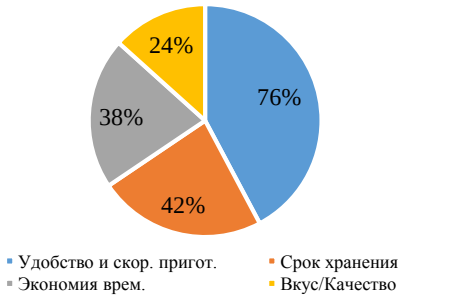


Рисунок 8. Факторы, обуславливающие выбор полуфабрикатов из грибов

Figure 8. Factors determining the choice of semi-finished mushroom products

Установлено, что отталкивает от покупки подобной продукции (можно было выбрать несколько) – высокая цена – 46% (696 ответов); низкое качество – 28% (423 ответа); нехватка идей для приготовления – 18% (272 ответа); предпочитаю свежие грибы – 32% (485 ответов).



Рисунок 9. Факторы, отталкивающие от покупки полуфабрикатов из грибов

Figure 9. Factors that discourage people from buying semi-finished mushroom products

С фальсификацией сталкивались только 12% (184 человека) опрошенных респондентов – в основном с подменой видов грибов в смесях и готовых блюдах; не сталкивались – 82% (1236 человек); затруднились ответить: 6% (94 человека).

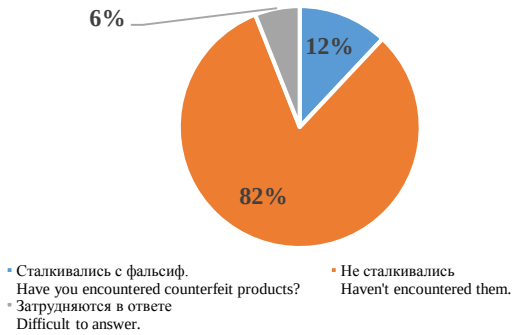


Рисунок 10. Случаи фальсификации грибов и продуктов их переработки

Figure 10. Cases of falsification of mushrooms and their processed products

Готовность пробовать новые виды грибов высказали 44% (665 человек) респондентов, опасаются 26% (393 человека), хотят сначала получить информацию 30% (456 человек).

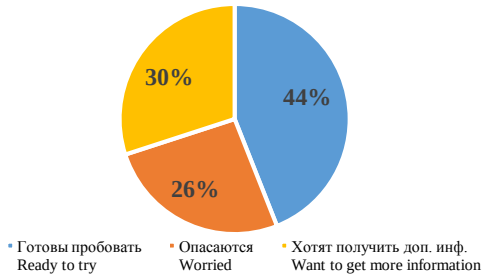


Рисунок 11. Готовность респондентов пробовать новые виды съедобных грибов

Figure 11. Respondents' willingness to try new types of edible mushrooms

На основании данных показателей, полученных в результате проведения онлайн анкетирования, можно сделать вывод о том, что основным потребителем является женщина в возрастной категории от 31 до 45 лет с высшим образованием, проживающая в крупном городе, покупающая грибную продукцию от 2 до 4 раз в месяц, преимущественно в супермаркетах.

Лидер предпочтений – свежие белые шампиньоны и вешенка; полуфабрикаты пока занимают второстепенную позицию (38% покупателей).

Ключевые критерии выбора – свежесть, цена и внешний вид; экологическая сертификация важна лишь для 14% потребителей.

Потенциал роста есть в сегментах: полуфабрикаты (особенно для экономии времени); «органические» грибы (34% готовы платить за них больше); новые виды грибов (44% потребителей открыты к экспериментам).

Основные аспекты, отталкивающие потребителей от покупки грибов и полуфабрикатов на их основе – цена полуфабрикатов и недостаточная информированность о способах их использования.

На основе проведённого анкетирования можно сделать вывод о том, что в России наблюдается устойчивый интерес к полуфабрикатам на основе грибов. Основные же факторы, которые значительно влияют на потребительские предпочтения, если опираться на проведённое анкетирование, то можно вывести в такой список:

– Возраст – молодёжь намного чаще выбирает подобную продукцию, нежели люди в других возрастных категориях;

– Место проживания – жители крупных городов намного чаще покупают полуфабрикаты на основе грибов, чем те, кто живёт в малых городах;

– Главным критерием выбора для большинства респондентов является свежесть и срок годности подобной продукции.

– Полуфабрикаты из грибов очень часто покупают из-за удобства их приготовления.

В заключение целесообразно сформулировать ряд рекомендаций для производителей данной категории продукции. В частности, представляется обоснованным расширение ассортимента грибных полуфабрикатов. Также, положительно скажется разработка и внедрение комплексных готовых наборов, предназначенных для ускоренного приготовления блюд (например, комплектация грибного сырья специями и соусами в единой упаковке). Перспективным направлением является размещение на потребительской упаковке грибной продукции стандартизированных рецептур приготовления блюд.

В целом, конкурентоспособность продукции на рынке определяется оптимальным соотношением трёх ключевых факторов: стоимости, потребительского удобства и уровня доверия со стороны покупателя. В связи с этим производители, способные обеспечить доступность, информативность и безопасность грибной продукции, получают существенные конкурентные преимущества в условиях рыночной конкуренции.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить ключевые потребительские предпочтения на рынке полуфабрикатов на основе грибов в России. Спрос на данную продукцию растет благодаря удобству, экономии времени и стремлению к здоровому питанию, однако потребители предъявляют повышенные требования к качеству, составу и безопасности подобных полуфабрикатов. Разработанные же в ходе исследования рекомендации для производителей данных продуктов ориентированы на удовлетворение этих потребностей и повышение конкурентоспособности отечественных компаний, ведь это позволит им укрепить свои позиции на рынке и способствовать дальнейшему развитию грибной индустрии в нашей стране.

Литература

1 Сорокин К.В., Попова Д.С. Обзор международных классификаций, применяемых в статистике предприятий, для организации учета по обособленным подразделениям // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 12-4 (87). С. 199–202.

2 Петрушов Ю.А., Сергей Л., Колобов С.В., Жиркова Е.В. Анализ пищевой и биологической ценности культивируемых грибов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 1. С. 190–196.

3 Lantushenko E.A., Dembitsky L.I. Innovative technologies and techniques in the industry of public catering // Пищевые инновации и биотехнологии. 2021. С. 333–334.

4 Case S., O'Brien T., Ledwith A.E. et al. β-glucans from Agaricus bisporus mushroom products drive trained immunity // Frontiers in Nutrition. 2024. V. 11. P. 15. doi: 10.3389/fnut.2024.1503421

5 Ban Z., Horev B., Rutenberg R. et al. Efficient production of fungal chitosan utilizing an advanced freeze-thawing method; quality and activity studies // Food Hydrocolloids. 2018. V. 81. P. 380–388. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.03.014

6 Цаканян А.В., Седракян К.И., Манучарян А.Ж. и др. Прикладное значение грибов в жизни человека как источников природных биологически активных соединений // Ajastan Kensabanakan Handes. 2023. Т. 75.

7 Грибы (Рынок России). Tadviser. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Грибы_(рынок_России) (дата обращения: 19.01.2026).

8 Грибной рынок мира. Verified Market Reports. URL: https://www.verifiedmarketreports.com/ (дата обращения: 22.01.2026).

9 Замороженные полуфабрикаты (Рынок России). Tadviser. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Замороженные_полуфабрикаты_(рынок_России) (дата обращения: 25.01.2026).

10 Лазарева Т.Г., Александрова Е.Г. Анализ производства и рынка грибов в России. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-proizvodstva-i-rynka-gribov-v-rossii (дата обращения: 28.01.2026).

11 Минсельхоз отметил рекордный рост производства культивированных грибов в России. Свое Фермерство. URL: https://svoefermerstvo.ru/svoemedia/news/zafiksirovan-rekordnyj-rost-proizvodstva-kul-tiviruemyh-gribov-v-rossii (дата обращения: 31.01.2026).

12 Новости компании Интерагротех. URL: https://interagro.info/news/smi-o-nas/rezultatami-pervykh-opytov-po-vyrashchivaniyu-aziatskikh-gribov-v-rossii-podelilis-spetsialisty-inte/ (дата обращения: 03.02.2026).

13 О рекомендациях, как выбирать и готовить грибы. Роспотребнадзор. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/about/info/news/news_details.php?ELEMENT_ID=18519 (дата обращения: 06.02.2026).

14 Производители грибов в России. ProductCenter. URL: https://productcenter.ru/producers/catalog-griby (дата обращения: 09.02.2026).

15 Рынок грибов Enoki – возможности роста и новые тенденции в глобальном сельском хозяйстве. Market Research Intellect. URL: https://www.marketresearchintellect.com/ru/blog/enoki-mushroom-market-growth-opportunities-and-emerging-trends-in-global-agriculture/ (дата обращения: 16.02.2026).

16 Hoinle B., Klosterkamp S. Food justice in public-catering places: mapping social-ecological inequalities in the urban food systems // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2023. V. 7. P. 1085494. doi: 10.3389/fsufs.2023.1085494

17 Lesa K.N., Khandaker M.U., Mohammad Rashed Iqbal F. et al. Nutritional value, medicinal importance, and health-promoting effects of dietary mushroom (Pleurotus ostreatus) // Journal of Food Quality. 2022. V. 2022. P. 2454180. doi: 10.1155/2022/2454180

18 Rathod M.G., Gadade R.B., Thakur G.M., Pathak A.P. Oyster mushroom: cultivation, bioactive significance and commercial status // Frontiers in Life Science. 2021. V. 2. P. 21.

19 Irfan H., Saleem A., Ali A., Akmal M. Medicinal importance of Pleurotus species (Oyster Mushroom): A review // BULLET: Jurnal Multidisiplin Ilmu. 2022. V. 1. № 5. P. 792–796.

20 De Cianni R., Varese G.C., Mancuso T. A further step toward sustainable development: The case of the edible mushroom supply chain // Foods. 2023. V. 12. № 18. P. 3433. doi: 10.3390/foods12183433

21 Azarova N., Shlapak N., Harbazhiy K. Quality investigation of meat-and-vegetable chopped semi-products based on turkey meat and champignon mushrooms // Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва. 2021. № 2. С. 116–122.

References

1 Sorokin K.V., Popova D.S. Review of International Classifications Used in Enterprise Statistics for Organizing Accounting for Separate Divisions. International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2023. no. 12-4 (87). pp. 199–202. (in Russian).

2 Petrushov Yu.A., Sergey L., Kolobov S.V., Zhirkova E.V. Analysis of the Nutritional and Biological Value of Cultivated Mushrooms. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 190–196. (in Russian).

3 Lantushenko E.A., Dembitsky L.I. Innovative technologies and techniques in the industry of public catering. Food Innovations and Biotechnology. 2021. pp. 333–334. (in Russian).

4 Case S., O'Brien T., Ledwith A.E. et al. β-glucans from Agaricus bisporus mushroom products drive trained immunity. Frontiers in Nutrition. 2024. vol. 11. article 15. doi: 10.3389/fnut.2024.1503421.

5 Ban Z., Horev B., Rutenberg R. et al. Efficient production of fungal chitosan utilizing an advanced freeze-thawing method; quality and activity studies. Food Hydrocolloids. 2018. vol. 81. pp. 380–388. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.03.014.

6 Tsakanyan A.V., Sedrakyan K.I., Manucharyan A.Zh. et al. Applied Significance of Fungi in Human Life as Sources of Natural Biologically Active Compounds. Ajastan Kensabanakan Handes. 2023. vol. 75. (in Russian).

7 Mushrooms (Market of Russia). Tadviser. Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Грибы_(рынок_России) (accessed: 19.01.2026) (in Russian).

8 Global Mushroom Market. Verified Market Reports. Available at: https://www.verifiedmarketreports.com/ (accessed: 22.01.2026) (in Russian).

9 Frozen Semi-Finished Products (Market of Russia). Tadviser. Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Замороженные_полуфабрикаты_(рынок_России) (accessed: 25.01.2026) (in Russian).

10 Lazareva T.G., Alexandrova E.G. Analysis of Mushroom Production and Market in Russia. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-proizvodstva-i-rynka-gribov-v-rossii (accessed: 28.01.2026) (in Russian).

11 Ministry of Agriculture Recorded Record Growth in Cultivated Mushroom Production in Russia. Svoe Fermerstvo. Available at: https://svoefermerstvo.ru/svoemedia/news/zafiksirovan-rekordnyj-rost-proizvodstva-kul-tiviruemyh-gribov-v-rossii (accessed: 31.01.2026) (in Russian).

12 News of Interagrotekh Company. Available at: https://interagro.info/news/smi-o-nas/rezultatami-pervykh-opytov-po-vyrashchivaniyu-aziatskikh-gribov-v-rossii-podelilis-spetsialisty-inte/ (accessed: 03.02.2026) (in Russian).

13 Recommendations on How to Choose and Cook Mushrooms. Rospotrebnadzor. Available at: https://www.rospotrebnadzor.ru/about/info/news/news_details.php?ELEMENT_ID=18519 (accessed: 06.02.2026) (in Russian).

14 Mushroom Producers in Russia. ProductCenter. Available at: https://productcenter.ru/producers/catalog-griby (accessed: 09.02.2026) (in Russian).

15 Enoki Mushroom Market – Growth Opportunities and Emerging Trends in Global Agriculture. Market Research Intellect. Available at: https://www.marketresearchintellect.com/ru/blog/enoki-mushroom-market-growth-opportunities-and-emerging-trends-in-global-agriculture/ (accessed: 16.02.2026) (in Russian).

16 Hoinle B., Klosterkamp S. Food justice in public-catering places: mapping social-ecological inequalities in the urban food systems. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2023. vol. 7. article 1085494. doi: 10.3389/fsufs.2023.1085494.

17 Lesa K.N., Khandaker M.U., Mohammad Rashed Iqbal F. et al. Nutritional value, medicinal importance, and health-promoting effects of dietary mushroom (Pleurotus ostreatus). Journal of Food Quality. 2022. vol. 2022. article 2454180. doi: 10.1155/2022/2454180.

18 Rathod M.G., Gadade R.B., Thakur G.M., Pathak A.P. Oyster mushroom: cultivation, bioactive significance and commercial status. Frontiers in Life Science. 2021. vol. 2. p. 21.

19 Irfan H., Saleem A., Ali A., Akmal M. Medicinal importance of Pleurotus species (Oyster Mushroom): A review. BULLET: Jurnal Multidisiplin Ilmu. 2022. vol. 1. no. 5. pp. 792–796.

20 De Cianni R., Varese G.C., Mancuso T. A further step toward sustainable development: The case of the edible mushroom supply chain. Foods. 2023. vol. 12. no. 18. article 3433. doi: 10.3390/foods12183433.

21 Azarova N., Shlapak N., Harbazhiy K. Quality investigation of meat-and-vegetable chopped semi-products based on turkey meat and champignon mushrooms. Technology of Production and Processing of Livestock Products. 2021. no. 2. pp. 116–122.

Сведения об авторах

Юрий А. Петрушов аспирант, базовая кафедра индустрии качества, Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36, г. Москва, 117997, Россия, ypetrushov.02@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-2777-1944

Сергей Л. Калачев к.т.н., доцент, базовая кафедра индустрии качества, Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36, г. Москва, 117997, Россия, kalatchev.sl@rea.ru
https://orcid.org/0009-0003-5926-4350

Information about authors

Yurii A. Petrushov graduate student, basic department of quality industry, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane, 36, Moscow, 117997, Russia, ypetrushov.02@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-2777-1944

Sergey L. Kalatchev Cand. Sci. (Engin.), associate professor, basic department of quality industry, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane, 36, Moscow, 117997, Russia, kalatchev.sl@rea.ru
https://orcid.org/0009-0003-5926-4350

Вклад авторов

Юрий А. Петрушов разработка методики исследования, сбор и анализ данных онлайн-анкетирования, статистическая обработка результатов и формулировка выводов исследования.
Сергей Л. Калачев написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Yurii A. Petrushov development of research methodology, collection and analysis of online survey data, statistical processing of results and formulation of research conclusions.
Sergey L. Kalatchev wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/01/2026	**После редакции** 02/02/2026	**Принята в печать** 20/02/2026
Received 11/01/2026	**Accepted in revised** 02/02/2026	**Accepted** 20/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-200-206 Обзорная статья/Review article
УДК 640 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Подходы консервирования заварных полуфабрикатов

Анастасия В. Копылова [1] tasyta7@ya.ru 0000-0001-9700-8989
Анастасия А. Глебова [1] nastia40015@mail.ru 0009-0006-6896-6903

1 Новосибирский государственный технический университет, пр-т К.Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

Аннотация. В данной статье представлен всесторонний анализ современных подходов сохранению качества и сроков годности выпеченных заварных полуфабрикатов, с акцентом на технологию шоковой заморозки. Исследование охватывает фундаментальные физико-химические аспекты данного процесса, его влияние на структурно-механические и органолептические свойства продукции, а также экономическую эффективность интеграции в производственные циклы. Основная цель работы заключается в комплексной систематизации научных данных о шоковой заморозке как методе консервации, объективной оценке его преимуществ и ограничений, а также представлении экспериментально подтверждённых результатов его применения в пищевой промышленности. В ходе исследования был проведён детальный анализ профильных научных публикаций, обобщены практические примеры технологических решений с использованием функционального сырья, а также определены перспективные направления развития данного метода. Особое внимание уделено вопросам сохранения качества заварных изделий при длительном хранении, что имеет существенное значение для оптимизации логистических цепочек и расширения географии сбыта продукции. Результаты исследования демонстрируют высокую эффективность шоковой заморозки в сохранении структурно-механических и органолептических характеристик заварных изделий, а также её экономическую целесообразность. Внедрение данной технологии позволяет значительно увеличить срок хранения продукции, снизить потери качества и расширить возможности для её транспортировки и реализации.

Ключевые слова: шоковая заморозка, заварные полуфабрикаты, консервирование, качество, современные технологии.

Approaches to preserving semi-finished custard products

Anastasia V. Kopylova [1] tasyta7@ya.ru 0000-0001-9700-8989
Anastasia A. Glebova [1] nastia40015@mail.ru 0009-0006-6896-6903

1 Novosibirsk State Technical University, K. Marx Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of modern approaches to preserving the quality and shelf life of baked semi-finished custard products, with an emphasis on shock freezing technology. The research covers the fundamental physico-chemical aspects of this process, its impact on the structural, mechanical and organoleptic properties of products, as well as the economic efficiency of integration into production cycles. The main purpose of the work is a comprehensive systematization of scientific data on shock freezing as a conservation method, an objective assessment of its advantages and limitations, as well as the presentation of experimentally confirmed results of its use in the food industry. In the course of the research, a detailed analysis of relevant scientific publications was carried out, practical examples of technological solutions using functional raw materials were summarized, and promising directions for the development of this method were identified. Special attention is paid to the issues of preserving the quality of custard products during long-term storage, which is essential for optimizing logistics chains and expanding the geography of product sales. The results of the study demonstrate the high efficiency of shock freezing in preserving the structural, mechanical and organoleptic characteristics of custard products, as well as its economic feasibility. The introduction of this technology makes it possible to significantly increase the shelf life of products, reduce quality losses and expand the possibilities for their transportation and sale.

Keywords: shock freezing, semi-finished custard products, canning, quality, modern technologies. .

Введение

Современная пищевая промышленность находится в постоянном поиске эффективных способов продления сроков годности продукции при сохранении её исходных качественных характеристик. Эта задача приобретает особую актуальность применительно к заварным выпеченным полуфабрикатам или изделиям, отличающимся высокой влажностью, нежной пористой структурой и повышенной чувствительностью к внешним воздействиям. Традиционные методы консервации, такие как сушка, стерилизация или введение химических консервантов, зачастую оказываются неприемлемыми для данной категории продуктов. Их применение неизбежно приводит к существенным изменениям текстуры, вкусоароматического профиля и пищевой ценности изделий, что недопустимо с точки зрения потребительских ожиданий и современных требований к качеству пищевых продуктов.

В этом контексте технология шоковой заморозки предстаёт как одно из наиболее перспективных решений, позволяющих эффективно решать проблему длительного хранения

Для цитирования
Копылова А.В., Глебова А.А. Подходы консервирования заварных полуфабрикатов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 200–206. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-200-206

For citation
Kopylova A.V., Glebova A.A. Approaches to preserving semi-finished custard products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 200–206. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-200-206

© 2026, Копылова А.В. и др. / Kopylova A.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

заварных полуфабрикатов. Ключевое преимущество метода заключается в способности оперативно переводить содержащуюся в продукте влагу в твёрдое состояние, тем самым минимизируя деструктивные биохимические процессы, приводящие к ухудшению качества. Быстрая кристаллизация воды препятствует развитию микроорганизмов, замедляет ферментативную активность и сохраняет структурную целостность изделия.

Цель настоящего исследования – всесторонне проанализировать технологию шоковой заморозки применительно к заварным полуфабрикатам, оценить её эффективность на основе экспериментальных данных и практического опыта отрасли, а также определить потенциальные направления совершенствования метода.

Что такое шоковая заморозка: суть технологии

Шоковая заморозка (англ. *blast freezing*) представляет собой высокотехнологичный процесс интенсивного охлаждения пищевых продуктов до -18 °С и ниже в предельно короткие временные промежутки – обычно от 2 до 4 часов. Достигается это за счёт принудительной циркуляции охлаждённого воздушного потока с температурой в диапазоне -30…-40 °С что обеспечивает высокую интенсивность теплоотвода от продукта.

Технологический процесс шоковой заморозки подразделяется на три последовательные фазы, каждая из которых характеризуется специфическими физико-химическими процессами:

Фаза охлаждения от +20 до 0 градусов. На этом этапе происходит отведение явной теплоты от продукта без изменения агрегатного состояния содержащейся в нём влаги. Температура изделия постепенно снижается от начальной (обычно комнатной) до точки замерзания воды [5]. Важнейшим параметром на данной стадии является интенсивность теплообмена, определяемая скоростью воздушного потока и разницей температур между продуктом и охлаждающим агентом. Эффективное управление этим процессом позволяет минимизировать время перехода к следующей фазе и снизить энергетические затраты.

Фаза подмораживания от 0 до -5 градусов. Это критическая стадия процесса, на которой происходит кристаллизация приблизительно 70 % свободной влаги, содержащейся в продукте. При достижении точки замерзания начинается образование кристаллов льда, причём скорость охлаждения напрямую влияет на их размер и распределение. При шоковой заморозке высокая интенсивность теплоотвода способствует формированию многочисленных мелких кристаллов (диаметром менее 100 мкм), которые равномерно распределяются в межклеточном пространстве, не нарушая целостности клеточных структур. Это принципиально отличает шоковую заморозку от медленного замораживания, при котором образуются крупные кристаллы (более 200 мкм), механически повреждающие ткани продукта и приводящие к необратимым изменениям его структуры.

Фаза домораживания от -5 до -18 градусов. На завершающей стадии происходит полное замораживание продукта, включая связанную влагу. Температура в центре изделия снижается до целевого значения -18, обеспечивающего стабильность продукта при длительном хранении [5]. На этом этапе завершается процесс кристаллизации, и структура продукта стабилизируется. Важно отметить, что слишком интенсивное охлаждение на последней стадии может привести к чрезмерному перемораживанию поверхностных слоёв, поэтому требуется тщательный контроль параметров процесса.

Ключевым параметром, определяющим эффективность шоковой заморозки, является скорость охлаждения. Именно высокая скорость теплоотвода обеспечивает формирование мелкокристаллической структуры льда, что является залогом сохранения исходной текстуры и сочности продукта после размораживания. Для достижения оптимальных результатов необходимо строго контролировать следующие технологические параметры:

- температуру охлаждающего воздуха;
- скорость воздушного потока;
- относительную влажность в камере заморозки;
- время обработки;
- начальную температуру продукта.

Современные шоковые морозильные установки оснащены автоматизированными системами контроля и регулирования этих параметров, что позволяет обеспечить воспроизводимость процесса и стабильное качество продукции.

Влияние шоковой заморозки на заварные полуфабрикаты

Для заварных выпеченных изделий, таких как эклеры, профитроли и заварные пирожные, технология шоковой заморозки решает комплекс технологических задач, направленных на сохранение их уникальных потребительских характеристик при длительном хранении. Рассмотрим основные аспекты влияния шоковой заморозки на качество заварных полуфабрикатов в виде физико-химических изменений в структуре продукта.

Кристаллизация влаги. При шоковой заморозке быстрое снижение температуры препятствует миграции влаги внутри продукта, обеспечивая равномерное распределение кристаллов льда по всему объёму теста. Это предотвращает образование крупных пустот и трещин, которые могут возникнуть при медленном замораживании из-за локального скопления влаги. Равномерное распределение мелких кристаллов льда минимизирует механическое повреждение структуры теста, что особенно важно для заварных изделий с их тонкой, хрупкой стенкой и объёмной полостью внутри.

Стабилизация крахмальных компонентов. В заварном тесте крахмал подвергается частичной клейстеризации в процессе выпечки. При низких температурах замедляется процесс ретроградации амилозы – обратного превращения растворённых крахмальных молекул в кристаллическую структуру. Это имеет ключевое значение для предотвращения очерствения продукта при хранении. Шоковая заморозка, благодаря быстрому переходу через температурный диапазон максимальной активности ретроградации (2…6), существенно замедляет этот процесс, сохраняя эластичность теста после размораживания.

Сохранение эмульсионной структуры. Заварное тесто представляет собой сложную эмульсию, в которой жиры диспергированы в водной фазе. При медленном замораживании может происходить расслоение эмульсии из-за неравномерного замерзания различных компонентов. Шоковая заморозка предотвращает этот нежелательный процесс, фиксируя эмульсию в стабильном состоянии. После размораживания жиры остаются равномерно распределёнными, что обеспечивает сохранение характерной текстуры заварного изделия – нежной, слегка влажной внутри и хрустящей снаружи.

Органолептические показатели качества

Многочисленные экспериментальные исследования подтверждают, что шоковая заморозка позволяет максимально сохранить исходные органолептические характеристики заварных полуфабрикатов.

Текстура. После размораживания изделия сохраняют эластичность и мягкость внутреннего слоя теста, при этом отсутствует нежелательная плотность или резинистость, характерные для продуктов, замороженных медленным способом. Тонкая корочка сохраняет хрупкость и способность к быстрому восстановлению хрусткости при лёгком подогреве.

Внешний вид. Форма изделий остаётся стабильной, без деформаций и трещин на поверхности. Цвет корочки не изменяется, сохраняется характерный золотистый оттенок, приобретённый в процессе выпечки. Отсутствие усушки поверхности предотвращает появление белёсых пятен и неравномерного окрашивания.

Вкус и аромат. Благодаря минимальному окислению липидов и сохранению летучих ароматических соединений, заварные изделия после шоковой заморозки и размораживания полностью сохраняют свойственный им богатый вкусоароматический профиль. Отсутствуют посторонние привкусы и запахи, которые могут возникать при длительном хранении или при использовании неподходящих методов консервации.

Влагосодержание. Равномерное распределение кристаллов льда препятствует значительной потере влаги при размораживании. Это позволяет сохранить сочность внутренней части изделия, предотвращая её пересушивание. После подогрева изделия обладают характерной нежной текстурой без излишней сухости или водянистости.

Биохимические аспекты сохранности

Помимо физических изменений, шоковая заморозка оказывает существенное влияние на биохимические процессы в заварных полуфабрикатах:

Ингибирование ферментативной активности, низкие температуры подавляют активность ферментов, ответственных за процессы деградации белков, липидов и углеводов. Это предотвращает нежелательное размягчение структуры, окисление жиров и изменение вкуса продукта.

Подавление микробиологической активности при температуре -18 прекращается рост и размножение большинства патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, а также плесневых грибов [6]. Это обеспечивает микробиологическую безопасность продукта при длительном хранении.

Сохранение пищевой ценности, так как Быстрая заморозка минимизирует потерю водорастворимых витаминов и биологически активных веществ, которые могут разрушаться при длительном воздействии кислорода или при медленной заморозке.

Экспериментальные исследования: анализ данных

Ниже представлены развёрнутые результаты исследований, опубликованных в российских научных изданиях. Каждый эксперимент рассмотрен с точки зрения методологии, ключевых показателей и практической значимости для производства заварных полуфабрикатов.

Влияние функциональных добавок и шоковой заморозки на качество хлеба [1]. Исследование посвящено комплексному воздействию шоковой заморозки и функциональных ингредиентов на реологические и органолептические свойства хлебобулочных изделий.

Для заварных полуфабрикатов особую ценность представляют следующие выводы:

Внесение лецитина в дозировке 0,5% от массы муки существенно снижает потери массы при цикле «заморозка-разморозка» [1]. Если в контрольных образцах без добавок потеря составляла 8%, то с лецитином она сократилась до 2,3%. Механизм действия связан с усилением эмульгирующих свойств теста: лецитин стабилизирует водно-жировую систему, препятствуя отделению свободной влаги при кристаллизации. Кроме того, фосфолипиды формируют дополнительные связи с клейковиной, повышая эластичность структуры.

Добавление 0,02% аскорбиновой кислоты способствует стабилизации белкового каркаса теста [1]. В экспериментах зафиксировано снижение деформации изделий на 15% по сравнению с контрольными образцами. Аскорбиновая кислота выступает как окислитель глутатиона, что укрепляет дисульфидные связи в клейковине. Это особенно важно для заварных изделий, где хрупкая стенка должна сохранять форму после размораживания.

Эксперименты показали, что температура -35 ºС и продолжительность 90 мин обеспечивают оптимальное соотношение скорости кристаллизации и сохранности структуры. При более низких температурах -40 ºС наблюдалось перемораживание поверхностных слоёв, что приводило к образованию микротрещин. При температуре -30 ºС увеличивалось время процесса, повышая риск частичной ретроградации крахмала.

Технология булочного изделия с черносмородиновым порошком как замороженного полуфабриката [2]. Работа демонстрирует потенциал использования функционального сырья для повышения стабильности замороженных изделий. Для заварных полуфабрикатов выписаны следующие аспекты:

Черносмородиновый порошок (3% от массы муки) содержит высокие концентрации полифенолов и антоцианов. После 30 суток хранения при -18 °С в изделиях сохранялось 92% исходных полифенолов [2]. Это замедляет окисление липидов, предотвращая появление посторонних привкусов. Для заварных изделий, где жиры играют ключевую роль в текстуре, это критично.

Мелкая дисперсность порошка (<50 мкм) обеспечивает равномерное распределение в тесте, увеличивая его гидратацию. В экспериментах влагосодержание после разморозки оставалось на уровне 95% от исходного, что исключает пересушивание внутренней полости заварных изделий.

Антоцианы черносмородинового порошка устойчивы к низким температурам, сохраняя насыщенный цвет корки. Это важно для визуальной привлекательности продукции после подогрева [2].

Шоковая заморозка булочных изделий с нетрадиционным растительным сырьём [3]. Исследование тестировало замену части муки на тыквенный жмых 10%. Для заварных полуфабрикатов значимы следующие результаты:

Тыквенный жмых содержит пектиновые вещества и клетчатку, которые связывают воду в тесте [3]. Это снизило усушку на 1,8% по сравнению с контрольными образцами. Для заварных изделий с тонкой стенкой это предотвращает образование пустот и трещин при замораживании.

Каротиноиды тыквенного жмыха устойчивы к низким температурам, сохраняя золотистый оттенок корки после разморозки

Оптимальная скорость воздушного потока 4 м/с обеспечивала равномерное охлаждение без локального перемораживания. При скорости 2 м/с наблюдалось неравномерное распределение кристаллов льда, а при 6 м/с – механическое повреждение поверхности изделий.

Производство замороженного хлеба [4]. Обобщённые данные по шоковой заморозке хлебобулочных изделий, релевантные для заварных полуфабрикатов:

При шоковой заморозке потери составляют 0,8–1,2%, что в 4–8 раз ниже, чем при обычной заморозке 5–10 [4]. Это достигается за счёт формирования мелкокристаллической структуры льда, минимизирующей испарение при размораживании.

При -18 °С изделия сохраняют качество до 90 суток. В экспериментах ключевыми показателями были:

- кислотность (не выше 3,5 Т);
- влажность (в пределах 38…42%);
- пористость (не менее 75%).

За счёт сокращения времени заморозки энергопотребление снижается на 20% по сравнению с традиционными методами [4]. В расчётах учитывались затраты на охлаждение воздуха, циркуляцию и поддержание температуры.

Преимущества и недостатки шоковой заморозки

Формирование микрокристаллов льда размером менее 100 мкм предотвращает разрушение клеточных мембран, что сохраняет:

- эластичность внутренней части заварного изделия;
- хрусткость корки после подогрева;
- равномерную пористость без пустот.

Потери, не превышающие 1,5%, достигаются за счёт:

- быстрого перехода через температурный диапазон максимальной кристаллизации (0–5 °С);
- герметичной упаковки, препятствующей сублимации.

Увеличение срока годности до 90 суток при температуре -18 °С обеспечивается:

- подавлением микробиологической активности;
- замедлением ферментативных реакций;
- стабилизацией липидной фракции.

Логистическая гибкость, возможность сезонного производства и транспортировки на дальние расстояния без потери качества.

Снижение потребности в консервантах: за счёт микробиологической стабильности отпадает необходимость в химических добавках.

Недостатки шоковой заморозки

Шоковая заморозка требует значительных капитальных вложений. Для малых предприятий стоимость шок-фризеров начинается от 500 000 рублей, а для крупных производств инвестиции могут достигать 5–10 миллионов рублей. Оборудование также характеризуется высоким энергопотреблением: средний расход составляет 0,8 кВт/ч на 1 кг продукции, что существенно влияет на себестоимость при больших объёмах производства.

Эффективная работа системы шоковой заморозки требует строгого контроля параметров: температуры воздуха с точностью ±1 °С, скорости воздушного потока ±0,5 м/с, влажности ±3% и времени заморозки ±5 минут. Нарушение этих параметров может привести к перемораживанию продукции, образованию макротрещин, потере эластичности и изменению вкуса из-за окисления липидов.

Для обеспечения качества и сохранности продукции при шоковой заморозке необходимо использовать барьерные упаковочные материалы, такие как полиэтилен с алюминиевым слоем. Это увеличивает затраты на упаковку, но является необходимым условием для предотвращения порчи продукции.

Заключение

Шоковая заморозка представляет собой комплексное технологическое решение, позволяющее сохранять аутентичность заварных изделий при длительном хранении, расширять географию сбыта благодаря стабильности продукции в транспортировке, снижать экологическую нагрузку за счёт сокращения пищевых отходов и повышать конкурентоспособность предприятий за счёт гибкости производственных циклов.

Внедрение этой технологии требует системного подхода и инвестиций в оборудование, но её долгосрочные преимущества, такие как сохранение качества, увеличение сроков годности и оптимизация логистики, делают её незаменимым инструментом в современном хлебопекарном и кондитерском производстве. Перспективы развития метода включают интеграцию цифровых технологий, совершенствование рецептур и повышение энергоэффективности, что открывает новые возможности для отрасли.

Литература

1 Сокол Н.В., Кенийз Н.В., Матчак С.С. Влияние функциональных добавок и шоковой заморозки на показатели качества хлеба // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2025. № 2 (48). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-funktsionalnyh-dobavok-i-shokovoy-zamorozki-na-pokazateli-kachestva-hleba (дата обращения: 30.10.2025).

2 Янова М.А., Ермош Л.Г., Присухина Н.В. и др. Разработка технологии булочного изделия с черносмородиновым порошком как замороженного полуфабриката // Вестник КрасГАУ. 2023. № 7 (196). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologii-bulochnogo-izdeliya-s-chernosmorodinovym-poroshkom-kak-zamorozhennogo-polufabrikata (дата обращения: 30.10.2025).

3 Рощина Е.В., Григорьева Р.З., Баранец С.Ю. и др. Шоковая заморозка булочных изделий с использованием нетрадиционного растительного сырья на предприятиях общественного питания // Техника и технология пищевых производств. 2020. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/shokovaya-zamorozka-bulochnyh-izdeliy-s-ispolzovaniem-netraditsionnogo-rastitelnogo-syrya-na-predpriyatiyah-obschestvennogo (дата обращения: 30.10.2025).

4 Ловцова Н.И. Перспективы развития замороженного хлеба // Студенческая наука - взгляд в будущее. 2021. С. 402–404.

5 Васюкова А., Мошкин А. Основы молекулярной кухни: учебник для СПО. М.: Litres, 2025.

6 Mikhailovich S.A., Valerjevna Z.N., Viktorovna C.O. Freezing technology effect on the change in the morphological turnip cells structure (Brassica rapa) // Индустрия питания. 2025. Т. 10. № 1. С. 30–38.

7 Лялин А.В., Феськов О.А., Стрелюхина А.Н., Новикова Ж.В. Исследование параметров процесса замораживания тестовых заготовок и хлебобулочных изделий различной степени готовности // Хлебопечение России. 2024. Т. 68. № 1. С. 63–77.

8 Кизим О.В., Буклагина И.А. Особенности транспортировки хлебобулочных изделий глубокой заморозки // Научный аспект. 2021. Т. 5. № 1. С. 545–553.

9 Zahorulko A., Voronenko I., Nikolaienko M. et al. Justification of the practical implementation of innovative technologies for obtaining polycomponent vegetable semi-finished products for new generation food products // EUREKA: Life Sciences. 2025. № 2. P. 68–76. doi: 10.21303/2504-5695.2025.003789

10 Zahorulko A., Zagorulko A., Kasabova K., Gordienko I. Creation of multi-component fruit and vegetable semi-finished products and confectionery on their basis with health properties // BIO Web of Conferences. 2021. V. 30. P. 01024. doi: 10.1051/bioconf/20213001024

11 Grujić S., Odžaković B., Atelj G. Effect of formulation variables on sensory quality of thermo-reversible fruit filling for frozen semi-finished bakery products: modelling and optimization // Journal of Engineering & Processing Management. 2022. V. 14. № 2. P. 46–56.

12 Gabelko S.V., Sapozhnikov A.N. Development of combined semi-finished products from poultry and vegetables with prolonged shelf life // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 640. № 3. P. 032028. doi: 10.1088/1755-1315/640/3/032028

13 Theresa M., Unni A.S., Geevarghese A. et al. Foodborne Pathogens and Food-Related Microorganisms // Sequencing Technologies in Microbial Food Safety and Quality. CRC Press, 2021. P. 25–108. doi: 10.1201/9781003105154-2

14 Danyliuk I.P., Strutynska L.T. Development and justification of technologies for gluten-free custard semi-finished products using rice flour. Publishing House "Baltija Publishing", 2025.

15 Dikhtyar A., Andrieieva S., Fedak N. et al. Determining Patterns in the Formation of Functional Technological Properties of a Fat-based Semi-Finished Product in the Technology of Sponge Cake Products // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. V. 6. № 11 (114). P. 15–31. doi: 10.15587/1729-4061.2021.246006

16 Petránková L., Svobodová D., Sudová N. Traditional European Desserts // Czech Hospitality & Tourism Papers. 2022. V. 18. № 36. P. 39.

17 Kandrokov R.K., Antropov D.Y., Anurov A.N. The Use of Fruit and Berry Raw Materials in the Technology of Production of Bakery Products from Frozen Semi-Finished Products // Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. 2022. V. 44. № 3. P. 35509–35513. doi: 10.26717/BJSTR.2022.44.007055

18 Гуринова Т.А., Гущенко Е.В., Филипович Д.И. Влияние сахаросодержащего сырья на качество заварного хлеба высокой степени готовности // Ответственные за выпуск. 2025. С. 141.

19 Алёхина Н.Н., Бакаева И.А. Варианты заморозки полуфабрикатов из биоактивированной пшеницы в технологии хлеба зернового // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 2. С. 136–143.

20 Шилов В.В., Литвяк В.В., Журня А.А. и др. Разработка рецептур на основании исследования влияния режимов температурной обработки полуфабрикатов высокобелковых мучных изделий на гликемический индекс // Новые технологии. 2025. Т. 21. № 4. С. 121–144.

21 Янова М.А., Оникиенко А.В., Ермош Л.Г. и др. Разработка технологии замороженного полуфабриката круассана с пюре морковным // Вестник КрасГАУ. 2023. № 6 (195). С. 234–241.

References

1 Sokol N.V., Keniyz N.V., Matchak S.S. Influence of Functional Additives and Shock Freezing on Bread Quality Indicators. Bulletin of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University. 2025. no. 2 (48). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-funktsionalnyh-dobavok-i-shokovoy-zamorozki-na-pokazateli-kachestva-hleba (accessed: 30.10.2025) (in Russian).

2 Yanova M.A., Ermosh L.G., Prisukhina N.V. et al. Development of Technology for a Bakery Product with Blackcurrant Powder as a Frozen Semi-Finished Product. Bulletin of KrasGAU. 2023. no. 7 (196). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologii-bulochnogo-izdeliya-s-chernosmorodinovym-poroshkom-kak-zamorozhennogo-polufabrikata (accessed: 30.10.2025) (in Russian).

3 Roshchina E.V., Grigorieva R.Z., Baranets S.Yu. et al. Shock Freezing of Bakery Products Using Non-Traditional Plant Raw Materials at Public Catering Enterprises. Technique and Technology of Food Production. 2020. no. 3. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/shokovaya-zamorozka-bulochnyh-izdeliy-s-ispolzovaniem-netraditsionnogo-rastitelnogo-syrya-na-predpriyatiyah-obschestvennogo (accessed: 30.10.2025) (in Russian).

4 Lovtsova N.I. Prospects for the Development of Frozen Bread. Student Science – A Look into the Future. 2021. pp. 402–404. (in Russian).

5 Vasyukova A., Moshkin A. Fundamentals of Molecular Cuisine: A Textbook for Vocational Education. Moscow: Litres, 2025. (in Russian).

6 Mikhailovich S.A., Valerjevna Z.N., Viktorovna C.O. Freezing technology effect on the change in the morphological turnip cells structure (Brassica rapa). Food Industry. 2025. vol. 10. no. 1. pp. 30–38.

7 Lyalin A.V., Feskov O.A., Strelukhina A.N., Novikova Zh.V. Study of the Parameters of the Freezing Process of Dough Pieces and Bakery Products of Various Degrees of Readiness. Baking in Russia. 2024. vol. 68. no. 1. pp. 63–77. (in Russian).

8 Kizim O.V., Buklagina I.A. Features of Transportation of Deep-Frozen Bakery Products. Scientific Aspect. 2021. vol. 5. no. 1. pp. 545–553. (in Russian).

9 Zahorulko A., Voronenko I., Nikolaienko M. et al. Justification of the practical implementation of innovative technologies for obtaining polycomponent vegetable semi-finished products for new generation food products. EUREKA: Life Sciences. 2025. no. 2. pp. 68–76. doi: 10.21303/2504-5695.2025.003789.

10 Zahorulko A., Zagorulko A., Kasabova K., Gordienko I. Creation of multi-component fruit and vegetable semi-finished products and confectionery on their basis with health properties. BIO Web of Conferences. 2021. vol. 30. article 01024. doi: 10.1051/bioconf/20213001024.

11 Grujić S., Odžaković B., Atelj G. Effect of formulation variables on sensory quality of thermo-reversible fruit filling for frozen semi-finished bakery products: modelling and optimization. Journal of Engineering & Processing Management. 2022. vol. 14. no. 2. pp. 46–56.

12 Gabelko S.V., Sapozhnikov A.N. Development of combined semi-finished products from poultry and vegetables with prolonged shelf life. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 640. no. 3. article 032028. doi: 10.1088/1755-1315/640/3/032028.

13 Theresa M., Unni A.S., Geevarghese A. et al. Foodborne Pathogens and Food-Related Microorganisms. In: Sequencing Technologies in Microbial Food Safety and Quality. CRC Press, 2021. pp. 25–108. doi: 10.1201/9781003105154-2.

14 Danyliuk I.P., Strutynska L.T. Development and justification of technologies for gluten-free custard semi-finished products using rice flour. Publishing House "Baltija Publishing", 2025.

15 Dikhtyar A., Andrieieva S., Fedak N. et al. Determining Patterns in the Formation of Functional Technological Properties of a Fat-based Semi-Finished Product in the Technology of Sponge Cake Products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. vol. 6. no. 11 (114). pp. 15–31. doi: 10.15587/1729-4061.2021.246006.

16 Petránková L., Svobodová D., Sudová N. Traditional European Desserts. Czech Hospitality & Tourism Papers. 2022. vol. 18. no. 36. p. 39.

17 Kandrokov R.K., Antropov D.Y., Anurov A.N. The Use of Fruit and Berry Raw Materials in the Technology of Production of Bakery Products from Frozen Semi-Finished Products. Biomedical Journal of Scientific & Technical Research. 2022. vol. 44. no. 3. pp. 35509–35513. doi: 10.26717/BJSTR.2022.44.007055.

18 Gurinova T.A., Gushchenko E.V., Filipovich D.I. Influence of Sugar-Containing Raw Materials on the Quality of High-Ready Custard Bread. Responsible for the Release. 2025. p. 141. (in Russian).

19 Alyokhina N.N., Bakaeva I.A. Freezing Options for Semi-Finished Products from Bioactivated Wheat in Grain Bread Technology. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 2. pp. 136–143. (in Russian).

20 Shilov V.V., Litvyak V.V., Zhurnya A.A. et al. Development of Recipes Based on the Study of the Influence of Temperature Treatment Regimes of Semi-Finished High-Protein Flour Products on the Glycemic Index. New Technologies. 2025. vol. 21. no. 4. pp. 121–144. (in Russian).

21 Yanova M.A., Onikienko A.V., Ermosh L.G. et al. Development of Technology for Frozen Semi-Finished Croissant with Carrot Puree. Bulletin of KrasGAU. 2023. no. 6 (195). pp. 234–241. (in Russian).

Сведения об авторах

Анастасия В. Копылова к.т.н., доцент, кафедра технологии и организации пищевых производств, Новосибирский государственный технический университет, пр-т К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073 Россия, tasyta7@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-9700-8989

Анастасия А. Глебова магистр, кафедра технологий и организации пищевых производств, Новосибирский государственный технический университет, пр-т К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073 Россия, nastia40015@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-6896-6903

Information about authors

Anastasia V. Kopylova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technology and organization of food production department, Novosibirsk State Technical Universit, K. Marx Ave., 20, tasyta7@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-9700-8989

Anastasia A. Glebova master, technology and organization of food production department, Novosibirsk State Technical Universit, K. Marx Ave., 20, nastia40015@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-6896-6903

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/12/2025	**После редакции** 12/01/2026	**Принята в печать** 26/01/2026
Received 21/12/2025	**Accepted in revised** 12/01/2026	**Accepted** 26/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-207-212 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.681.2 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка рецептуры и технологии ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника

Анна Е. Ковалева [1] a.e.kovaleva@ya.ru 0000-0001-7807-1755
Эльвира А. Пьяникова [1] alia1969@ya.ru 0000-0003-4424-7323
Оксана В. Евдокимова [2] evdokimova_oxana@bk.ru 0000-0002-0393-2327
Ирина В. Черемушкина [1] ir-inacher2010@yandex.ru 0000-0002-6016-0220

1 Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия
2 Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, ул. Генерала Родина, 69, г. Орел, 302019, Россия
3 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Интерес к изделиям из песочного теста связан с разнообразием видов, технологическими особенностями производства и возможностью декорирования данных изделий. Повышение пищевой ценности изделий из песочного теста нетрадиционными ингредиентами окажет влияние на потребительский спрос. Целью исследования являлась разработка рецептуры и технологии изделия из песочного теста - ватрушки «Королевской» - с использованием талкана овсяного из пророщенного зерна и порошка плодов шиповника. Для этого в рецептуре традиционной ватрушки «Королевской с творогом» из песочного теста была произведена замена части пшеничной муки высшего сорта на талкан овсяной из пророщенного зерна (в количестве 15% от общей массы муки) и порошок плодов шиповника (в количестве 5% от общей массы муки). Внесение в рецептуру ватрушки «Королевской» данных ингредиентов повлекло за собой изменение технологических режимов и последовательность операций. Масло сливочное перед замесом теста должно нагреться до комнатной температуры: оно не должно быть слишком теплым или растопленным. Данное условие позволяет получить при смешивании муки с сахаром однородную крошку песочного теста. Внесение муки, в отличие от традиционной технологии, где мука смешивается одновременно с другими ингредиентами, осуществляется на завершающем этапе приготовления теста. При этом влажность теста должна составлять 18-20%. Операция вымешивания теста по времени не должна превышать 2-3 мин. Увеличение влажности теста и времени его вымешивания будет негативно влиять на качество теста и готового изделия.

Ключевые слова: ватрушка «Королевская», рецептура, технологические параметры, талкан овсяный из пророщенного зерна, порошок плодов шиповника.

Development of the formulation and technology of the Royal cheesecake using oatmeal talkan and rosehip fruit powder

Anna E. Kovaleva [1] a.e.kovaleva@ya.ru 0000-0001-7807-1755
Elvira A. Pyanikova [1] alia1969@ya.ru 0000-0003-4424-7323
Oksana V. Evdokimova [2] evdokimova_oxana@bk.ru 0000-0002-0393-2327
Irina V. Cheremushkina [1] ir-inacher2010@yandex.ru 0000-0002-6016-0220

1 South-West State University, 50 years of October Av., 94, Kursk, 305040, Russia
2 Kursk Institute of Cooperation, Radishcheva, 116, Kursk, 305004, Russia
3 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The interest in shortbread products is related to the variety of types, technological features of production and the possibility of decorating these products. Increasing the nutritional value of shortbread dough products with non-traditional ingredients will have an impact on consumer demand. The purpose of the study was to develop the formulation and technology of a shortbread dough product - cheesecake "Royal" - using oatmeal talkan from sprouted grain and rosehip fruit powder. To do this, in the recipe of the traditional Royal cheesecake with cottage cheese made from shortbread dough, a portion of premium wheat flour was replaced with oatmeal from sprouted grain (in the amount of 15% of the total flour weight) and rosehip fruit powder (in the amount of 5% of the total flour weight). The introduction of these ingredients into the recipe of the Royal cheesecake entailed a change in technological modes and the sequence of operations. Butter should be heated to room temperature before kneading the dough.: it should not be too warm or melted. This condition makes it possible to obtain a homogeneous crumb of shortbread dough when mixing flour with sugar. Flour application, unlike traditional technology, where flour is mixed simultaneously with other ingredients, is carried out at the final stage of dough preparation. In this case, the moisture content of the dough should be 18-20%. The kneading operation should not exceed 2-3 minutes in time. An increase in the moisture content of the dough and the kneading time will negatively affect the quality of the dough and the finished product.

Keywords: cheesecake "Royal", recipe, technological parameters, oatmeal talkan from sprouted grain, rosehip fruit powder.

Для цитирования
Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А., Евдокимова О.В., Черемушкина И.В. Разработка рецептуры и технологии ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 207–212. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-207-212

For citation
Kovaleva A.E., Pyanikova E.A., Evdokimova O.V., Cheremushkina I.V. Development of the formulation and technology of the Royal cheesecake using oatmeal talkan and rosehip fruit powder. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 207–216. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-207-212

© 2026, Ковалева А.Е. и др. / Kovaleva A.E. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Исследование структуры питания населения России свидетельствует о том, что мучные кондитерские изделия занимают одну из лидирующих позиций в питании человека. Это связано с тем, что мучные кондитерские изделия – самые доступные и наиболее распространенные. Они характеризуются высокой пищевой ценностью, привлекательным внешним видом и приятным вкусом и играют существенную роль в восполнении энергетического баланса человека, благодаря своему составу [1].

Песочным называют тесто на основе сливочного масла, сахара и муки [2]. Иногда к тесту добавляют сметану, яйца, порошок какао, разрыхлитель, орехи и пряности и т. п. Песочное тесто используют для приготовления печенья, тарталеток, пирожных, пирогов, кишей, тартов и тортов.

Важнейшим рецептурным ингредиентом любого теста является мука, свойства которой оказывают существенное влияние на качество теста и готовых изделий. При производстве изделий из песочного теста требуется использование пшеничной муки высшего сорта. Для песочного теста муку берут со средним количеством клейковины (28…36%).

Изделия из песочного теста готовят с большим количеством масла примерно 26% и сахара 18%, при этом тесто имеет густую консистенцию, и влажность его не должна превышать 20%. Песочное тесто представляет собой однородную, плотную, эластичную маслянистую массу серо-желтого цвета. Изделия из такого теста получаются рассыпчатые и хорошо набухают.

Для повышения пищевой ценности ватрушки «Королевской» была произведена частичная замена пшеничной муки высшего сорта на талкан овсяной из пророщенного зерна и порошок плодов шиповника.

Талкан получают путем перемалывания пророщенного зерна. В зависимости от исходного сырья (пшеница, ячмень, овес или рожь) получается один из видов этой «живой» муки. Зёрна проращиваются и тщательно перемалываются, что делает продукт похожим на обычную муку, но невероятно полезную.

Проращивание стало новой тенденцией в пищевой промышленности, поскольку является естественным, безвредным и недорогим способом повысить питательную ценность семян растений [3, 4]. Благодаря проращиванию овёс может обогащаться и улучшать свои питательные и функциональные компоненты, а также преобразовывать свою питательную ценность.

Овёс, функциональный и сытный продукт, часто используется при производстве муки и мучных изделий. Овёс может обогащать хлеб питательными веществами и повышать его функциональность, снижая риск сердечно-сосудистых заболеваний, вызванных рафинированной диетой. Овёс содержит большое количество полифенолов и γ-аминомасляной кислоты (ГАМК) [5], которые могут предотвращать и даже лечить такие заболевания, как диабет, гипертония, сердечно-сосудистые и цереброваскулярные заболевания [6]. Кроме того, β-глюкан, растворимая пищевая клетчатка, полезная для здоровья, содержится в овсе в количестве 2–8%.

Важными источниками биологически активных соединений для обогащения пищи являются плоды, ягоды культивируемых и дикорастущих растений. Несмотря на то что исследования растительных ресурсов дикорастущих растений в настоящее время ведутся достаточно интенсивно, плоды и ягоды не находят широкого применения из-за недостаточной изученности особенностей их химического состава, технологических свойств и отсутствия обоснованных рекомендаций их рационального использования. В качестве источника биологически активных веществ значительный интерес представляет дикорастущий шиповник. Плоды шиповника – высокотехнологичное сырье, из которого можно получить широкий спектр пищевого сырья, в том числе растительные порошки и сухие экстракты, применение которых позволит расширить ассортимент, повысить пищевую ценность, получить продукцию с высокими органолептическими свойствами и увеличенным сроком годности [7].

Плоды шиповника являются ценным источником биологически активных соединений, в основном природных антиоксидантов (витамин С, полифенолы, каротиноиды, токоферолы и полисахариды), обладающих уникальной антиоксидантной, противовоспалительной, противомикробной, антивозрастной и остеопротекторной активностью [8].

Также шиповник является источником витаминов, таких как А, Е, К, а также минералов, включая кальций, магний, калий и фосфор [9, 10].

В составе плодов шиповника есть водорастворимая клетчатка. Она способствует более быстрому выведению вредных веществ из кишечника. Этот ценный компонент благотворно влияет на работу всей пищеварительной системы [11]. По содержанию витамина С шиповник опережает даже черную смородину, причем в десять раз, а также лимон – в пятьдесят раз. Кроме того, ягоды шиповника являются отличным бактерицидным средством.

Целью является разработка рецептуры и технологии производства ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника.

Материалы и методы

При разработке рецептуры ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника была взята рецептура из ТТК 8364 «Творожная ватрушка Королевская», в которой осуществлялась замена пшеничной муки высшего сорта талканом овсяным из пророщенного зерна и порошком плодов шиповника в количестве соответственно 10 и 10, 12,5 и 7,5, 15 и 5, 17,5 и 2,5% от массы муки пшеничной высшего сорта. Разработанные рецептуры представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Рецептуры ватрушки «Королевской»

Table 1.

Recipes of the Royal cheesecake

Ингредиент | Ingredient	Образец | Sample				
	Контроль Control	1	2	3	4
Тесто | Dough					
Мука пшеничная высшего сорта, г | Wheat flour of the highest grade, g	40	32	32	32	32
Талкан овсяной из пророщенного зерна, г | Oatmeal talkan made from sprouted grain, g	–	4	5	6	7
Порошок плодов шиповника, г | Rosehip Fruit Powder, g	–	4	3	2	1
Масло сливочное, г | Butter, g	20	20	20	20	20
Сахар, г | Sugar, g	12	12	12	12	12
Яйца куриные, г | Chicken eggs, g	8	8	8	8	8
Сода, г | Soda, g	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ванилин, г | Vanillin, g	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Начинка | Filling					
Творог, г | Cottage cheese, g	60	60	60	60	60
Сахар, г | Sugar, g	12	12	12	12	12

Контрольный образец «Творожная ватрушка Королевская» вырабатывается из пшеничной муки высшего сорта. Готовое изделие имеет золотистую корочку, аппетитную форму, светло-желтый цвет, плотную, но мягкую, влажную консистенцию, слабо сладкий творожный вкус с ароматом ванили.

Для приготовления «Творожной ватрушки Королевской» смешивают муку с сахаром, ванилином, солью и разрыхлителем, добавляют размягченное сливочное масло. Перемешивают, не сминая. Консистенция полученного теста должна быть рыхлая. Выкладывают в форму для выпекания 2/3 части теста, приминают по всей ее поверхности в виде большой тарталетки. Выкладывают начинку. Для этого смешивают творог с сахаром, добавляют ванилин. Затем начинку присыпают оставшимся тестом и запекают при температуре 180 °С в течение 30 минут.

Пищевая ценность на 100 г продукта: калорийность – 366,5 ккал; белки – 8,8 г; жиры – 14,75 г; углеводы – 49,6 г.

Результаты и обсуждение

Внесение изменений в рецептуру влияет на изменение технологических параметров приготовления ватрушки «Королевской». На рисунке 1 представлена технологическая схема приготовления ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника.

Качество и соотношение ингредиентов для ватрушки «Королевской» влияют на структуру крошки. Основными ингредиентами для приготовления крошки являются мука, сахар, сливочное масло и различные добавки.

Приготовление ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника начинается с подготовки сырья. Для этого муку пшеничную высшего сорта, талкан овсяной из пророщенного зерна, порошок плодов шиповника, сахар и соду просеивают в вибрационном просеивателе муки Каскад Atesy, производительностью 150 кг/ч. Качество яиц проверяют на овоскопе ОВ-6. Сливочное масло предварительно выдерживают при комнатной температуре до получения мягкой консистенции.

На следующем этапе технологического процесса осуществляют приготовление теста. Подготовленные талкан овсяной из пророщенного зерна, порошок плодов шиповника, сахар и соду смешивают с размягченным сливочным маслом и яйцами до получения однородной консистенции.

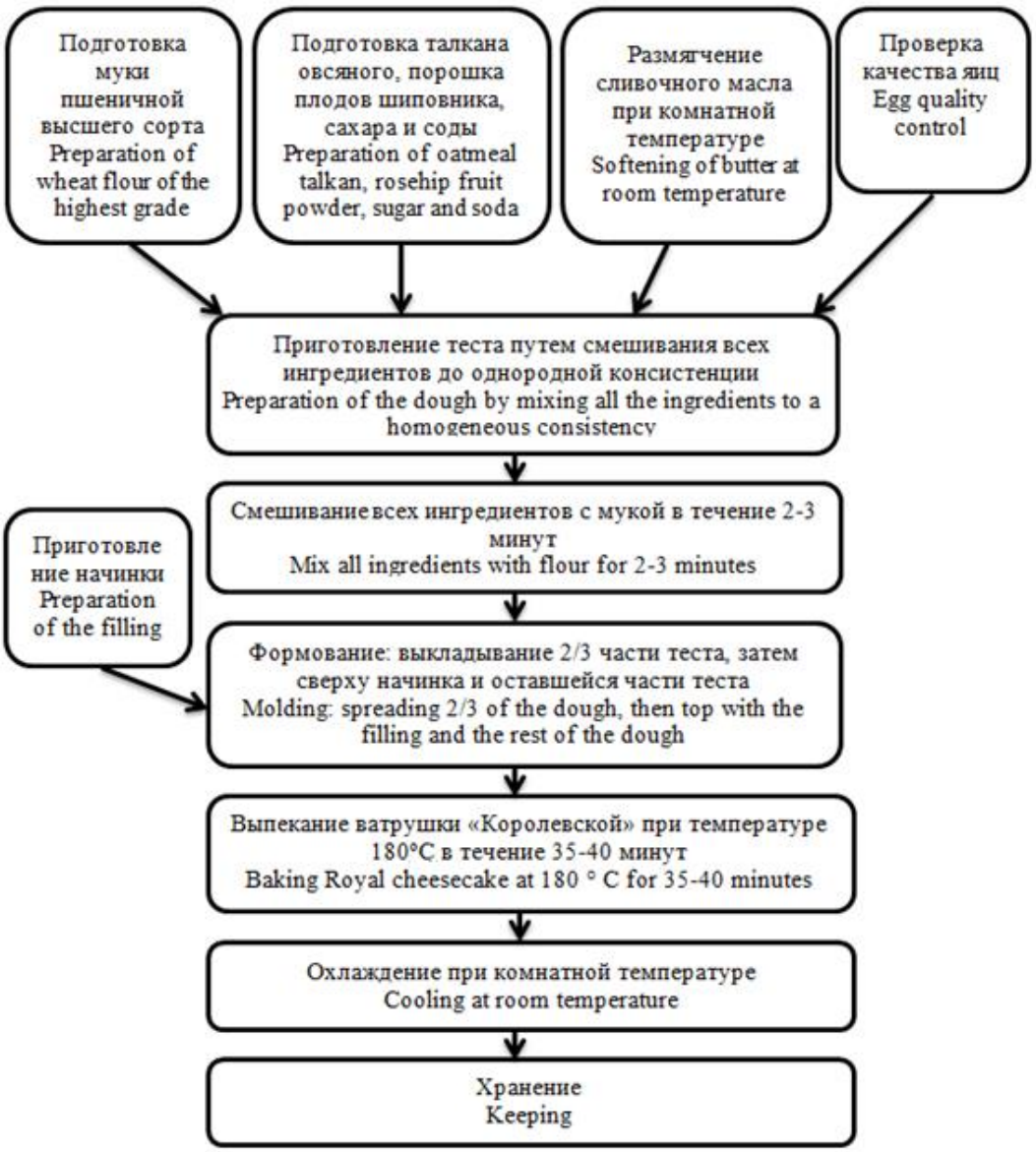


Рисунок 1. Технологическая схема приготовления ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника

Figure 1. Technological scheme of preparation of Royal cheesecake using oatmeal talkan and rosehip fruit powder

Затем всыпают муку пшеничную высшего сорта и вымешивают тесто в течение 2–3 мин. Влажность теста при этом должна быть 18–20%, температура теста – не более 22 °С. Данные режимы позволяют получить готовое изделие с повышенными показателями качества (рассыпчатостью и намокаемостью). Повышение температуры при замесе и увеличение его продолжительности, а также более высокая влажность теста могут привести к затягиванию теста и снижению его пластичности. Из такого теста выпеченный полуфабрикат получается плотной структуры, деформированный, с негладкой поверхностью. При повышенной температуре помещения, особенно в летнее время года, необходимо увеличить дозировку сахара в пределах допустимой рецептурами и тем самым предупредить возможность получения затянутого теста и деформированного полуфабриката.

При изготовлении начинки для ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника творог 5%-ной жирности и сахар смешивают и растирают до однородной консистенции.

Далее в форму выкладывают 2/3 массы теста. Сверху ровным слоем выкладывают начинку и накрывают ее оставшейся частью теста. Выпекают ватрушку «Королевскую» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника при температуре 180 °С в течение 35–40 минут. Готовое изделие охлаждают при комнатной температуре.

Заключение

В ходе разработки рецептуры и технологического процесса производства ватрушки «Королевской» с использованием талкана овсяного и порошка плодов шиповника было установлено, что:

– масло должно быть комнатной температуры, чтобы оно хорошо смешивалось с мукой и сахаром, если оно слишком теплое или растопленное, то крошка может получиться слишком маслянистой, что отразится на внешнем виде и качестве готового изделия;

– добавление муки осуществляется на завершающем этапе приготовления теста, так как благодаря этому в тесте отсутствует непромес;

– продолжительность вымешивания теста не должна превышать 2–3 мин., а его влажность должна быть 18–20%, так как увеличение этих параметров негативно сказывается на качестве теста и готового изделия.

Литература

1 Беретарь С.Т. Исследование влияния кукурузной муки и пектина на качество песочного печенья // Научные исследования: итоги и перспективы. 2021. Т. 2. № 1. С. 50–56. doi: 10.21822/2713-220X-2021-2-1-50-56

2 Rodriguez-Garcia J., Ding R., Nguyen Thao H.T. et al. Soluble fibres as sucrose replacers: Effects on physical and sensory properties of sugar-reduced short-dough biscuits // LWT. 2022. V. 167. P. 113837. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113837

3 Gu Y., Qian X., Sun B. et al. Nutritional composition and physicochemical properties of oat flour sieving fractions with different particle size // LWT. 2022. V. 154. P. 112757. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112757

4 Saka M., Özkaya B., Saka İ. The effect of bread-making methods on functional and quality characteristics of oat bran blended bread // International Journal of Gastronomy and Food Science. 2021. V. 26. P. 100439. doi: 10.1016/j.ijgfs.2021.100439

5 Figueroa-Pérez M.G., Reynoso-Camacho R., Ramos-Gómez M. et al. Impact of temperature and humidity conditions as abiotic stressors on the phytochemical fingerprint of oat (Avena sativa L.) sprouts // Food Chemistry. 2024. V. 439. P. 138173. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.138173

6 Cao H., Gao F., Shen H. et al. Influence of partial substitution of wheat flour with sprouted oat flours on physicochemical and textural characteristics of wheat bread // Journal of Cereal Science. 2023. V. 110. P. 103649. doi: 10.1016/j.jcs.2023.103649

7 Дубцова Г.Н., Кусова И.У., Куницына И.К. Пищевая ценность продуктов из шиповника // Вопросы питания. 2018. № 5 (приложение). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/pischevaya-tsennost-produktov-iz-shipovnika (дата обращения: 25.11.2024).

8 Zhou M., Sun Y., Luo L. et al. Road to a bite of rosehip: A comprehensive review of bioactive compounds, biological activities, and industrial applications of fruits // Trends in Food Science & Technology. 2023. V. 136. P. 76–91. doi: 10.1016/j.tifs.2023.04.006

9 Koczka N., Stefanovits-Bányai É., Ombódi A. Total polyphenol content and antioxidant capacity of rosehips of some Rosa species // Medicines. 2018. V. 5. № 3. P. 84. doi: 10.3390/medicines5030084

10 Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А. Влияние порошка плодов дикорастущего шиповника на потребительские свойства бисквитов // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1 (79). С. 256–262. doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-256-262

11 Ковалева А.Е., Ся Х., Быковская Е.И. Обоснование использования овсяной муки и дикорастущего плодово-ягодного сырья в технологии бисквитов // Проблемы конкурентоспособности потребительских товаров и продуктов питания: сб. науч. ст. мат. Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 12 апреля 2019 г. Курск: ЮЗГУ, 2019. С. 158–163.

12 Goff H.D., Hartel R.W., Rankin S.A. Flavoring and Coloring Materials // Ice Cream. Cham: Springer, 2025. doi: 10.1007/978-3-031-77872-8_4

13 Hendrysiak A., Brzezowska J., Nicolet N. et al. Juice Powders from Rosehip (Rosa canina L.): Physical, Chemical, and Antiglycation Properties // Molecules. 2023. V. 28. № 4. P. 1674. doi: 10.3390/molecules28041674

14 Gurbuz B., Demirci A.S. Probiotic yoghurt fortified with rosehip seed powder: Viability, physicochemical, and sensorial properties // International Food Research Journal. 2023. V. 30. № 5.

15 Igual M., García-Herrera P., Cámara R.M. et al. Bioactive Compounds in Rosehip (Rosa canina) Powder with Encapsulating Agents // Molecules. 2022. V. 27. № 15. P. 4737. doi: 10.3390/molecules27154737

16 Çürük S.G., Njjar M., Köseoğlu D., Akdoğan A. Mineral and Bioactive Component Contents of Rosehip (Rosa canina L.) Seed Powder // Akademik Gıda. 2023. V. 21. № 4. P. 323–332. doi: 10.24323/akademik-gida.1422139

17 Borșa A.R., Ranga F., Semeniuc C.A. Cold Screw Pressing Followed by Lyophilisation Enhances Antioxidant Compound Retention in Rosehip Waste Powder // Applied Sciences. 2026. V. 16. № 6. P. 2667. doi: 10.3390/app16062667

18 Vartolomei N., Turtoi M. The Influence of the Addition of Rosehip Powder to Wheat Flour on the Dough Farinographic Properties and Bread Physico-Chemical Characteristics // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 24. P. 12035. doi: 10.3390/app112412035

19 Borșa A.R., Păucean A., Fogarasi M. et al. Utilisation of Rosehip Waste Powder as a Functional Ingredient to Enrich Waffle Cones with Fibres, Polyphenols, and Carotenoids // Foods. 2025. V. 14. № 1. P. 90. doi: 10.3390/foods14010090

20 Pop I.A., Moldovan C., Plustea L. et al. Current trends in the development of value-added food products by exploiting the functional potential of chestnut flour and rosehip powder // Scientific Papers. Series D. Animal Science. 2023. V. 66. № 1.

21 Kolniak-Ostek J., Kita A., Giacalone D. et al. Physicochemical and Instrumental Flavor Analysis of Plant-Based Drinks with Plant Powder Additions // Foods. 2025. V. 14. № 15. P. 2593. doi: 10.3390/foods14152593

References

1 Beretar S.T. Study of the Influence of Corn Flour and Pectin on the Quality of Shortbread Cookies. Scientific Research: Results and Prospects. 2021. vol. 2. no. 1. pp. 50–56. doi: 10.21822/2713-220X-2021-2-1-50-56 (in Russian).

2 Rodriguez-Garcia J., Ding R., Nguyen Thao H.T. et al. Soluble fibres as sucrose replacers: Effects on physical and sensory properties of sugar-reduced short-dough biscuits. LWT. 2022. vol. 167. article 113837. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113837.

3 Gu Y., Qian X., Sun B. et al. Nutritional composition and physicochemical properties of oat flour sieving fractions with different particle size. LWT. 2022. vol. 154. article 112757. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112757.

4 Saka M., Özkaya B., Saka İ. The effect of bread-making methods on functional and quality characteristics of oat bran blended bread. International Journal of Gastronomy and Food Science. 2021. vol. 26. article 100439. doi: 10.1016/j.ijgfs.2021.100439.

5 Figueroa-Pérez M.G., Reynoso-Camacho R., Ramos-Gómez M. et al. Impact of temperature and humidity conditions as abiotic stressors on the phytochemical fingerprint of oat (Avena sativa L.) sprouts. Food Chemistry. 2024. vol. 439. Article 138173. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.138173.

6 Cao H., Gao F., Shen H. et al. Influence of partial substitution of wheat flour with sprouted oat flours on physicochemical and textural characteristics of wheat bread. Journal of Cereal Science. 2023. vol. 110. article 103649. doi: 10.1016/j.jcs.2023.103649.

7 Dubtsova G.N., Kusova I.U., Kunitsyna I.K. Nutritional Value of Rosehip Products. Problems of Nutrition. 2018. no. 5 (supplement). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/pischevaya-tsennost-produktov-iz-shipovnika (accessed: 25.11.2024) (in Russian).

8 Zhou M., Sun Y., Luo L. et al. Road to a bite of rosehip: A comprehensive review of bioactive compounds, biological activities, and industrial applications of fruits. Trends in Food Science & Technology. 2023. vol. 136. pp. 76–91. doi: 10.1016/j.tifs.2023.04.006.

9 Koczka N., Stefanovits-Bányai É., Ombódi A. Total polyphenol content and antioxidant capacity of rosehips of some Rosa species. Medicines. 2018. vol. 5. no. 3. article 84. doi: 10.3390/medicines5030084.

10 Kovaleva A.E., Pyanikova E.A. Influence of Powder of Wild Rosehip Fruits on the Consumer Properties of Biscuits. Bulletin of VSUET. 2019. vol. 81. no. 1 (79). pp. 256–262. doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-256-262 (in Russian).

11 Kovaleva A.E., Xia H., Bykovskaya E.I. Justification of the Use of Oat Flour and Wild Fruit and Berry Raw Materials in the Technology of Biscuits. In: Problems of Competitiveness of Consumer Goods and Food Products: Collection of Scientific Articles of the International Scientific and Practical Conference, Kursk, April 12, 2019. Kursk: SWSU, 2019. pp. 158–163. (in Russian).

12 Goff H.D., Hartel R.W., Rankin S.A. Flavoring and Coloring Materials. In: Ice Cream. Cham: Springer, 2025.

13 Hendrysiak A., Brzezowska J., Nicolet N. et al. Juice Powders from Rosehip (Rosa canina L.): Physical, Chemical, and Antiglycation Properties. Molecules. 2023. vol. 28. no. 4. article 1674. doi: 10.3390/molecules28041674.

14 Gurbuz B., Demirci A.S. Probiotic yoghurt fortified with rosehip seed powder: Viability, physicochemical, and sensorial properties. International Food Research Journal. 2023. vol. 30. no. 5.

15 Igual M., García-Herrera P., Cámara R.M. et al. Bioactive Compounds in Rosehip (Rosa canina) Powder with Encapsulating Agents. Molecules. 2022. vol. 27. no. 15. article 4737. doi: 10.3390/molecules27154737.

16 Çürük S.G., Njjar M., Köseoğlu D., Akdoğan A. Mineral and Bioactive Component Contents of Rosehip (Rosa canina L.) Seed Powder. Akademik Gıda. 2023. vol. 21. no. 4. pp. 323–332. doi: 10.24323/akademik-gida.1422139.

17 Borșa A.R., Ranga F., Semeniuc C.A. Cold Screw Pressing Followed by Lyophilisation Enhances Antioxidant Compound Retention in Rosehip Waste Powder. Applied Sciences. 2026. vol. 16. no. 6. article 2667. doi: 10.3390/app16062667.

18 Vartolomei N., Turtoi M. The Influence of the Addition of Rosehip Powder to Wheat Flour on the Dough Farinographic Properties and Bread Physico-Chemical Characteristics. Applied Sciences. 2021. vol. 11. no. 24. article 12035. doi: 10.3390/app112412035.

19 Borșa A.R., Păucean A., Fogarasi M. et al. Utilisation of Rosehip Waste Powder as a Functional Ingredient to Enrich Waffle Cones with Fibres, Polyphenols, and Carotenoids. Foods. 2025. vol. 14. no. 1. article 90. doi: 10.3390/foods14010090.

20 Pop I.A., Moldovan C., Plustea L. et al. Current trends in the development of value-added food products by exploiting the functional potential of chestnut flour and rosehip powder. Scientific Papers. Series D. Animal Science. 2023. vol. 66. no. 1.

21 Kolniak-Ostek J., Kita A., Giacalone D. et al. Physicochemical and Instrumental Flavor Analysis of Plant-Based Drinks with Plant Powder Additions. Foods. 2025. vol. 14. no. 15. article 2593. doi: 10.3390/foods14152593.

Сведения об авторах

Анна Е. Ковалева к.х.н., доцент, кафедра товароведения, технологии и экспертизы товаров, Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия, a.e.kovaleva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-7807-1755

Эльвира А. Пьяникова к.т.н., доцент, кафедра товароведения, технологии и экспертизы товаров, Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия, alia1969@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-4424-7323

Оксана В. Евдокимова д.т.н., профессор, кафедра анатомии, физиологии и хирургии, Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, ул. Генерала Родина, 69, г. Орел, 302019, Россия, evdokimova_oxana@bk.ru
https://orcid.org/0000-0002-0393-2327

Ирина В. Черемушкина д.т.н., профессор, кафедра торгового дела и товароведения, Воронежский государственный университет, пр. Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ir-inacher2010@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-6016-0220

Information about authors

Anna E. Kovaleva Cand. Sci. (Chem.), associate professor, commodity science, technology and examination of goods department, South-West State University, 50 years of October Av., 94, Kursk, 305040 Russia, a.e.kovaleva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-7807-1755

Elvira A. Pyanikova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, commodity science, technology and examination of goods department, South-West State University, 50 years of October Av., 94, Kursk, 305040 Russia, alia1969@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-4424-7323

Oksana V. Evdokimova Doc. Sci. (Engin.), anatomy, physiology and surgery department, Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Generala Rodina str., 69, Orel, 302019, Russia, evdokimova_oxana@bk.ru
https://orcid.org/0000-0002-0393-2327

Irina V. Cheremushkina Dr. Sci. (Engin.), professor, trade and commodity departmen, Voronezh State University of Engineering Technologie, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ir-inacher2010@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-6016-0220

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 20/01/2026	**После редакции** 12/02/2026	**Принята в печать** 22/02/2026
Received 20/01/2026	**Accepted in revised** 12/02/2026	**Accepted** 22/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-213-218 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.923.034:613.2 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Биотехнологическая платформа для производства белкового концентрата из фасоли

Владимир И. Манжесов [1] mavik62_62@mail.ru 0000-0002-0468-8821
Светлана Ю. Чурикова [1] sveta-ch-vz@ya.ru 0000-0001-9210-9852
Артур А. Айрапетян [1] hayrapetyan.arthur1@mail.ru 0000-0001-8053-4317
Светлана Ф. Яковлева [2] svetlana.yakovleva.68@mail.ru 0000-0003-3686-9966

1 Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В настоящем исследовании освещается задача создания ресурсоэффективных методов производства белковых препаратов из растительного сырья. Подчеркивается, что фасоль, обладающая значительным протеиновым потенциалом, до сих пор не имеет хорошо отработанных технологий переработки в изоляты и концентраты. Целью работы стала разработка и оптимизация экологичной биотехнологической платформы получения фасолевого белкового концентрата с применением ферментативной деградации балластных полисахаридов. В ходе исследований был проанализирован фракционный состав протеинов фасолевой муки, произведен рациональный подбор ферментных препаратов (амилосубтилин Г10х и глюкаваморин Г20х), а также оптимизированы ключевые параметры процесса гидролиза (гидромодуль, температура, уровень pH, продолжительность и соотношение ферментов). Установлено, что максимальный уровень гидролиза крахмала (76%) достигается при использовании ферментной композиции в пропорции 65:35, дозировке 2.5 ед/г крахмала, температуре 40°С, pH 4.6 и длительности процесса 4 часа. Разработана интегрированная технологическая схема, включающая стадии ферментации, седиментации белка в изоэлектрической точке, отмывки и лиофильной сушки. Выход целевого продукта составил 65.5% от исходного содержания протеина в сырье. Предложенная технология отличается сниженной энергоемкостью, исключением применения агрессивных химических реагентов и возможностью утилизации вторичных продуктов переработки.

Ключевые слова: белковый концентрат фасоли, ферментативный катализ, амилосубтилин, глюкаваморин, деструкция крахмала, изоэлектрическая седиментация, биотехнологическая платформа.

Biotech platform for the production of protein concentrate from beans

Vladimir I. Manzhesov [1] mavik62_62@mail.ru 0000-0002-0468-8821
Svetlana Y. Churikova [1] sveta-ch-vz@ya.ru 0000-0001-9210-9852
Arthur A. Hayrapetyan [1] hayrapetyan.arthur1@mail.ru 0000-0001-8053-4317
Svetlana F. Yakovleva [2] svetlana.yakovleva.68@mail.ru 0000-0003-3686-9966

1 Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurin str., Voronezh, 394087, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This study highlights the task of creating resource-efficient methods for the production of protein preparations from plant raw materials. It is emphasized that beans, which have significant protein potential, still do not have well-developed technologies for processing into isolates and concentrates. The aim of the work was to develop and optimize an environmentally friendly biotechnological platform for the production of bean protein concentrate using enzymatic degradation of ballast polysaccharides. During the research, the fractional composition of bean flour proteins was analyzed, a rational selection of enzyme preparations (amylosubtilin G10x and glucavamorin G20x) was made, and key parameters of the hydrolysis process (hydromodule, temperature, pH level, duration and ratio of enzymes) were optimized. It was found that the maximum level of starch hydrolysis (76%) is achieved when using an enzyme composition in a ratio of 65:35, a dosage of 2.5 units / g of starch, a temperature of 40 °C, pH 4.6 and a process duration of 4 hours. An integrated technological scheme has been developed, including the stages of fermentation, protein sedimentation at an isoelectric point, washing and freeze drying. The yield of the target product was 65.5% of the initial protein content in the raw material. The proposed technology is characterized by reduced energy consumption, the exclusion of the use of aggressive chemicals and the possibility of recycling recycled products.

Keywords: bean protein concentrate, enzymatic catalysis, amylosubtilin, glucavamorin, starch degradation, isoelectric sedimentation, biotechnological platform.

Введение

Протеины растительного происхождения, представленные в форме муки, концентратов и изолятов, занимают важное место в пищевой индустрии [3]. Эти ингредиенты применяются для замещения дорогостоящих белков животного происхождения, повышения питательной ценности продуктов, разработки аналогов мясных и молочных изделий, а также продуктов специализированного и лечебно-профилактического назначения [1, 11]. Фасоль, характеризующаяся высоким содержанием белка (не менее 27.39% на сухое вещество), представляет собой перспективную сырьевую базу для производства подобных препаратов [5, 16].

Для цитирования
Манжесов В.И., Чурикова С.Ю., Айрапетян А.А., Яковлева С.Ф. Биотехнологическая платформа для производства белкового концентрата из фасоли // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 213–218. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-213-218

For citation
Manzhesov V.I., Churikova S.Y., Hayrapetyan A.A., Yakovleva S.F. Biotech platform for the production of protein concentrate from beans. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 213–218. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-213-218

© 2026, Манжесов В.И. и др. / Manzhesov V.I. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Однако существующие методики переработки фасоли нельзя считать исчерпывающе разработанными, а данные о функционально-технологических характеристиках ее белков нуждаются в дополнении и анализе [9, 15]. Классические способы получения концентратов, базирующиеся на осаждении белка, нередко приводят к его денатурации и утрате функциональных качеств [19]. В этой связи применение биотехнологических методов, в частности, направленного ферментативного расщепления непротеиновых компонентов, является чрезвычайно перспективным [10, 12, 20].

Цель работы – создание технологической платформы производства концентрата белков фасоли с использованием ферментативной обработки для элиминации крахмала и других небелковых соединений.

Материалы и методы

Исследования проводились на фасолевой муке, полученной путем размола бобов фасоли и соответствующей нормам ГОСТ 7758–75 [1]. Физико-химические показатели муки приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Физико-химическая характеристика фасолевой муки

Table 1.

Physico-chemical characteristics of bean flour

Показатель | Indicator	Значение | Meaning
Цвет | Color	Кремовый с сероватым оттенком Creamy with a grayish tint
Массовая доля влаги, %, не более | Moisture content, %, no more than	12.16
Массовая доля протеина (на с.в.), %, не менее Protein content (d.s.), %, no less than	27.39
Крупность помола, проход через сито № 35, %, не менее Grinding fineness, passing through sieve No. 35, %, no less than	60.0

Фракционирование белков проводили методом последовательной экстракции в различных растворителях (вода, 10% раствор хлорида натрия, 0.8% раствор гидроксида натрия, этанол) по общепринятой методике [14].

Ферментативный гидролиз. Для деполимеризации крахмала использовали промышленные ферментные препараты микробного генеза: амилосубтилин Г10х (α-амилаза, активность 2600 ед./г) и глюкаваморин Г20х (глюкоамилаза, активность 3000 ед./г) [7]. Подготовку сырья осуществляли путем просеивания муки через сито с размером ячеек ≤ 100 мкм. Гидролиз проводили в водной суспензии муки при постоянном перемешивании. Интенсификацию процесса контролировали по накоплению редуцирующих веществ (РВ) с последующим расчетом степени гидролиза крахмала [6].

Формирование белкового концентрата. После завершения гидролиза суспензию подвергали центрифугированию. Белковую фракцию осаждали из надосадочной жидкости в изоэлектрической точке (pH 3.0–3.2), используя 40% раствор уксусной кислоты [4, 18]. Полученный осадок белка отмывали дистиллированной водой и высушивали методом лиофильной сушки (50 °С, давление 150–200 Па).

Результаты и обсуждение

Анализ фракционного состава протеинов фасолевой муки выявил доминирование солерастворимой фракции (82.6%), что свидетельствует о преобладании глобулинов, что типично для белков бобовых культур [5, 13] (таблица 2).

Таблица 2.

Фракционный состав белков муки бобов фасоли и нута, %

Table 1.

Fractional composition of flour, bean, and chickpea proteins, %

Культура Culture	Водорастворимая фракция Water-soluble fraction	Солерастворимая фракция (10% NaCl) Salt-soluble fraction (10% NaCl)	Щелочерастворимая фракция (0.8% NaOH) Alkali-soluble fraction (0.8% NaOH)	Спирторастворимая фракция Alcohol-soluble fraction
Фасоль | Beans	10.1	82.6	6.3	1.0
Нут | Chickpeas	12.2	78.5	7.9	1.4

Для эффективного удаления крахмальной фракции была изучена кинетика его гидролиза под действием индивидуальных ферментов и их синергетических композиций. Выявлено, что комбинация ферментов (амилосубтилин + глюкаваморин) демонстрирует более высокую

эффективность по сравнению с моопрепаратами (таблица 3). Синергизм объясняется комплементарным механизмом действия: α-амилаза осуществляет эндонуклеазное расщепление α-1,4 гликозидных связей с образованием олигосахаридов, в то время как глюкоамилаза последовательно отщепляет терминальные остатки глюкозы как от α-1,4-, так и от α-1,6 связей [7, 20].

Таблица 3.

Динамика гидролиза крахмала фасолевой муки под действием ферментных препаратов

Table 2.

Dynamics of hydrolysis of starch of bean flour under the action of enzyme preparations

Продолжительность процесса, ч Time, h	Накопление РВ с амилосубтилином, % RV accumulation with amylosubtilin, %	Накопление РВ с глюкаваморином, % RV accumulation with glucavamorin, %	Накопление РВ с композицией 65:35, % RV accumulation with a 65:35 composition, %
1	6.90	7.04	7.40
4	7.17	7.34	9.05
5	7.30	7.40	13.30
24	7.33	7.30	15.42

Максимальное накопление редуцирующих веществ (28.6%) и, соответственно, степень гидролиза крахмала (76%) были достигнуты при использовании композиции ферментов в соотношении 65:35 и дозировке 2.5 ед./г крахмала (рисунок 1). Продление процесса гидролиза свыше 4.5 часов было признано технологически нецелесообразным.

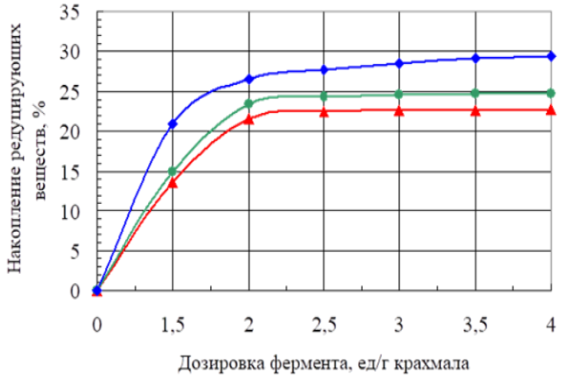


Рисунок 1. Кинетика накопления редуцирующих веществ под действием ферментных композиций (1 – соотношение 65:35; 2 – 60:40; 3 – 50:50)

Figure 1. Kinetics of accumulation of reducing substances under the action of enzyme compositions (1 – ratio 65:35; 2 – 60:40; 3 – 50:50)

Были установлены оптимальные параметры процесса:

- Температурный режим: Пик активности ферментной системы наблюдался в интервале 38–42 °C с максимумом при 40 °C (рисунок 2).
- Уровень pH: Наибольшая скорость процесса зарегистрирована при pH 4.6, что соответствует области перекрытия оптимумов активности используемых ферментов (рисунок 3).
- Гидромодуль: Наиболее сбалансированным признано соотношение «мука: вода» = 1 : 5, обеспечивающее высокую степень конверсии (45%) при экономически обоснованных энергозатратах (рисунок 4).

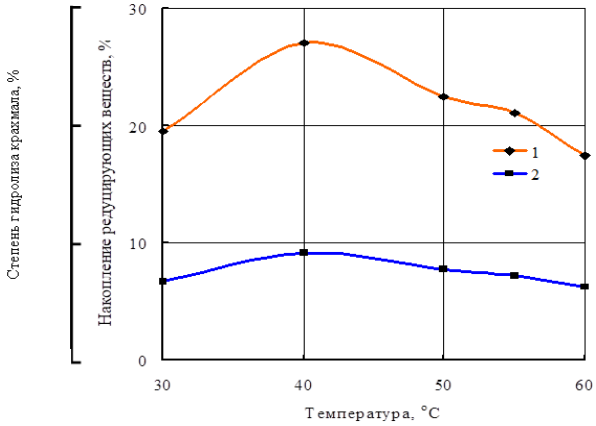


Рисунок 2. Влияние температуры на кинетику гидролиза: (1 – степень гидролиза; 2 – накопление РВ)

Figure 2. Influence of temperature on the kinetics of hydrolysis: (1 – degree of hydrolysis; 2 – accumulation of PB)

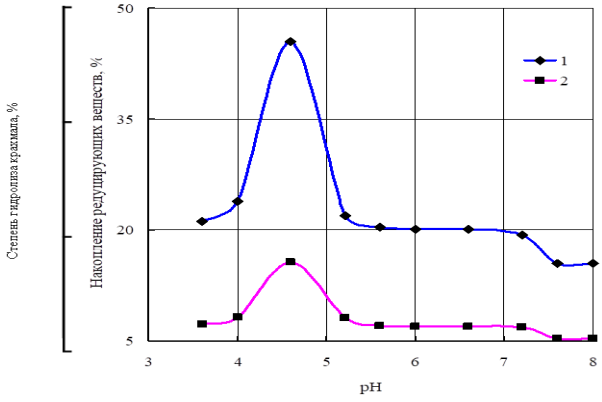


Рисунок 3. Влияние pH на кинетику гидролиза (1 – степень гидролиза; 2 – накопление РВ)

Figure 3. Effect of pH on the kinetics of hydrolysis (1 – degree of hydrolysis; 2 – accumulation of PB)

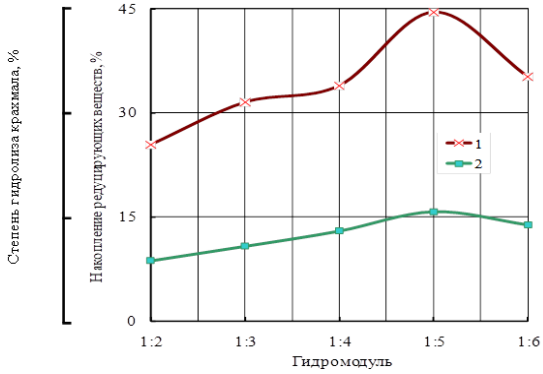


Рисунок 4. Влияние гидромодуля на кинетику гидролиза (1 – степень гидролиза; 2 – накопление РВ)

Figure 4. Effect of the hydromodule on the kinetics of hydrolysis (1 – degree of hydrolysis; 2 – accumulation of PB)

На основании полученных результатов была спроектирована технологическая схема производства белкового концентрата из фасоли (рисунок 5):

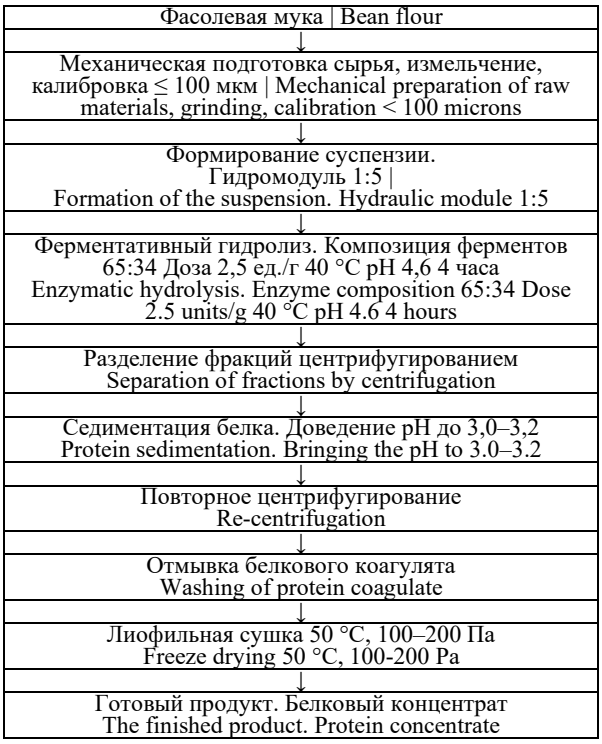


Рисунок 5. Технологическая схема получения концентрата белка фасоли

Figure 5. Technological scheme to produce bean protein concentrate

Проведенное комплексное исследование позволило сформулировать следующие основные выводы:

1. **Установлен сырьевой потенциал**: Фасолевая мука обладает высоким содержанием протеина (не менее 27.39% на сухое вещество) с преобладанием солерастворимой фракции глобулинов (82.6%), что подтверждает ее перспективность в качестве сырья для производства белковых концентратов.

2. **Обоснована эффективность ферментативного подхода**: доказано синергетическое действие композиции ферментов амилосубтилина Г10х и глюкаваморина Г20х, которая превосходит по эффективности моопрепараты и обеспечивает глубокий гидролиз балластного крахмала.

3. **Оптимизированы параметры процесса**: научно обоснованы и экспериментально установлены критические параметры гидролиза, обеспечивающие максимальную степень гидролиза крахмала на уровне 76%:

— соотношение ферментов в композиции – 65:35.
— дозировка – 2.5 ед./г крахмала.
— температура – 40°с.
— уровень ph – 4.6.
— продолжительность – 4 часа.
— гидромодуль – 1:5.

4. **Разработана и апробирована технологическая схема**: спроектирована завершенная технологическая схема, включающая этапы ферментации, разделения фракций, изоэлектрического осаждения белка и лиофильной сушки, которая обеспечивает выход готового концентрата на уровне 65.5% от массы белка в исходном сырье.

5. **Подтверждены преимущества технологии**: разработанный биотехнологический метод характеризуется низкой энергоемкостью, отсутствием агрессивных химических реагентов, применением щадящих режимов обработки, сохраняющих нативную структуру белка, и возможностью полной переработки вторичных продуктов.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана инновационная и экологичная биотехнологическая платформа получения белкового концентрата из фасоли. Ключевыми достоинствами предложенного метода являются:

1. Применение направленного ферментативного катализа для селективной элиминации балластного крахмала [10, 17].
2. Оптимизация регламентных параметров процесса, обеспечивающая высокую степень гидролиза (76%) при минимальной продолжительности (4 ч).
3. Исключение из технологического цикла агрессивных химических реагентов.
4. Использование мягкого режима сушки, способствующего сохранению нативной конформации белковых молекул [15].
5. Низкая энергоемкость и замкнутость производственного цикла с возможностью переработки вторичных ресурсов [12].

Разработанная технология представляет значительный практический интерес для пищевой промышленности и может быть использована для выпуска функциональных пищевых ингредиентов с высоким содержанием белка [8, 9, 11].

Литература

1 Мазыкина Е.А., Зеленский Г.Л. Фасоль обыкновенная (Phaseolus vulgaris L.) как перспективная сельскохозяйственная культура (обзор) // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. 2025. № 208. С. 6.

2 Кияшко Н.В., Дуденко Г.А., Федореева О.Е. Качество пищевой продукции как один из факторов продовольственной безопасности // Продовольственная безопасность: прошлое, настоящее, будущее. 2023. № 2. С. 255.

3 Fang B., Peng Z., Chen B., Rao J. Unconventional sources of vegetable proteins: Technological properties // Current Opinion in Food Science. 2024. V. 57. P. 101150. doi: 10.1016/j.cofs.2024.101150

4 Nilghaz A., Mahdi Mousavi S., Amiri A. et al. Surface-enhanced Raman spectroscopy substrates for food safety and quality analysis // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2022. V. 70. № 18. P. 5463–5476. doi: 10.1021/acs.jafc.1c07979

5 Алексашина С.А., Белозёрова В.А. Использование альтернативного растительного сырья при производстве молочнокислых продуктов питания на основе растительных белков // Инновации и продовольственная безопасность. 2025. № 1. С. 6–22.

6 Jiménez D.J., Öztürk B., Wei R. et al. Merging plastics, microbes, and enzymes: highlights from an international workshop // Applied and Environmental Microbiology. 2022. V. 88. № 14. P. e00721-22. doi: 10.1128/aem.00721-22

7 Kurek M.A., Onopiuk A., Pogorzelska-Nowicka E. et al. Novel protein sources for applications in meat-alternative products—Insight and challenges // Foods. 2022. V. 11. № 7. P. 957. doi: 10.3390/foods11070957

8 Орловская Т.В., Шатров Л.Н. Исследование функционально-технологических свойств белковых концентратов из нетрадиционного растительного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. № 4. С. 45–52.

9 Попелнюх Т.В., Зыбина О.В. Влияние ферментативной модификации на структурно-механические характеристики белково-углеводных систем бобовых культур // Известия вузов. Пищевая технология. 2020. № 2–3 (374–375). С. 56–59.

10 Донченко Л.В., Васильев А.А., Соболь И.В. и др. Тенденции в разработке пищевых добавок и биологически активных добавок к пище // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4.

11 Das R., Kayastha A.M. An overview on starch processing and key enzymes // Industrial Starch Debranching Enzymes. 2023. P. 1–20. doi: 10.1016/B978-0-323-99836-3.00001-9

12 Messina V., Skylas D.J., Roberts T.H. et al. Pulse Proteins: Processing, Nutrition, and Functionality in Foods // Foods. 2025. V. 14. № 7. P. 1151. doi: 10.3390/foods14071151

13 Náthia-Neves G., Getachew A.T., Santana Á.L., Jacobsen C. Legume Proteins in Food Products: Extraction Techniques, Functional Properties, and Current Challenges // Foods. 2025. V. 14. № 9. P. 1626. doi: 10.3390/foods14091626

14 Sun H., Sun J., Dou N. et al. Characterization and comparison of structure, thermal and functional characteristics of various commercial pea proteins // Food Bioscience. 2023. V. 53. P. 102740. doi: 10.1016/j.fbio.2023.102740

15 Gupta R.K. Legumes: An Overview // Gupta R.K., Gupta N., Bansal S. (eds.) Pulses: Processing and Product Development. Springer, 2020. P. 1–30. doi: 10.1007/978-3-030-38252-0_1

16 Thirulogasundar A., Shi D., Stone A.K. et al. Effect of enzyme hydrolysis on the functionality, protein quality, and flavour profile of lentil and chickpea protein isolates // Journal of Food Measurement and Characterization. 2024. V. 18. P. 1592–1609. doi: 10.1007/s11694-023-02228-5

17 Qin P., Wang T., Luo Y. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development // Journal of Agriculture and Food Research. 2022. V. 7. P. 100265. doi: 10.1016/j.jafr.2021.100265

18 Renzetti S., Smid E.J. The role of enzymes in the design of healthy and sustainable foods // Current Opinion in Food Science. 2022. V. 48. P. 100914. doi: 10.1016/j.cofs.2022.100914

19 Бикбулатов П.С., Чугунова О.В., Заворохина Н.В. Анализ современного рынка растительных белков и технологических решений их получения // Вестник КрасГАУ. 2025. № 5 (218). С. 244–260.

20 Fang B., Peng Z., Chen B., Rao J. Unconventional sources of vegetable proteins: Technological properties // Current Opinion in Food Science. 2024. V. 57. P. 101150. doi: 10.1016/j.cofs.2024.101150

21 Hong S., Shen Y., Li Y. Physicochemical and Functional Properties of Texturized Vegetable Proteins and Cooked Patty Textures: Comprehensive Characterization and Correlation Analysis // Foods. 2022. V. 11. № 17. P. 2619. doi: 10.3390/foods11172619

22 Goldstein N., Reifen R. The potential of legume-derived proteins in the food industry // Grain & Oil Science and Technology. 2022. V. 5. № 4. С. 167–178. doi: 10.1016/j.gaost.2022.07.001

References

1 Mazy kina E.A., Zelensky G.L. Common Bean (Phaseolus vulgaris L.) as a Promising Agricultural Crop (Review). Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2025. no. 208. p. 6. (in Russian).

2 Kiyashko N.V., Dudenko G.A., Fedoreeva O.E. Quality of Food Products as One of the Factors of Food Security. Food Security: Past, Present, Future. 2023. no. 2. p. 255. (in Russian).

3 Fang B., Peng Z., Chen B., Rao J. Unconventional sources of vegetable proteins: Technological properties. Current Opinion in Food Science. 2024. vol. 57. article 101150. doi: 10.1016/j.cofs.2024.101150.

4 Nilghaz A., Mahdi Mousavi S., Amiri A. et al. Surface-enhanced Raman spectroscopy substrates for food safety and quality analysis. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2022. vol. 70. no. 18. pp. 5463–5476. doi: 10.1021/acs.jafc.1c07979.

5 Aleksashina S.A., Belozerova V.A. The Use of Alternative Plant Raw Materials in the Production of Lactic Acid Food Products Based on Plant Proteins. Innovations and Food Security. 2025. no. 1. pp. 6–22. (in Russian).

6 Jiménez D.J., Öztürk B., Wei R. et al. Merging plastics, microbes, and enzymes: highlights from an international workshop. Applied and Environmental Microbiology. 2022. vol. 88. no. 14. article e00721-22. doi: 10.1128/aem.00721-22.

7 Kurek M.A., Onopiuk A., Pogorzelska-Nowicka E. et al. Novel protein sources for applications in meat-alternative products—Insight and challenges. Foods. 2022. vol. 11. no. 7. article 957. doi: 10.3390/foods11070957.

8 Orlovskaya T.V., Shatrov L.N. Study of Functional and Technological Properties of Protein Concentrates from Non-Traditional Plant Raw Materials. Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2019. no. 4. pp. 45–52. (in Russian).

9 Popelnyukh T.V., Zybina O.V. Influence of Enzymatic Modification on Structural and Mechanical Characteristics of Protein-Carbohydrate Systems of Legumes. News of Universities. Food Technology. 2020. no. 2–3 (374–375). pp. 56–59. (in Russian).

10 Donchenko L.V., Vasiliev A.A., Sobol I.V. et al. Trends in the Development of Food Additives and Biologically Active Food Supplements. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 4. (in Russian).

11 Das R., Kayastha A.M. An overview on starch processing and key enzymes. In: Industrial Starch Debranching Enzymes. 2023. pp. 1–20. doi: 10.1016/B978-0-323-99836-3.00001-9.

12 Messina V., Skylas D.J., Roberts T.H. et al. Pulse Proteins: Processing, Nutrition, and Functionality in Foods. Foods. 2025. vol. 14. no. 7. article 1151. doi: 10.3390/foods14071151.

13 Náthia-Neves G., Getachew A.T., Santana Á.L., Jacobsen C. Legume Proteins in Food Products: Extraction Techniques, Functional Properties, and Current Challenges. Foods. 2025. vol. 14. no. 9. article 1626. doi: 10.3390/foods14091626.

14 Sun H., Sun J., Dou N. et al. Characterization and comparison of structure, thermal and functional characteristics of various commercial pea proteins. Food Bioscience. 2023. vol. 53. article 102740. doi: 10.1016/j.fbio.2023.102740.

15 Gupta R.K. Legumes: An Overview. In: Gupta R.K., Gupta N., Bansal S. (eds.) Pulses: Processing and Product Development. Springer, 2020. pp. 1–30. doi: 10.1007/978-3-030-38252-0_1.

16 Thirulogasundar A., Shi D., Stone A.K. et al. Effect of enzyme hydrolysis on the functionality, protein quality, and flavour profile of lentil and chickpea protein isolates. Journal of Food Measurement and Characterization. 2024. vol. 18. pp. 1592–1609. doi: 10.1007/s11694-023-02228-5.

17 Qin P., Wang T., Luo Y. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. Journal of Agriculture and Food Research. 2022. vol. 7. article 100265. doi: 10.1016/j.jafr.2021.100265.

18 Renzetti S., Smid E.J. The role of enzymes in the design of healthy and sustainable foods. Current Opinion in Food Science. 2022. vol. 48. article 100914. doi: 10.1016/j.cofs.2022.100914.

19 Bikbulatov P.S., Chugunova O.V., Zavorokhina N.V. Analysis of the Modern Market of Plant Proteins and Technological Solutions for Their Production. Bulletin of KrasGAU. 2025. no. 5 (218). pp. 244–260. (in Russian).

20 Fang B., Peng Z., Chen B., Rao J. Unconventional sources of vegetable proteins: Technological properties. Current Opinion in Food Science. 2024. vol. 57. article 101150. doi: 10.1016/j.cofs.2024.101150.

21 Hong S., Shen Y., Li Y. Physicochemical and Functional Properties of Texturized Vegetable Proteins and Cooked Patty Textures: Comprehensive Characterization and Correlation Analysis. Foods. 2022. vol. 11. no. 17. article 2619. doi: 10.3390/foods11172619.

22 Goldstein N., Reifen R. The potential of legume-derived proteins in the food industry. Grain & Oil Science and Technology. 2022. vol. 5. no. 4. pp. 167–178. doi: 10.1016/j.gaost.2022.07.001.

Сведения об авторах

Владимир И. Манжесов д.с-х.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, mavik62_62@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0468-8821

Светлана Ю. Чурикова к.с.-х.н., доцент, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, , ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, sveta-ch-vz@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-9210-9852

Артур А. Айрапетян к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, , ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, hayrapetyan.arthur1@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8053-4317

Светлана Ф. Яковлева к.т.н., доцент, кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, svetlana.yakovleva.68@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3686-9966

Information about authors

Vladimir I. Manzhesov Dr. Sci. (Chem.), professor, technology of storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina St., 1, Voronezh, 394087, Russia, mavik62_62@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0468-8821

Svetlana Y. Churikova Cand. Sci. (Chem.), docent, technology of storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina St., 1, Voronezh, 394087, Russia, sveta-ch-vz@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-9210-9852

Arthur A. Hayrapetyan Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, technology of storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina St., 1, Voronezh, 394087, Russia, hayrapetyan.arthur1@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8053-4317

Svetlana F. Yakovleva Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Biochemistry and Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, svetlana.yakovleva.68@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3686-9966

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 18/12/2025	**После редакции** 08/01/2026	**Принята в печать** 26/01/2026
Received 18/12/2025	**Accepted in revised** 08/01/2026	**Accepted** 26/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-219-225 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.854:621.365.5. Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Формирование математической модели процесса сушки яблок

Ольга К. Безотосова [1] e-mail@m.ru введите здесь orcid
Марина А. Беляева [1] belyaevamar@mail.ru 0000-0001-5259-8698
1 Российского экономического университета им. Г.В.Плеханова, Стремянный переулок, 36 г. Москва, 109992 Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы совершенствования процесса сушки яблок как одного из наиболее распространённых способов консервирования плодоовощного сырья, обеспечивающего сохранение пищевой ценности продукта, расширение сроков хранения и удобство транспортировки. Обоснована актуальность применения электрофизических методов нагрева – сверхвысокочастотного (СВЧ), инфракрасного (ИК) и конвективного, а также их комбинаций – в сравнении с традиционными способами сушки. Приведён обзор работ отечественных и зарубежных учёных в области тепло- и массообмена и электрофизической обработки растительного сырья. Цель работы – оптимизация процесса сушки яблок с минимизацией энергозатрат и максимизацией качественных показателей готового продукта. Для достижения поставленной цели предложены конструктивные проектные решения и оптимальное аппаратурное оформление процесса, разработан план эксперимента в виде матрицы из шести базовых факторов на четырёх уровнях варьирования: расстояние от объекта до излучателей, толщина образца, начальная температура камеры и образца, начальная масса сырья и продолжительность сушки. В качестве функций оптимизации приняты продолжительность сушки, удельные энергозатраты, органолептическая оценка по пятибалльной шкале и потери массы продукта. Экспериментальные исследования проведены на лабораторной многофункциональной печи рабочим объёмом 24 л с фиксацией изменения массы образца в режиме реального времени. Математическая обработка результатов выполнена методом наименьших квадратов с проверкой адекватности по критерию значимости при 5%-ном уровне и построением обобщённой мультипликативной зависимости по формуле М.М. Протодьяконова. Установлено, что комбинированные режимы тепловой обработки обеспечивают наилучшее соотношение энергозатрат, продолжительности процесса и качественных показателей готовой продукции, соответствующих требованиям ГОСТ 32896–2014. Предложенное аппаратурное оформление и выявленные оптимальные режимы способствуют повышению производительности при одновременной загрузке сырья и получении качественного продукта.

Ключевые слова: яблоки, оптимизация, сушка, аппаратурное оформление, план эксперимента.

Formation of a mathematical model of the apple drying process

Olga K. Bezotosova [1] e-mail@m.ru введите здесь orcid
Marina A. Belyaeva [1] belyaevamar@mail.ru 0000-0001-5259-8698
1 Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane, 36, Moscow, 109992 Russia

Abstract. The article addresses the improvement of the apple drying process as one of the most widespread methods of preserving fruit and vegetable raw materials, ensuring retention of nutritional value, extended shelf life and convenient transportation. The relevance of applying electrophysical heating methods – microwave (MW), infrared (IR) and convective, as well as their combinations – is substantiated in comparison with traditional drying techniques. A review of studies by Russian and foreign scientists in the field of heat and mass transfer and electrophysical processing of plant raw materials is presented. The aim of the work is to optimize the apple drying process by minimizing energy consumption and maximizing the quality indicators of the finished product. To achieve this goal, design solutions and optimal hardware configuration of the process are proposed, and an experimental plan is developed in the form of a matrix of six basic factors at four levels of variation: distance from the object to the emitters, sample thickness, initial chamber and sample temperature, initial raw material mass and drying duration. The optimization functions include drying time, specific energy consumption, organoleptic assessment on a five-point scale and product mass loss. Experimental studies were carried out on a laboratory multifunctional oven with a 24 L working chamber with real-time recording of sample mass changes. Mathematical processing of the results was performed by the least squares method with adequacy verification using a significance criterion at the 5% level and construction of a generalized multiplicative dependence according to the M.M. Protodyakonov formula. It was established that combined heat treatment modes provide the best ratio of energy consumption, process duration and quality indicators of the finished product, meeting the requirements of GOST 32896–2014. The proposed hardware design and identified optimal modes contribute to increased productivity with simultaneous raw material loading and high-quality product output.

Keywords: apples, optimization, drying, hardware design, experiment plan.

Введение

Сушёное яблоко – сухофрукт, яблоки культурных и дикорастущих сортов, высушенные под воздействием солнечных лучей (естественная сушка) или в сушильных установках, в которых используются различные виды нагрева. Высушенные яблоки имеют эластичную консистенцию, не ломаются, не слипаются и не дают сока.

Сушёные яблоки имеют широкое применение: можно употреблять в сухом виде, добавлять в компоты, кисели, мюсли, выпечку или использовать в качестве начинки для пирогов и пирожков.

Для цитирования
Безотосова О.К., Беляева М.А. Формирование математической модели процесса сушки яблок // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 219–225. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-219-225

For citation
Bezotosova O.K., Belyaeva M.A. Formation of a mathematical model of the apple drying process. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 219–225. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-219-225

© 2026, Безотосова О.К. и др. / Bezotosova O.K. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

По калорийности сушеные яблоки практически в десять раз превышают свежий фрукт – 250 ккал, повышение пищевой ценности происходит из-за концентрации сахара. В 100 г сухофруктов содержится углеводов – 59 г; белков – 2,5 г; жиров – 0,1 г; сахара – 56 г; крахмала – 3,5 г; органических кислот – 2,5 г; пищевых волокон – 15г. Сушеные яблоки практически в максимальной степени сохраняют минеральные вещества, и витамины, содержащиеся в свежих плодах, исключение составляет аскорбиновая кислота, немного снижаются в процессе обработки. Среди витаминов, которыми богаты сухофрукты из яблок, выделяют А – 3 мкг; РР – 1,2 мг; Е – 1 мг; аскорбиновая кислота – 2 мг; рибофлавин – 0,04 мг; тиамин – 0,02 мг; бета-каротин – 0,02 мг.

Яблоки богаты железом, фосфором, калием, натрием, кальцием, поэтому сушеные яблоки включают в рацион питания как взрослого человека, так и маленьких детей.

Сушкой плодов и овощей занимаются как российские, так и зарубежные учёные разных стран, разрабатываются технологии сушки, изучаются влияние различных способов сушки на качество продуктов и совершенствуются оборудование для процесса сушки.

В развитие теории и техники электрофизического воздействия на сырье растительного и животного происхождения внесли вклад такие учёные как И.А. Рогов, А.С. Гинзбург, А.В. Лыков.

Сушкой плодоовощного сырья занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые. Agoua R., Ashtiani S., Barsotti L., Basset A., Kaur S., Kumar K., Liu Z., Nowak D., Salehi F., Tappi S., Toepfl S., Wang D., Wang J., Wiktor A., Zhu L. и др. внесли вклад в развитие техники и технологии переработки плодоовощного сырья с применением электрофизической и микроплазменной обработки [5, 6].

Для сушки плодовоовощной продукции используются различные методы, отличающиеся друг от друга классификационными признаками. Известны традиционные способы сушки пищевых продуктов, такие как естественная конвекционная сушка и искусственная конвекционная сушка. В настоящее время в мировой практике используются следующие способы искусственной сушки плодоовощного сырья: конвективный, сублимационный, СВЧ, кондуктивный, инфракрасный и другие. Наиболее распространенными являются методы, при которых высушиваемый продукт непосредственно контактирует с теплоносителем (нагретым воздухом или перегретым паром) и контактный метод способ (высушиваемый объект соприкасается с нагретым теплоносителем) [1, 2, 4, 7, 8].

Известны труды российских ученых: Н. Каухчешвили автор низкотемпературной вакуумной технологии сушки овощей, фруктов, ягод, В. Бочаров изучил влияние формы нарезки сырья и предварительной тепловой обработки на продолжительность сушки, качество готовой продукции, подтвердил целесообразность комбинации конвективного и микроволнового способов сушки.

Процесс сушки яблок позволяет значительно улучшить вкусовые и пищевые свойства данного продукта, повысить его качество, сделать более легкоусвояемым для употребления, а также увеличить сроки хранения продукта и облегчить его транспортировку [1].

Сушка – процесс принудительного удаления жидкости (чаще всего влаги/воды, реже иных жидкостей, например, летучих органических растворителей) из веществ и материалов.

На сегодняшний день имеются разные способы сушки фруктов и овощей, в том числе и яблок, как в домашних условиях, так и в промышленном масштабе, в малом и среднем бизнесе, а также имеется достаточно большой арсенал и выбор сушильного оборудования, однако встает вопрос о совершенствовании процесса сушки яблок и определении оптимальных температурных режимов, при которых используются энергосберегающие технологии, разрабатываются режимы, при которых минимизируем затраты и улучшаем качественные показатели.

Сушка яблок в промышленных условиях – метод консервации фруктов, который позволяет сохранить полезные свойства, вкус и текстуру яблок. Традиционный способ сушки на открытом воздухе (на солнце или в тени) не подходит для переработки больших объёмов яблок.

Для промышленной сушки яблок используют специализированные сушильные камеры или установки с вентиляторами и системами контроля температуры и влажности:

– конвекционная – яблоки помещаются в специальную камеру, где на них подаётся горячий воздух.

– инфракрасная – фрукты помещаются на специальный ленточный конвейер, который проходит через зону с инфракрасными лампами.

– вакуумная – яблоки помещаются в камеру с низким давлением, где происходит испарение воды.

– микроволновая – яблоки помещаются в специальные устройства, которые генерируют микроволновое излучение, что приводит к испарению влаги изнутри яблок.

Для промышленной сушки яблок используют сушилки: конвейерного типа – продукты размещаются на ленте, по мере движения ленты проходят через несколько нагревательных тунелей, при сушке используют лотки – фрукты размещаются на лотках, горячий воздух

подаётся сверху и снизу лотков, чтобы обеспечить равномерную просушку каждого фрукта, вакуумные – под воздействием мощного вакуумного насоса и системы клапанов фрукты теряют влагу за короткое время, распылительные – обработанная жидкая фруктовая мякоть закачивается в сопло, которое распыляет её в тонкие капли, которые попадают в плотный поток горячего воздуха в сушильной камере, где быстро теряют влагу. Технология промышленной сушки яблок включает стадии подготовку сырья – яблоки моют, очищают от кожуры и сердцевины, нарезают на тонкие ломтики или дольки (оптимальная нарезка – 5–6 мм), предварительная обработка – перед сушкой яблоки могут обрабатывать горячим воздухом, парообработкой, кратковременным кипячением в слабом растворе консерванта, сушка – яблоки раскладывают на специальных лотках, отправляют в сушильную камеру. Температура и время сушки зависят от вида оборудования, но, как правило, процесс длится не менее чем 12 часов при температуре 50–60 градусов и охлаждение – после окончания сушки сушёные яблоки охлаждают.

Процесс промышленной сушки яблок регламентируется межгосударственным стандартом ГОСТ 32896–2014 – «Фрукты сушёные. Общие технические условия».

На основе проведенного анализа нормативно-технической документации, существующего сушильного оборудования, патентного поиска и анализа современных технологий сушки были поставлены цели и задачи исследований.

Цель работы – оптимизировать процесс сушки с минимизацией энергозатрат и максимизацией качественных показателей. Для этого решались следующие задачи: проведение экспериментальных исследований по сушке яблок, выявление факторов, влияющих на качественные показатели, а также выявление наиболее приемлемого способа для сушки яблок.

Материалы и методы

Нами были проведены экспериментальные исследования по влиянию различных видов нагрева на процесс сушки яблок: за факторы были приняты различная толщина нарезки яблок, расстояние до излучателей, начальная масса и температура образца исследования, начальная температура в рабочей камеры сушильной установки.

Экспериментальные исследования проводились с целью определения оптимального режима сушки при разных способах подвода энергии. Работа проводилась с использованием лабораторной многофункциональной печи с камерой рабочий объем 24 л, в которой предусмотрены различные режимы нагрева представлена на (рисунок 1).

Через отверстие в верхней стенке печи проходит термостойкая нить, на которой подвешивается чаша с высушиваемым образцом. Верхний конец нити крепится к нижнему подвесу электронных цифровых весов для фиксации изменения влажности в процессе тепловой обработки 5.

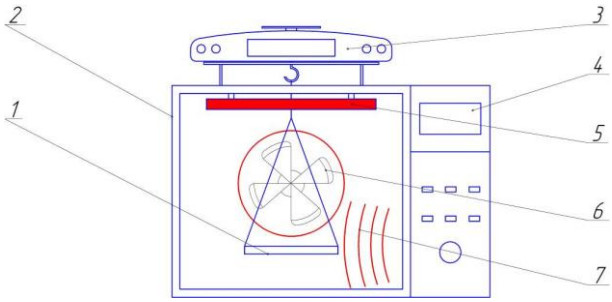


Рисунок 1. Схема лабораторного экспериментального стенда: 1 – чаша с высушиваемым образцом, 2 – корпус рабочей камеры, 3 – электронные весы для фиксации изменения массы в процессе сушки, 4 – индикатор температуры, 5 – инфракрасные нагревательные элементы, 6 – калорифер для конвективного нагрева, 7 – магнетрон для реализации СВЧ-нагрева, 8 – рабочая камера, 9 – таймер времени

Figure 1. The scheme of the laboratory experimental stand: 1 – a bowl with a dried sample, 2 – the body of the working chamber, 3 – electronic scales for recording mass changes during the drying process, 4 – a temperature indicator, 5 – infrared heating elements, 6 – a heater for convective heating, 7 – a magnetron for microwave heating, 8 – a working camera, 9 – time timer

Для экспериментов использовались яблоки свежие разных помологических сортов яблок. Сорта, которые различаются по ряду биологических признаков, в том числе вкусу, химическому составу, срокам хранения, способности к транспортировке. Условно помологические сорта делят на летние, осенние и зимние по срокам созревания, культивируемые в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ Р 34314–2017. «Яблоки свежие, реализуемые в розничной торговле. Технические условия». Актуализация стандарта была проведена 01.01.2024.

В промышленных сушильных аппаратах температуру рабочей камеры варьируют в диапазоне от 35 до 45 °С. Также можно использовать метод изменения температурного режима, многостадийный.

Можно сушить яблоки при температуре около 75 градусов для образования «корочки» на поверхности, а затем снижать температуру на 45–50 °С или наоборот, сначала использовать небольшую температуру, затем увеличивать, варьируя также продолжительность сушки, в зависимости от того, что должно получиться на выходе.

Сушка образцов проводилась с использованием различных способов: сверхвысокочастотный, инфракрасный, конвективный и комбинациями данных способов.

План эксперимента представлял матрицу, состоящую из шести базовых факторов и четырех уровнях, каждый показатель имел многократное измерение: изменение массы образца за определенные промежутки времени, а также температура внутри рабочей камеры. Образцы яблок были осеннего сорта.

Таблица 1.

Факторы и уровни варьирования (инфракрасный нагрев)

Table 1.

Factors and levels of variation (infrared heating)

Факторы | Index	Уровень | Level			
	1	2	3	4
Расстояние от объекта исследования до излучателей h, см Distance from test object to emitters h, cm	5	10	15	20
Толщина образца, см | Sample thickness, cm	5	8	12	15
Начальная температура в камере T, °C | Initial chamber temperature T, °C	80	85	90	95
Начальная температура образца, °C | Initial sample temperature, °C	4	6	12	18
Начальная масса образца | Initial sample mass	30	35	40	45
Продолжительность сушки, минуты | Drying time, minutes	6	8	12	16
Энергозатраты, кВт-час. кг рубли | Energy consumption, kWh, kg, rubles				
Оценка качественных показателей, Балл | Quality indicator rating, points				
Потери массы, % | Mass loss, %				

За функции для оптимизации приняты следующие параметры: Y_1 – продолжительность сушки, мин; Y_2 – энергетические затраты на сушку, кВт· ч/кг; Y_3 – органолептическая оценка, балл; Y_4 – потери в массе продукта, %.

В качестве объекта исследования использовались свежие яблоки, соответствующие указанным нормам: плоды были здоровыми, целыми, свежими, чистыми и без повреждений сельскохозяйственными вредителями.

Таблица 2.

Влияние различных способов нагрева на качественные показатели сушенных яблок

Table 2.

The influence of various heating methods on the quality indicators of dried apples

Высота слайса, мм Slice height, mm	Начальная температура, °C Initial temperature, °C	Начальная масса сырья, г Initial raw material weight, g	Температура после тепловой обработки, °C Temperature after heat treatment, °C	Масса после тепловой обработки, г Weight after heat treatment, g	Режим тепловой обработки | Heat treatment mode	Потери массы Weight loss	Время обработки, секунды Processing time, seconds	Органолептическая оценка (пятибалльная шкала) Organoleptic assessment (five-point scale)
8	23,1	17,78	62,9	16,05	СВЧ	1,73 г 9,73%	20	Полупрозрачное, запах печеного яблока, мягкое, не деформируется при сжатии; Внешний вид – 4, запах – 4, цвет – 3 | Translucent, baked apple scent, soft, does not deform when squeezed; Appearance – 4, Odor – 4, Color – 3
12	22,9	8,72	36	8,48	ИК	0,24 г 2,75%	180	Темное, мало отличается по виду от необработанного, нет запаха печеного яблока, есть корочка, твердое; Внешний вид – 3, запах – 3, цвет – 3 | Dark, little different in appearance from untreated, no baked apple scent, crust present, firm; Appearance – 3, Odor – 3, Color – 3
13	22,8	14,37	32,8	13,77	Конвекция	0,6 г 4,175%	180	Аналогично второму объекту | Similar to the second item
11	22,6	9,33	66,4	6,38	СВЧ + Конвекция	2,95 г 3,16%	60	Полупрозрачное, есть корочка, запах печеного яблока, мягкое; Цвет – 4, запах – 4, внешний вид – 3 | Translucent, crust present, baked apple scent, soft; Color – 4, Odor – 4, Appearance – 3
14	22,7	15,25	73,9	12,33	СВЧ + ИК	2,92 г 19,15%	60	Полупрозрачное, очень мягкое, склонно к деформации при сжатии; Внешний вид – 3, запах – 4, цвет – 4 | Translucent, very soft, prone to deformation when squeezed; Appearance – 3, Odor – 4, Color – 4

Основным стандартом РФ, регулирующим требования к сушёным яблокам, является ГОСТ 32896–2014 «Фрукты сушёные». Согласно стандарту, внешний вид и форма сушёных яблок должны соответствовать следующим характеристикам: целые сушёные плоды с косточкой или без неё; половинки сушёных плодов правильной круглой или овальной формы со слегка завернутыми краями; неповреждённая кожица; допускаются кружки (боковые срезы), полноценные по мякоти; плоды не должны слипаться при сжатии; допускается комкование полуфабриката, устраняемое лёгким механическим воздействием; вкус и запах должны быть свойственными данному виду фруктов, без посторонних примесей; лёгкий запах сернистого ангидрида допускается для обработанных продуктов; окраска – от светло-жёлтой до светло-кремовой, допускается розоватый оттенок, характерный для некоторых сортов.

В таблице 2 приведены режимы, в которых использованы разные виды нагрева. По результатам эксперимента представленных в таблице 2, установлено, что цвет обработанных образцов соответствовал требованиям стандарта: образцы № 1, 4 и 5 имели светло-жёлтый оттенок, а образцы № 2 и 3 – близкий к кремовому. Образцы не слипались при сжатии, за исключением образца № 5, склонного к пластическим деформациям. Запах всех образцов соответствовал нормам.

Таблица 3.

Матрица планирования эксперимента

Table 3.

Experiment planning matrix

n	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	5	5	80	4	30	6
2	10	8	85	6	35	8
3	15	12	90	12	40	12
4	20	15	95	18	45	16
5	5	15	95	6	35	12
6	10	8	90	12	45	16
7	15	15	85	18	30	6
8	20	5	80	4	40	8
9	5	8	85	6	40	8
10	10	12	90	12	45	12
11	15	5	95	18	35	16
12	20	15	80	4	30	6
13	5	12	95	12	35	8
14	10	15	80	18	40	12
15	15	12	90	6	45	16
16	20	15	95	4	40	12
17	5	15	85	18	30	16
18	10	12	80	12	35	6
19	15	5	90	6	45	8
20	20	8	95	4	40	12

Матрица планирования эксперимента может быть дополнена разными факторами, функции – результаты каждого опыта можно получить либо расчетным путем, либо в процессе эксперимента получить с использованием соответствующих современных контрольно-измерительных приборов.

Заключение

Математическая обработка результатов эксперимента следующая: структура матрицы планирования такова, что при проведении всех экспериментов каждый уровень любого фактора встречается один раз для каждого уровня всех остальных факторов. Для этого каждый уровень каждого фактора в эксперименте задается столько раз, сколько принято уровней. Этим достигается усреднение действия любого фактора Эмпирические формулы для описания частных зависимостей качества готовых изделий, энергозатрат, продолжительности процесса сушки и потерь массы в зависимости от параметров ИК – облучения, начальной температуры в камере, начальной толщины образца получены в результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ методом наименьших квадратов. Органолептические показатели готовой продукции оценивались по пятибалльной шкале и по пяти показателям (внешний вид, цвет, запах, консистенция, вкус), согласно ГОСТ 16431–70 «Балльный способ выражения показателей качества продукции»). В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов, были разработаны частные зависимости и определены значимости каждой частной функции, насколько каждые варьируемые уровни и диапазон исследуемых факторов–параметров, область ограничений и допустимых значений в которой разработанные модели реально действительны. Для проверки адекватности и обоснованности принятых параметров, проводилась проверка их значимости с определением доверительного интервала на основе коэффициента линейной корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1)\sum_1^N (Y_э - Y_m)^2}{(N-K-1)\sum_1^N \left(Y_э - Y_{„m}\right)^2}}$$

Критерий значимости для 5%-ного уровня:

$$t = \frac{R \cdot \sqrt{N-K-1}}{1-R^2}$$

где N – число описываемых точек; k – число действующих фак торов; YЭ – экспериментальный результат; YCP – среднее экспериментальное значение; YP – расчетный результат.

При N = 4, k = 1 учитывается влияние только одного фактора. При этом Y совпадает с общим средним. Для получения обобщенного уравнения, описывающего процесс тепловой обработки мясных полуфабрикатов при ИК-облучении, использована мультипликативная формула, предложенная М.М. Протодьяконовым:

$$Y_{об} = \frac{\prod_{k=1}^{n} \cdot Y_k}{Y_{-p}^{n-1}}$$

где $Y_{об}$ – обобщенная функция; Y_i – частная функция. Как показал анализ расчетов и органолептическая оценка, прошедших сушку яблоки, с экономических позиций и с органолептической точки зрения наиболее лучшими были режимы, рекомендуемые в опыте 3.

Литература

1 Taghinezhad E., Kaveh M., Szumny A. et al. Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices // Scientific Reports. 2023. V. 13. № 1. P. 16152. doi: 10.1038/s41598-023-43358-6

2 Rasooli Sharabiani V., Kaveh M., Abdi R. et al. Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling // Scientific Reports. 2021. V. 11. № 1. P. 9155. doi: 10.1038/s41598-021-88270-z

3 Demiray E., Yazar J.G., Aktok Ö. et al. The effect of drying temperature and thickness on the drying kinetic, antioxidant activity, phenolic compounds, and color values of apple slices // Journal of Food Quality. 2023. V. 2023. P. 7426793. doi: 10.1155/2023/7426793

4 Zhu L., Ji X., Yang H. et al. Heat pump technology in the field of fruit and vegetable drying: A review // Foods. 2025. V. 14. № 15. P. 2569. doi: 10.3390/foods14152569

5 Dehghannya J., Habibi-Ghods M. Microwave drying of food materials: Principles, hybrid techniques, modeling approaches, and emerging innovations // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2025. V. 24. № 6. P. e70312. doi: 10.1111/1541-4337.70312

6 Беляева М.А., Еремин А.Е., Безотосова О.К. Перспективные разработки многофункционального оборудования // Пищевая промышленность. 2022. № 4. С. 59–62. doi: 10.52653/PPI.2022.4.4.010

7 Belyaeva M.A., Gajour A.A., Koroleva E.I. et al. Introduction of innovative ways of drying mushrooms // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1052. № 1. P. 012038. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012038

8 Huang X., Li W., Wang Y., Wan F. Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics and moisture diffusivity study of apple slices using infrared conveyor-belt dryer // Journal of Food Science. 2024. V. 89. № 3. P. 1658–1671. doi: 10.1111/1750-3841.16967

9 Huang X., Li Y., Zhou X. et al. Prediction of apple slices drying kinetic during infrared-assisted-hot air drying by deep neural networks // Foods. 2022. V. 11. № 21. P. 3486. doi: 10.3390/foods11213486

10 Bai J.W., Zhang L., Aheto J.H. et al. Effects of different pretreatment methods on drying kinetics, three-dimensional deformation, quality characteristics and microstructure of dried apple slices // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2023. V. 83. P. 103216. doi: 10.1016/j.ifset.2022.103216

11 Adelusi O.A., Aworh O.C., Tarafdar A. et al. Investigation of the effects of infrared and hot air oven drying methods on drying behaviour and colour parameters of red delicious apple slices // Processes. 2023. V. 11. № 10. P. 3027. doi: 10.3390/pr11103027

12 Motevali A., Hashemi S.J., Tabatabaeekoloor R., Salarikia A. Enhancing energy efficiency and retention of bioactive compounds in apple drying: comparative analysis of combined hot air–infrared drying strategies // Applied Sciences. 2023. V. 13. № 13. P. 7612. doi: 10.3390/app13137612

13 Martynenko A., Bashkir I. The effect of material thickness, load density, external airflow, and relative humidity on the drying efficiency and quality of EHD-dried apples // Foods. 2022. V. 11. № 18. P. 2765. doi: 10.3390/foods11182765

14 Zhu R., Jiang S., Li D. et al. Dehydration of apple slices by sequential drying pretreatments and airborne ultrasound-assisted air drying: study on mass transfer, profiles of phenolics and organic acids and PPO activity // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2022. V. 75. P. 102871. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102871

15 Ciurzyńska A., Trusińska M., Rybak K. et al. The influence of pulsed electric field and air temperature on the course of hot-air drying and the bioactive compounds of apple tissue // Molecules. 2023. V. 28. № 7. P. 2970. doi: 10.3390/molecules28072970

16 Kidoń M., Grabowska J. Bioactive compounds, antioxidant activity, and sensory qualities of red-fleshed apples dried by different methods // LWT – Food Science and Technology. 2021. V. 136. P. 110302. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110302

17 Antal T. Effect of combined drying on the physical properties and bioactive components of 'Jonathan' apple (Malus domestica L.) // Acta Alimentaria. 2023. V. 52. № 4. P. 538–548. doi: 10.1556/066.2023.00191

18 Kavak Akpinar E., Toraman S. Effect of drying methods on energy and exergy analysis, drying kinetics and quality parameters of apple slices // Heat and Mass Transfer. 2022. V. 58. P. 1437–1454. doi: 10.1007/s00231-022-03212-5

19 Усманова К.А. Исследование современных методик сушки яблок в стационарном и нестационарном режиме в условиях сухого жаркого климата // Universum: технические науки. 2024. Т. 5. № 2 (119). С. 63–64.

20 Байда Б.Ю., Гатицкий Д.В. Исследование характеристик сушки ломтиков яблок при комбинированной сушке с использованием теплового насоса // Материалы пула научно-практических конференций. 2023. С. 167–172.

References

1 Taghinezhad E., Kaveh M., Szumny A. et al. Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices. Scientific Reports. 2023. vol. 13. no. 1. article 16152. doi: 10.1038/s41598-023-43358-6.

2 Rasooli Sharabiani V., Kaveh M., Abdi R. et al. Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. Scientific Reports. 2021. vol. 11. no. 1. article 9155. doi: 10.1038/s41598-021-88270-z.

3 Demiray E., Yazar J.G., Aktok Ö. et al. The effect of drying temperature and thickness on the drying kinetic, antioxidant activity, phenolic compounds, and color values of apple slices. Journal of Food Quality. 2023. vol. 2023. Article 7426793. doi: 10.1155/2023/7426793.

4 Zhu L., Ji X., Yang H. et al. Heat pump technology in the field of fruit and vegetable drying: A review. Foods. 2025. vol. 14. no. 15. article 2569. doi: 10.3390/foods14152569.

5 Dehghannya J., Habibi-Ghods M. Microwave drying of food materials: Principles, hybrid techniques, modeling approaches, and emerging innovations. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2025. vol. 24. no. 6. Article e70312. doi: 10.1111/1541-4337.70312.

6 Belyaeva M.A., Eremin A.E., Bezotosova O.K. Promising Developments of Multifunctional Equipment. Food Industry. 2022. no. 4. pp. 59–62. doi: 10.52653/PPI.2022.4.4.010 (in Russian).

7 Belyaeva M.A., Gajour A.A., Koroleva E.I. et al. Introduction of innovative ways of drying mushrooms. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. vol. 1052. no. 1. article 012038. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012038.

8 Huang X., Li W., Wang Y., Wan F. Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics and moisture diffusivity study of apple slices using infrared conveyor-belt dryer. Journal of Food Science. 2024. vol. 89. no. 3. pp. 1658–1671. doi: 10.1111/1750-3841.16967.

9 Huang X., Li Y., Zhou X. et al. Prediction of apple slices drying kinetic during infrared-assisted-hot air drying by deep neural networks. Foods. 2022. vol. 11. no. 21. article 3486. doi: 10.3390/foods11213486.

10 Bai J.W., Zhang L., Aheto J.H. et al. Effects of different pretreatment methods on drying kinetics, three-dimensional deformation, quality characteristics and microstructure of dried apple slices. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2023. vol. 83. article 103216. doi: 10.1016/j.ifset.2022.103216.

11 Adelusi O.A., Aworh O.C., Tarafdar A. et al. Investigation of the effects of infrared and hot air oven drying methods on drying behaviour and colour parameters of red delicious apple slices. Processes. 2023. vol. 11. no. 10. article 3027. doi: 10.3390/pr11103027.

12 Motevali A., Hashemi S.J., Tabatabaeekoloor R., Salarikia A. Enhancing energy efficiency and retention of bioactive compounds in apple drying: comparative analysis of combined hot air–infrared drying strategies. Applied Sciences. 2023. vol. 13. no. 13. article 7612. doi: 10.3390/app13137612.

13 Martynenko A., Bashkir I. The effect of material thickness, load density, external airflow, and relative humidity on the drying efficiency and quality of EHD-dried apples. Foods. 2022. vol. 11. no. 18. article 2765. doi: 10.3390/foods11182765.

14 Zhu R., Jiang S., Li D. et al. Dehydration of apple slices by sequential drying pretreatments and airborne ultrasound-assisted air drying: study on mass transfer, profiles of phenolics and organic acids and PPO activity. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2022. vol. 75. article 102871. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102871.

15 Ciurzyńska A., Trusińska M., Rybak K. et al. The influence of pulsed electric field and air temperature on the course of hot-air drying and the bioactive compounds of apple tissue. Molecules. 2023. vol. 28. no. 7. article 2970. doi: 10.3390/molecules28072970.

16 Kidoń M., Grabowska J. Bioactive compounds, antioxidant activity, and sensory qualities of red-fleshed apples dried by different methods. LWT – Food Science and Technology. 2021. vol. 136. article 110302. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110302.

17 Antal T. Effect of combined drying on the physical properties and bioactive components of 'Jonathan' apple (Malus domestica L.). Acta Alimentaria. 2023. vol. 52. no. 4. pp. 538–548. doi: 10.1556/066.2023.00191.

18 Kavak Akpinar E., Toraman S. Effect of drying methods on energy and exergy analysis, drying kinetics and quality parameters of apple slices. Heat and Mass Transfer. 2022. vol. 58. pp. 1437–1454. doi: 10.1007/s00231-022-03212-5.

19 Usmanova K.A. Study of Modern Methods of Drying Apples in Stationary and Non-Stationary Modes in Dry Hot Climates. Universum: Technical Sciences. 2024. vol. 5. no. 2 (119). pp. 63–64. (in Russian).

20 Baida B.Yu., Gatitsky D.V. Study of Drying Characteristics of Apple Slices during Combined Drying Using a Heat Pump. Materials of the Pool of Scientific and Practical Conferences. 2023. pp. 167–172. (in Russian).

Сведения об авторах

Ольга К. Безотосова аспирант, кафедра пищевых технологий и биоинженерии, Российского экономического университета им. Г.В.Плеханова, Стремянный переулок, 36 г. Москва, 109992 Россия, e-mail@m.ru
https://orcid.org/введите здесь orcid
Марина А. Беляева д.т.н., профессор, кафедра пищевых технологий и биоинженерии, Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36 г. Москва, 109992 Россия, belyaevamar@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5259-8698

Information about authors

Olga K. Bezotosova graduate student, food technologies and bioengineering department, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane, 36, Moscow, 109992 Russia, e-mail@m.ru
https://orcid.org/введите здесь orcid
Marina A. Belyaeva Dr. Sci. (Engin.), professor, food technologies and bioengineering department, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane, 36, Moscow, 109992 Russia, belyaevamar@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5259-8698

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/11/2025 **После редакции** 18/01/2026 **Принята в печать** 10/02/2026

Received 11/11/2025 **Accepted in revised** 18/01/2026 **Accepted** 10/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-226-232 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.923.034:613.2 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка и комплексная оценка качества комбинированных мясорастительных рубленых полуфабрикатов функционального назначения

Артур А. Айрапетян [1] hayrapetyan.arthur1@mail.ru 0000-0001-8053-4317
Светлана Ю. Чурикова [1] sveta-ch-vz@ya.ru 0000-0001-9210-9852
Владимир И. Манжесов [1] mavik62_62@mail.ru 0000-0002-0468-8821
Татьяна С. Ковалева [2] tatianakovaleva2501@ya.ru 0000-0002-3531-3811

1 Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Настоящая работа сконцентрирована на создании новых видов рубленых полуфабрикатов мясорастительной группы, обладающих усовершенствованными свойствами. В рамках исследований был выполнен детальный анализ того, как частичная субституция мясного сырья композитной смесью из гречневой муки и пищевых волокон воздействует на основные параметры качества готового продукта. Результаты показали, что коррекция рецептуры ведет к оптимизации химического состава: увеличению удельного веса белка на 16% и сокращению доли жира на 5,6%. Показатель аминокислотного скора по триптофану в модифицированном образце составил 170%, что указывает на его повышенную биологическую полноценность. Проведенная органолептическая экспертиза не обнаружила статистически достоверных расхождений между контрольной и опытной группами. Для углубленного анализа сенсорных характеристик впервые был задействован метод пьезокварцевой микрогравиметрии, который дал возможность зафиксировать изменения в ароматическом профиле и определить наиболее эффективную концентрацию функциональных ингредиентов. Данные микроструктурного анализа подтвердили усиление структурно-механических свойств образцов с модифицированной рецептурой. Созданный продукт отвечает установленным нормативам для пищевых продуктов, относящихся к категории функциональных. В работе представлены результаты комплексной оценки качества мясорастительных полуфабрикатов, включающей определение химического состава, аминокислотной сбалансированности, органолептических характеристик, ароматических профилей методом пьезокварцевой микрогравиметрии и микроструктурного анализа. Экспериментально обоснована оптимальная дозировка композитной растительной добавки, составляющая 10% от массы сырья, при которой достигается максимальное сохранение сенсорных свойств при значительном улучшении нутриентного профиля. Результаты исследования имеют практическую значимость для предприятий мясоперерабатывающей отрасли, ориентированных на расширение ассортимента продукции здорового питания с улучшенными потребительскими свойствами.

Ключевые слова: мясорастительные полуфабрикаты, функциональные пищевые ингредиенты, гречневая мука, аминокислотный скор, сенсорная оценка, пьезокварцевая микрогравиметрия, питательная ценность, продукты для здорового рациона.

Development and comprehensive quality assessment of combined meat-and-vegetable chopped semi-finished functional products

Arthur A. Hayrapetyan [1] hayrapetyan.arthur1@mail.ru 0000-0001-8053-4317
Svetlana Y. Churikova [1] sveta-ch-vz@ya.ru 0000-0001-9210-9852
Vladimir I. Manzhesov [1] mavik62_62@mail.ru 0000-0002-0468-8821
Tatiana S. Kovaleva [2] tatianakovaleva2501@ya.ru 0000-0002-3531-3811

1 Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurin str., Voronezh, 394087, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This study focuses on creating new types of minced semi-finished meat-and-vegetable products with improved properties. The study included a detailed analysis of how partial substitution of meat raw materials with a composite mixture of buckwheat flour and dietary fiber affects the key quality parameters of the finished product. The results showed that recipe adjustments optimized the chemical composition: a 16% increase in protein content and a 5.6% reduction in fat content. The amino acid score for tryptophan in the modified sample was 170%, indicating its increased biological value. Organoleptic testing revealed no statistically significant differences between the control and experimental groups. For an in-depth analysis of sensory characteristics, piezoelectric quartz microgravimetry was used for the first time, enabling the recording of changes in the aroma profile and the determination of the most effective concentration of functional ingredients. Microstructural analysis data confirmed enhanced structural and mechanical properties of the samples with the modified recipe. The resulting product meets established standards for functional foods. The study presents the results of a comprehensive quality assessment of meat-plant semi-finished products, including determination of chemical composition, amino acid balance, organoleptic characteristics, and aroma profiles using piezoelectric quartz microgravimetry and microstructural analysis. The optimal dosage of the composite plant additive, amounting to 10% of the raw material weight, was experimentally validated to ensure maximum preservation of sensory properties while significantly improving the nutrient profile. The study's results have practical significance for meat processing companies focused on expanding their range of healthy food products with improved consumer properties.

Keywords: meat-and-vegetable semi-finished products, functional food ingredients, buckwheat flour, amino acid score, sensory evaluation, quartz crystal microgravimetry, nutritional value, healthy diet products.

Для цитирования
Айрапетян А.А., Чурикова С.Ю., Манжесов В.И., Ковалева Т.С. Разработка и комплексная оценка качества комбинированных мясорастительных рубленых полуфабрикатов функционального назначения // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 226–232. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-226-232

For citation
Hayrapetyan A.A., Churikova S.Yu., Manzhesov V.I., Kovaleva T.S. Development and comprehensive quality assessment of combined meat-and-vegetable chopped semi-finished functional products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 226–232. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-226-232

© 2026, Айрапетян А.А. и др. / Hayrapetyan A.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Современная парадигма развития пищевой отрасли нацелена на производство продуктов, которые целенаправленно способствуют укреплению здоровья человека [1, 2]. В мясоперерабатывающем секторе одним из ключевых трендов является создание комбинированных систем на основе мяса и растительных компонентов, что позволяет осуществлять рациональное использование ресурсов и корректировать нутриентный состав конечной продукции [3, 4]. Инкорпорация растительных ингредиентов в рецептуры мясных изделий способствует их обогащению пищевыми волокнами, витаминно-минеральными комплексами, а также снижению энергетической ценности и объема животных жиров [5, 6].

Особого внимания заслуживает применение гречневой муки, которая отличается высокой концентрацией сбалансированного по аминокислотам белка и наличием рутина [7]. Комбинация данного компонента с препаратами пищевых волокон дает возможность не только повысить питательную ценность, но и целенаправленно изменять структурно-реологические параметры фаршевых матриц [8].

Цель работы – теоретическое обоснование рецептуры и всестороннее изучение потребительских характеристик комбинированных рубленых полуфабрикатов, произведенных с включением гречневой муки и пищевых волокон.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выступали образцы рубленых полуфабрикатов в форме биточков:

Контрольный образец (К) – изготовлен в соответствии с классической рецептурой.

Опытный образец (О) – произведен с частичной заменой мясного сырья на композитную смесь (гречневая мука + препарат пищевых волокон), прошедшую стадию предварительной гидратации.

В процессе работы использовался комплекс актуальных физико-химических и сенсорных методик:

Стандартизированные методики анализа химического состава (определение влаги, белка, жира, золы) [9].

Органолептический анализ по специализированной балльной шкале, учитывающей внешний вид, консистенцию, вкусовые и ароматические характеристики.

Изучение аминокислотного состава с помощью системы капиллярного электрофореза «Капель-105». Расчет аминокислотного скора производился в соответствии с эталонным профилем ФАО/ВОЗ [10].

Анализ сенсорных профилей аромата методом пьезокварцевого микровзвешивания на анализаторе «МАГ-8», оснащенном многокомпонентной сенсорной матрицей [11].

Гистологический анализ микроструктурных особенностей на срезах, окрашенных гематоксилином и эозином.

Результаты и их обсуждение

1. Изучение химического состава и нутриентной плотности

Включение в рецептуру функциональных компонентов (гречневой муки и пищевых волокон) в гидратированной форме, а также сокращение доли мясного сырья в опытном образце привели к статистически значимым трансформациям его химического состава (таблица 1).

Таблица 1.

Химический состав комбинированных мясорастительных полуфабрикатов

Table 1.

Chemical composition of combined meat-vegetable semi-finished products

Продукт Product	Массовая доля, % Mass fraction, %			
	Влага wet	Белок Protein	Жир Fat	Зола Ash
Контроль биточки «Праздничные» Meatball Control "Holiday"	65,4	13,1	19,6	1,9
Полуфабрикат мясорастительный биточки «Домашние» Semi-finished meat and vegetable cutlets "Homemade"	64,9	15,2	18,5	1,4

Согласно представленным данным, в опытном образце зарегистрирован прирост массовой доли белка на 16% и уменьшение содержания липидов на 5,6%. Указанные изменения, совместно с введением пищевых волокон, способствуют уменьшению энергетической ценности и росту нутриентной плотности продукта, что согласуется с принципами современной диетологии [12] и дает основания классифицировать разработанный продукт как изделие с улучшенным составом.

2. Органолептические свойства

Проведенная органолептическая оценка полуфабрикатов, модифицированных гречневой мукой и препаратом пищевых волокон, не выявила существенных расхождений между опытными и контрольными образцами по ключевым сенсорным дескрипторам.

Полученные данные, представленные в таблице 2, свидетельствуют о сохранении высоких потребительских характеристик продукции.

Отсутствие статистически значимой разницы, по интегральной оценке, ($p > 0,05$) свидетельствует о корректности проведенной модификации рецептуры. Несколько более высокий балл по параметру «сочность» у опытного образца (6,5 балла), вероятно, объясняется гигроскопичностью введенных растительных ингредиентов.

Таблица 2.

Органолептическая оценка мясорастительных полуфабрикатов

Table 2.

Organoleptic evaluation of meat and vegetable semi-finished products

Наименование продукта Name product	Показатели | Indicators						Общая оценка Overall rating
	Внешний вид Appearance	Вид и цвет на разрезе Appearance and color on section	Запах Smell	Вкус Taste	Консистенция Consistency	Сочность Juiciness	
Контроль биточки «Праздничные» Control of the "Holiday" cutlets	8,2	7,8	7,0	7,9	9,0	6,0	7,2
Полуфабрикат мясорастительный биточки «Домашние» | Semi-finished meat and vegetable cutlets "Homemade"	8,0	8,0	7,0	7,8	9,0	6,5	7,3

3. Оценка биологической ценности белка

Аминокислотный состав разработанного полуфабриката отличается повышенной сбалансированностью и биологической ценностью (таблица 3).

Анализ данных позволяет утверждать, что во всех изучаемых образцах аминокислотный скор по незаменимым аминокислотам превышал 100%. При этом в опытном образце отмечалась тенденция к росту данного индекса для большинства аминокислот, а скор по триптофану достиг 170%. Отсутствие лимитирующих аминокислот и высокие значения интегральных показателей (коэффициент рациональности аминокислотного состава – КРАС, биологическая ценность – БЦ) подтверждают высокую полноценность белковой составляющей [13].

Таблица 3.

Аминокислотный состав мясорастительных полуфабрикатов

Table 3.

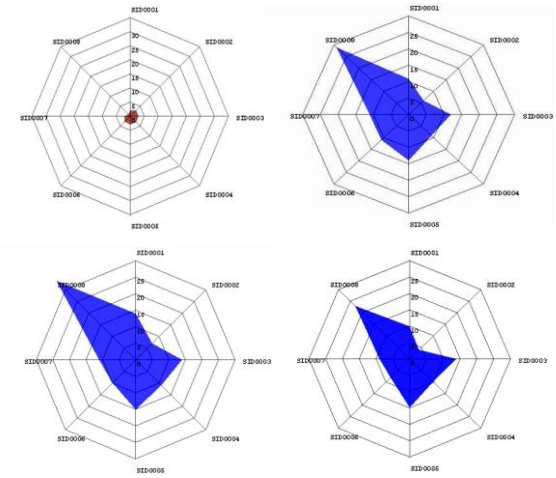
Amino acid composition of semi-finished meat and vegetable products

Аминокислоты Amino acid	Эталон ФАО/ВОЗ, г/100 г белка FAO/WHO reference value, g/100 g protein	Контроль биточки «Праздничные»		Биточки «Домашние»	
		г/100 г белка protein	аминокислотный скор, % score, %	г/100 г белка protein	аминокислотный скор, % score, %
Iso	4,0	4,60	115	4,85	121
Ley	7,0	8,70	124	9,33	133
Lys	5,5	7,21	131	7,58	134
Met + Cys	3,5	4,47	128	4,37	125
Phy+ Tyr	6,0	8,95	149	8,74	146
Rte	4,0	5,03	126	5,14	129
Tri	1,0	1,68	168	1,70	170
Val	5,0	5,25	105	5,33	107
КРАС, %		27,75		26,13	
БЦ, %		74,25		73,87	

4. Инструментальный анализ ароматических профилей

Для объективной верификации данных органолептического анализа был применен метод пьезокварцевого микровзвешивания.

Исследование «визуальных отпечатков» пиковых сигналов сенсоров (рисунок 1) позволило идентифицировать статистически значимые различия в качественной и количественной структуре равновесной газовой фазы (РГФ) над образцами.



РГФ над контролем и образцами 1–3

Рисунок 1. «Визуальные отпечатки» максимальных сигналов сенсоров в РГФ над тестируемыми пробами (по осям указаны номера сенсоров в матрице)

Figure 1. “Visual fingerprints” of the maximum sensor signals in the RGF over the tested samples (the numbers of sensors in the matrix are indicated on the axes)

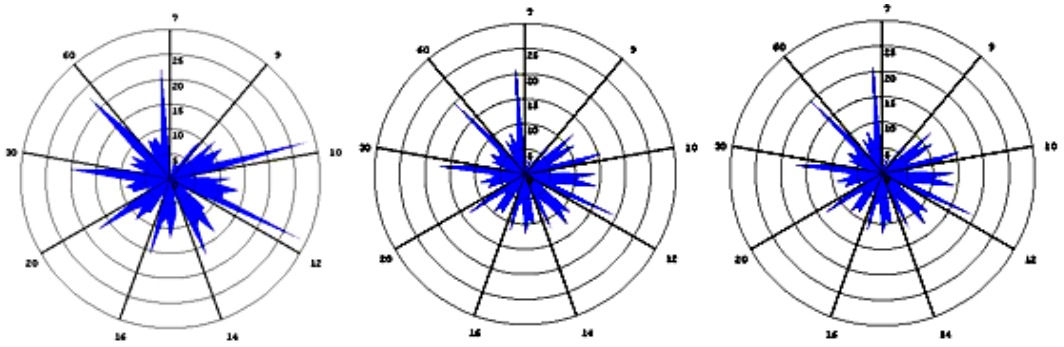
Было установлено, что РГФ контрольного образца (проба 1) характеризуется более высокой концентрацией легколетучих соединений по сравнению с опытной пробой 3. Количественная оценка интенсивности сенсорного отклика продемонстрировала вариацию данных показателей в интервале от 6 до 14%.

Более детальную информацию предоставили кинетические «визуальные отпечатки» (рисунок 2), которые продемонстрировали, что пробы 1 и 2 имеют сходную кинетику сорбции, в то время как состав легколетучей фракции пробы 3 имеет существенные отличия.

Установлено, что интродукция растительных добавок приводит к связыванию влаги и легколетучих фракций, а также к обогащению аромата более тяжелыми молекулами (амины, высшие спирты, сложные эфиры). Увеличение доли добавки (проба 3) вызывает существенное (на 30–36%) обеднение РГФ всеми группами легколетучих соединений, что необходимо учитывать для оптимизации рецептуры и сохранения сбалансированного ароматического букета.

5. Микроструктурные исследования

Гистологические исследования выявили позитивное влияние растительных компонентов на формирование структуры фаршевой системы (рисунок 3).



РГФ над контролем и образцами 1–3

Рисунок 2. Кинетические «визуальные отпечатки» запаха тестируемых проб (по кругу отмечено время измерения, с; по вертикальной оси – величина откликов массива сенсоров, Гц)

Figure 2. Kinetic “visual fingerprints” of the smell of the tested samples (the circle shows the measurement time, s; the vertical axis shows the magnitude of the sensor array response, Hz)

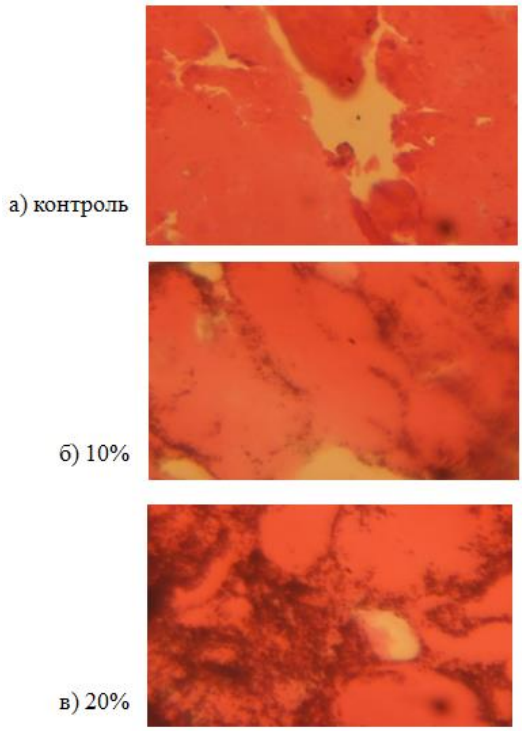


Рисунок 3. Микроструктура рубленых полуфабрикатов: (a) контрольный образец «Праздничные»; (b), (c) опытные образцы «Домашние» с разным содержанием добавки

Figure 3. Microstructure of chopped semi-finished products

В опытных образцах наблюдается более равномерное распределение жировых и белковых составляющих, а также формирование устойчивой пространственной структуры благодаря взаимодействию пищевых волокон с мышечными белками. Это согласуется с литературными данными об улучшении функционально-технологических свойств фаршевых систем при введении гидратированных растительных ингредиентов [8].

Выводы

1. Улучшение нутриентного профиля. Модификация рецептуры посредством частичной замены мясного сырья композитной растительной добавкой приводит к статистически значимому улучшению химического состава. В опытном образце зафиксировано увеличение массовой доли белка на 16% (до 15,2%) и снижение содержания жира на 5,6% (до 18,5%), что позволяет классифицировать разработанный продукт как изделие со сниженной калорийностью и повышенной пищевой ценностью.

2. Повышение биологической ценности. Установлено, что разработанный полуфабрикат характеризуется более сбалансированным аминокислотным составом. Аминокислотный скор по ключевым незаменимым аминокислотам в опытном образце превышает контрольные значения, а скор по триптофану достигает 170%.

Отсутствие лимитирующих аминокислот подтверждает высокую биологическую ценность белкового компонента продукта.

3. Сохранение высоких органолептических свойств. Органолептическая оценка не выявила негативного влияния рецептурной модификации на потребительские характеристики. Общая оценка опытного и контрольного образцов является статистически сопоставимой (7,3 и 7,2 балла соответственно), а по показателю «сочность» опытный образец продемонстрировал лучший результат (6,5 против 6,0 баллов).

4 Объективная идентификация модификации ароматического профиля.

Метод пьезокварцевого микровзвешивания подтвердил, что введение растительных ингредиентов индуцирует процессы связывания влаги и легколетучих фракций, одновременно обогащая ароматический букет более тяжелыми молекулярными соединениями. В ходе исследования было установлено, что повышенная дозировка добавки (20%) приводит к редукции общей интенсивности аромата, что обуславливает установление ее оптимальной массовой доли на уровне 10%.

5 Формирование улучшенной микроструктуры. Микроструктурные исследования подтвердили, что гидратированные растительные компоненты способствуют формированию более однородной и стабильной структуры фарша, равномерно распределяясь в белковой матрице и выступая в роли эффективных структурообразователей.

Таким образом, разработанный комбинированный мясорастительный полуфабрикат «Домашние» соответствует актуальным требованиям к продуктам здорового питания, характеризуется улучшенным химическим составом, высокой биологической ценностью и удовлетворительными органолептическими показателями, что подтверждает перспективность его промышленного производства.

Заключение

1. Научно обоснована и разработана рецептура комбинированного рубленого полуфабриката функциональной направленности с использованием гречневой муки и пищевых волокон.

2. Экспериментально доказано, что применение композитной растительной добавки позволяет улучшить нутриентный профиль продукта: увеличить содержание белка до 15,2%, снизить уровень жира до 18,5% и обеспечить сбалансированный аминокислотный состав.

3. Комплексная органолептическая и инструментальная оценка подтвердила соответствие потребительских свойств разработанного образца традиционному аналогу.

4. Метод пьезокварцевого микровзвешивания позволил объективно идентифицировать модификацию ароматического профиля и установить оптимальный уровень внесения функциональных ингредиентов.

5. Микроструктурный анализ свидетельствует о положительном влиянии рецептурной модификации на структурно-механические характеристики фарша.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать разработанный продукт для внедрения в производство в сегменте функциональных пищевых продуктов.

Литература

1 Alija D., Olędzki R., Nikolovska Nedelkoska D. et al. The addition of pumpkin flour impacts the functional and bioactive properties of soft wheat composite flour blends // Foods. 2025. V. 14. № 2. P. 243. doi: 10.3390/foods14020243

2 Штерман С.В., Голубкина Н.А. Современные тенденции в создании продуктов функционального питания // Пищевая промышленность. 2021. № 8. С. 18–22.

3 Jaworska D., Sadowka A. Strategies to improve the functional value of meat and meat products // Foods. 2024. V. 13. № 15. P. 2433. doi: 10.3390/foods13152433

4 Priya N.J., Chowdhury S., Chowdhury A., Yeasmin N. Effect of natural sweeteners on the physicochemical, nutritional, sensory, and microbiological properties of carrot-coconut gel pudding // International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology. 2025. V. 15. № 2. P. 30–38. doi: 10.3329/ijarit.v15i2.80095

5 Топорыгина А.В., Липатова Л.П. Перспективы использования растительных белков в мясной промышленности // Пищевая промышленность. 2020. № 5. С. 12–15.

6 Grasso S., Brunton N.P., Lyng J.G. et al. Healthy processed meat products – Regulatory, reformulation and consumer challenges // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 112. P. 332–346. doi: 10.1016/j.tifs.2021.03.051

7 Бучилина А.С., Гунькова П.И., Ишевский А.Л. и др. Функциональные и пребиотические свойства семян гречихи // Вестник Международной академии холода. 2021. № 4. С. 45–52.

8 Неверова О.А., Кузнецова Т.Ю. Влияние растительных добавок на реологические свойства мясных систем // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 110–116.

9 Ibrahim R.A., Maghraby O.M.A.L., Elmossalami M. et al. Determination of some food additives, chemical composition, bacteriological quality, and physicochemical examination of some meat products // Egyptian Journal of Chemistry. 2025. V. 68. № 1. P. 269–278. doi: 10.21608/ejchem.2024.281178.9679

10 Calvez J., Azzout-Marniche D., Tomé D. Protein quality, nutrition and health // Frontiers in Nutrition. 2024. V. 11. P. 1406618. doi: 10.3389/fnut.2024.1406618

11 Варивода С.С., Харитонов В.Д. Применение сенсорных анализаторов для контроля качества пищевых продуктов // Пищевые системы. 2021. Т. 4. № 1. С. 45–50.

12 Drewnowski A. The Nutrient Rich Foods Index helps to identify healthy, affordable foods // American Journal of Clinical Nutrition. 2010. V. 91. Iss. 4. P. 1095S–1101S. doi: 10.3945/ajcn.2010.28450E

13 Хайкин М.С., Семенова А.А. Биологическая ценность белков комбинированных систем // Вопросы питания. 2018. Т. 87. № 4. С. 5–12.

14 Lee S., Jo K., Jeon H. et al. Recent strategies for improving the quality of meat products // Journal of Animal Science and Technology. 2023. V. 65. № 5. P. 895. doi: 10.5187/jast.2023.e94

15 Камбарова А.С., Смольникова Ф.Х., Нурымхан Г.Н. и др. Исследование пищевой ценности многокомпонентной добавки из злаковых культур // Вестник КрасГАУ. 2022. № 4 (181). С. 155–163.

16 Sofi S.A., Ahmed N., Farooq A. et al. Nutritional and bioactive characteristics of buckwheat, and its potential for developing gluten-free products: An updated overview // Food Science & Nutrition. 2023. V. 11. P. 2256–2276. doi: 10.1002/fsn3.3166

17 Sonawane S., Shams R., Dash K.K. et al. Nutritional profile, bioactive properties and potential health benefits of buckwheat: A review // eFood. 2024. V. 5. № 4. P. e171. doi: 10.1002/efd2.171

18 Zhou F., Abdelshafy A.M., El-Shiekh R.A. et al. An updated and comprehensive review on the potential food applications and health benefits of buckwheat fermented with probiotic strains // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2025. P. 1–23. doi: 10.1080/10408398.2025.2588665

19 Adhikari S., Schop M., de Boer I.J., Huppertz T. Protein quality in perspective: a review of protein quality metrics and their applications // Nutrients. 2022. V. 14. № 5. P. 947. doi: 10.3390/nu14050947

20 Leroy F., Smith N.W., Adesogan A.T. et al. The role of meat in the human diet: evolutionary aspects and nutritional value // Animal Frontiers. 2023. V. 13. № 2. P. 11–18. doi: 10.1093/af/vfac093

References

1 Alija D., Olędzki R., Nikolovska Nedelkoska D. et al. The addition of pumpkin flour impacts the functional and bioactive properties of soft wheat composite flour blends. Foods. 2025. vol. 14. no. 2. article 243. doi: 10.3390/foods14020243.

2 Shterman S.V., Golubkina N.A. Modern Trends in the Creation of Functional Food Products. Food Industry. 2021. no. 8. pp. 18–22. (in Russian).

3 Jaworska D., Sadowka A. Strategies to improve the functional value of meat and meat products. Foods. 2024. vol. 13. no. 15. article 2433. doi: 10.3390/foods13152433.

4 Priya N.J., Chowdhury S., Chowdhury A., Yeasmin N. Effect of natural sweeteners on the physicochemical, nutritional, sensory, and microbiological properties of carrot-coconut gel pudding. International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology. 2025. vol. 15. no. 2. pp. 30–38. doi: 10.3329/ijarit.v15i2.80095.

5 Toporygina A.V., Lipatova L.P. Prospects for the Use of Plant Proteins in the Meat Industry. Food Industry. 2020. no. 5. pp. 12–15. (in Russian).

6 Grasso S., Brunton N.P., Lyng J.G. et al. Healthy processed meat products – Regulatory, reformulation and consumer challenges. Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 112. pp. 332–346. doi: 10.1016/j.tifs.2021.03.051.

7 Buchilina A.S., Gunkova P.I., Ishevsky A.L. et al. Functional and Prebiotic Properties of Buckwheat Seeds. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2021. no. 4. pp. 45–52. (in Russian).

8 Neverova O.A., Kuznetsova T.Yu. Influence of Plant Additives on the Rheological Properties of Meat Systems. Bulletin of VSUET. 2020. vol. 82. no. 1. pp. 110–116. (in Russian).

9 Ibrahim R.A., Maghraby O.M.A.L., Elmossalami M. et al. Determination of some food additives, chemical composition, bacteriological quality, and physicochemical examination of some meat products. Egyptian Journal of Chemistry. 2025. vol. 68. no. 1. pp. 269–278. doi: 10.21608/ejchem.2024.281178.9679.

10 Calvez J., Azzout-Marniche D., Tomé D. Protein quality, nutrition and health. Frontiers in Nutrition. 2024. vol. 11. article 1406618. doi: 10.3389/fnut.2024.1406618.

11 Varivoda S.S., Kharitonov V.D. Application of Sensory Analyzers for Food Quality Control. Food Systems. 2021. vol. 4. no. 1. pp. 45–50. (in Russian).

12 Drewnowski A. The Nutrient Rich Foods Index helps to identify healthy, affordable foods. American Journal of Clinical Nutrition. 2010. vol. 91. iss. 4. pp. 1095S–1101S. doi: 10.3945/ajcn.2010.28450E.

13 Khaykin M.S., Semenova A.A. Biological Value of Proteins of Combined Systems. Problems of Nutrition. 2018. vol. 87. no. 4. pp. 5–12. (in Russian).

14 Lee S., Jo K., Jeon H. et al. Recent strategies for improving the quality of meat products. Journal of Animal Science and Technology. 2023. vol. 65. no. 5. article 895. doi: 10.5187/jast.2023.e94.

15 Kambarova A.S., Smolnikova F.Kh., Nurymkhan G.N. et al. Study of the Nutritional Value of a Multicomponent Additive from Cereals. Bulletin of KrasGAU. 2022. no. 4 (181). pp. 155–163. (in Russian).

16 Sofi S.A., Ahmed N., Farooq A. et al. Nutritional and bioactive characteristics of buckwheat, and its potential for developing gluten-free products: An updated overview. Food Science & Nutrition. 2023. vol. 11. pp. 2256–2276. doi: 10.1002/fsn3.3166.

17 Sonawane S., Shams R., Dash K.K. et al. Nutritional profile, bioactive properties and potential health benefits of buckwheat: A review. eFood. 2024. vol. 5. no. 4. article e171. doi: 10.1002/efd2.171.

18 Zhou F., Abdelshafy A.M., El-Shiekh R.A. et al. An updated and comprehensive review on the potential food applications and health benefits of buckwheat fermented with probiotic strains. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2025. pp. 1–23. [Online first]. doi: 10.1080/10408398.2025.2588665.

19 Adhikari S., Schop M., de Boer I.J., Huppertz T. Protein quality in perspective: a review of protein quality metrics and their applications. Nutrients. 2022. vol. 14. no. 5. article 947. doi: 10.3390/nu14050947.

20 Leroy F., Smith N.W., Adesogan A.T. et al. The role of meat in the human diet: evolutionary aspects and nutritional value. Animal Frontiers. 2023. vol. 13. no. 2. pp. 11–18. doi: 10.1093/af/vfac093.

Сведения об авторах

Артур А. Айрапетян к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, hayrapetyan.arthur1@mail.ru
https://orcid.org/Место для ввода текста.

Светлана Ю. Чурикова к.с.-х.н., доцент, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, sveta-ch-vz@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-9210-9852

Владимир И. Манжесов д.с-х.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, mavik62_62@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0468-8821

Татьяна С. Ковалева к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологии бродильных производств и виноделия, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tatianakovaleva2501@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-3531-3811

Information about authors

Arthur A. Hayrapetyan Cand. Sci. (Eng.), senior lecturer, technology of storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina St., 1, Voronezh, 394087, Russia, hayrapetyan.arthur1@mail.ru
https://orcid.org/Место для ввода текста.

Svetlana Y. Churikova Cand. Sci. (Agric.), docent, technology of storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina St., 1, Voronezh, 394087, Russia, sveta-ch-vz@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-9210-9852

Vladimir I. Manzhesov Dr. Sci. (Agric.), professor, head of department, technology of storage and processing of agricultural products departmen, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina St., 1, Voronezh, 394087, Russia, mavik62_62@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0468-8821

Tatiana S. Kovaleva Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, fermentation technology and winemaking department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tatianakovaleva2501@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-3531-3811

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 18/12/2025	**После редакции** 14/01/2026	**Принята в печать** 09/02/2026

Received 18/12/2025	**Accepted in revised** 14/01/2026	**Accepted** 09/02/2026

Химическая технология

Chemical Technology

DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-233-242 Оригинальная статья/Research article

УДК 678.073 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Динамически вулканизованные термоэластопласты на основе ПВДФ и БНКС-40 АМН

Виктория А. Черепанова, [1] usr21806@vyatsu.ru 0000-0002-0592-796X
Евгения С. Широкова [1] usr06779@vyatsu.ru 0000-0001-5735-3489
Сергей В. Фомин [1] rubber_zerg@mail.ru 0000-0003-0393-5613

1 Вятский государственный университет, ул Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия

Аннотация. Термоэластопласты – это материалы, обладающие уникальной двухфазной структурой, характеризующиеся одновременно эластичностью каучука и перерабатываемостью термопластов. Сегодня особое значение приобретают термоэластопласты, полученные методом динамической вулканизации (ДТЭП), демонстрирующие высокие эксплуатационные характеристики. Целью данной работы стало создание динамически вулканизованных термоэластопластов на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНКС-40АМН) и поливинилиденфторида (ПВДФ), содержащих перекисную вулканизующую систему, а также изучение влияния концентрации перекисной вулканизующей системы на структуру и свойства полученных материалов. Методами ИК-Фурье спектроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии изучена микроструктура полученных материалов. Показано, что увеличение степени вулканизации эластомерной фазы приводит к улучшению комплекса эксплуатационных характеристик: прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве, термостабильности и стойкости к агрессивным средам. Материалы демонстрируют отличную стойкость к воде, маслу и нефти и хорошую стойкость к бензину. Наилучшими характеристиками и целевой морфологией, при которой термопласт формирует сплошную матрицу, а сшитый эластомер диспергирован в ней в виде частиц, обладают образцы с содержанием вулканизующего агента 0,75 м.ч. Для данных образцов дополнительно определена стойкость к тепловому старению и способность к повторной переработке. Установлено, что изменение ключевых эксплуатационных характеристик после повторной переработки не превышает 10%. Полученные материалы соответствуют требованиям, предъявляемым к маслобензостойким композициям, и могут представлять интерес для использования в автомобилестроении, нефтяной и газовой промышленности, а использование для производства отечественного сырья (бутадиен-нитрильные каучуки производятся АО "СИБУР Холдинг" , а ПВДФ – АО "ГалоПолимер") обеспечивает импортозамещающий потенциал разработки.

Ключевые слова: термоэластопласты, поливинилиденфторид, бутадиен-нитрильный каучук, перекисная вулканизующая система, динамическая вулканизация.

Dynamically vulcanized thermoplastic elastomers based on PVDF and BNKS-40 AMN

Viktoria A. Cherepanova [1] usr21806@vyatsu.ru 0000-0002-0592-796X
Evgenia S. Shirokova [1] usr06779@vyatsu.ru 0000-0001-5735-3489
Sergey V. Fomin [1] rubber_zerg@mail.ru 0000-0003-0393-5613

1 Vyatka State University, Mockovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia

Abstract. Thermoplastic elastomers (TPEs) are materials possessing a unique two-phase structure that combines the elasticity of rubbers with the processability of thermoplastics. Today, TPEs produced by dynamic vulcanization (thermoplastic vulcanizates, TPVs), which demonstrate superior performance characteristics, are of particular importance. The aim of this work was to create dynamically vulcanized TPEs based on nitrile butadiene rubber (NBR-40 AMN) and polyvinylidene fluoride (PVDF) containing a peroxide curing system, as well as to study the influence of the peroxide system concentration on the structure and properties of the resulting materials. The microstructure of the obtained materials was studied using FTIR spectroscopy and differential scanning calorimetry. It has been shown that an increase in the degree of vulcanization of the elastomeric phase leads to an improvement in the complex of operational characteristics: tensile strength, elongation at break, thermal stability, and resistance to aggressive media. The materials demonstrate excellent resistance to water, oil, and petroleum, as well as good resistance to gasoline. Samples with a curing agent content of 0.75 phr possess the best characteristics and the target morphology, where the thermoplastic forms a continuous matrix and the cross-linked elastomer is dispersed within it as particles. For these samples, resistance to thermal aging and recyclability were additionally determined. It was found that the change in key performance characteristics after recycling does not exceed 10%. The obtained materials meet the requirements for oil- and fuel-resistant compositions and may be of interest for use in the automotive, oil, and gas industries. The use of domestic raw materials for their production (nitrile butadiene rubbers are produced by PJSC "SIBUR Holding," and PVDF is produced by JSC "GaloPolymer") ensures the import substitution potential of the development.

Keywords: thermoplastic elastomers, polyvinylidene fluoride, butadiene-nitrile rubber, peroxide curing system, dynamic vulcanization.

Для цитирования

Черепанова В.А., Широкова Е.С., Фомин С.В. Динамически вулканизованные термоэластопласты на основе ПВДФ и БНКС-40 АМН // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 233–242. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-233-242

For citation

Cherepanova V.A., Shirokova E.S., Fomin S.V. Dynamically vulcanized thermoplastic elastomers based on PVDF and BNKS-40 AMN. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 233–242. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-233-242

© 2026, Черепанова В.А. и др. / Cherepanova V.A. et al.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Термоэластопласты (ТЭП) занимают важное место среди современных полимерных материалов благодаря уникальной двухфазной структуре, обеспечивающей таким материалам эластичность каучука и перерабатываемость термопластов [1–4]. Особый интерес представляют ТЭП, полученные методом динамической вулканизации (ДТЭП), которые демонстрируют улучшенные эксплуатационные характеристики [5–8]. Суть процесса динамической вулканизации заключается в совмещении двух стадий: вулканизации каучуковой фазы и её смешения с термопластом в расплаве, что приводит к формированию уникальной морфологии – диспергированных сшитых частиц эластомера в непрерывной термопластичной матрице. Процесс динамической вулканизации был впервые описан Гесслером и Хаслеттом [9] в 1962 году. Их идея получила дальнейшее развитие и научное обоснование в исследованиях Фишера [10], заложив основы для создания материалов с исключительным комплексом свойств. По сравнению с обычными смесевыми ТЭП, ДТЭП демонстрируют превосходное упругое восстановление, повышенную термостойкость, сниженную остаточную деформацию [11]. Благодаря этим превосходным свойствам ДТЭП вызывают большой интерес в различных отраслях промышленности.

Первый коммерческий ДТЭП был изготовлен на основе этиленпропиленового каучука и полипропилена, разработанный компанией Monsanto (Exxon Mobil Corporation) в 1981 году, и относился к материалам общего назначения [12]. Однако растущие потребности промышленности, особенно в автомобильном секторе и нефтегазовой отрасли, стимулировали разработку специализированных маслобензостойких марок, способных сохранять свойства в экстремальных условиях [13–21].

Для создания таких маслобензостойких ДТЭП в качестве эластомерной фазы используют полярные каучуки, такие как силоксановые каучуки [14, 15], сополимер этилена и винилацетата (ЭВА) [16], бутадиен-нитрильные каучуки (БНКС) [17], а также их карбоксилированные [18] и гидрированные [19] модификации, фторкаучуки [20, 21].

В качестве термопластичной фазы используют полимеры, проявляющие стойкость к набуханию в агрессивных средах, например, полипропилен (ПП) [22, 23], акрилонитрилбутадиенстирол (АБС) [24], поливинилиденфторид (ПВДФ) [25, 26], полиамид (ПА) [27].

Выбор БНКС в качестве эластомерной составляющей для создания маслобензостойких ДТЭП наиболее перспективен как с технической, так и с экономической точки зрения, его высокая полярность, крупнотоннажность производства, обуславливают значительно более доступную ценовую позицию по сравнению с фторсодержащими и силоксановыми каучуками, позволяют получать экономически выгодные материалы, отвечающие требованию по масло- и бензостойкости [28].

Для обеспечения комплекса свойств эластомерная фаза в ДТЭП должна быть сшита (вулканизована).

Традиционно для вулканизации БНКС применяются три основных типа вулканизующих систем: сера, перекись и фенольные смолы [29]. Каждая из них обладает уникальным механизмом действия и оказывает прямое влияние на структуру и конечные свойства вулканизатов. Серная вулканизация является классическим методом, широко используемым для ненасыщенных каучуков. Она приводит к образованию полисульфидных мостиков между макромолекулами, что обеспечивает материалу высокую эластичность и хорошие прочностные показатели при комнатной температуре [30]. Однако основным недостатком серных систем является низкая термостабильность полученных связей, что ограничивает рабочую температуру материалов. При более высоких температурах происходит разрыв полисульфидных связей, ведущий к резкой деградации свойств. Вулканизация фенольными смолами позволяет создавать чрезвычайно стабильные углерод-углеродные связи, что придает материалам отличную термостойкость и стойкость к термоокислительному старению [30]. Несмотря на это, данный процесс требует высоких температур (порядка 180–200 °С) и значительного времени для завершения реакции, что создает риск термической деструкции каучука (а в случае ДТЭП – и термопластичной фазы) и усложняет технологический процесс. Перекисная вулканизация, инициируемая радикальным механизмом, также формирует прочные углерод-углеродные связи между макромолекулами каучука. Эти связи обладают значительно более высокой термостабильностью по сравнению с полисульфидными, что позволяет получать вулканизаты, сохраняющие эксплуатационные характеристики при температурах до 150–170 °С [29]. При этом технологические параметры процесса перекисной вулканизации являются менее жесткими по сравнению со смоляной системой.

Имеется ряд исследований, посвященных оценке влияния различных вулканизующих систем на структуру и свойства ДТЭП на основе бутадиен-нитрильного каучука: серной [31, 32], смоляной [24], перекисной [33, 34]. Так, в работе [31] было изучено влияние концентрации серной вулканизующей группы на физико-механические свойства ДТЭП на основе БНКС-18 и ПВХ. Показано, что дополнительная термическая обработка полученных образцов приводит к значительному повышению их маслостойкости. Однако следует отметить, что серные системы обеспечивают в основном базовый уровень эксплуатационных свойств без существенного улучшения термической стабильности материала. Перекисная вулканизующая система для ДТЭП на основе бутадиен-нитрильных каучуков была использована в [33, 34] и показала свою перспективность для создания термостойких и маслобензостойких материалов, поскольку она обеспечивает оптимальный баланс между высокими эксплуатационными свойствами, в первую очередь термостабильностью, и приемлемыми технологическими требованиями к проведению процесса [35].

Сочетание полярного бутадиен-нитрильного каучука, сшитого перекисной вулканизующей системой, и исключительно химически стойкого термопласта ПВДФ открывает возможность для создания материалов, отвечающих строгим требованиям к масло- и бензостойкости и термостойкости.

Кроме того, разработка таких высокотехнологичных материалов соответствует приоритетам, определенным в Прогнозе научно-технического развития Российской Федерации на период до 2030 года, где особое внимание уделяется созданию новых полимерных композиционных материалов с заданными свойствами, разработке импортозамещающих технологий в области специальной химической продукции и развитию ресурсо- и энергосберегающих производств [36]. Использование отечественных бутадиен-нитрильных каучуков (производятся на предприятиях АО «СИБУР-Холдинг») и ПВДФ (выпускается АО «Галополимер») позволяет получать материалы, отвечающие строгим требованиям к масло- и бензостойкости для создания ДТЭП. Такой подход способствует обеспечению технологического суверенитета России в области специальных полимерных материалов, что особенно важно для критических отраслей промышленности, включая нефтегазовый комплекс, оборонно-промышленный комплекс и транспортное машиностроение.

Целью настоящей работы является создание ДТЭП на основе БНКС-40 АМН и ПВДФ, содержащих перекисную вулканизующую систему, а также исследование влияния концентрации перекисной вулканизующей системы на структуру и свойства, полученных материалов.

Материалы и методы

Для приготовления динамически вулканизованного термоэластопласта были выбраны сополимер нитрила акриловой кислоты (36–40 %) и бутадиена–1,3 (бутадиен-нитрильный каучук БНКС-40 АМН производства ПАО «СИБУР Холдинг») и поливинилиденфторид (Фторопласт-2М марки А производства АО «ГалоПолимер»). В качестве вулканизующего агента использовался ди (2-трет-бутилпероксиизопропил) – бензол 40 % (перекись Retic 40 CC). ДТЭП были получены на роторном микросмесителе периодического действия «Brabender» объемом 0,1 литр. Схема процесса приготовления ДТЭП представлена на рисунке 1.

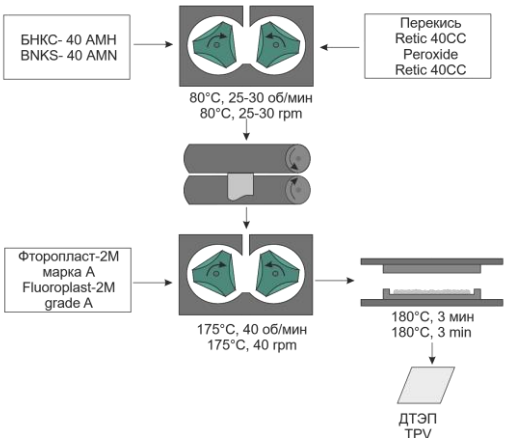


Рисунок 1. Схема процесса приготовления ДТЭП

Figure 1. Scheme of the process of preparation of TPV

Приготовление ДТЭП осуществлялось в два этапа. Первым этапом была подготовка эластомерной фазы, для чего в микросмеситель загружался каучук, пластицировался при 80 °С в течение 5 минут при скорости вращения роторов 25–30 об/мин, после чего вводилась перекись и проводилось смешение в течение 5 минут. Доработка смеси осуществлялась на вальцах резинообрабатывающих подогревательных ПД 320 160/160 (Полимермаш, Санкт-Петербург).

Следующим этапом было совмещение термопластичной и эластомерных фаз и динамическая вулканизация. В микросмеситель при скорости вращения роторов 40 об/мин и температуре 175 °С загружался ПВДФ, расплавлялся в течение 5 минут, после чего загружалась эластомерная фаза, смесь находилась в микросмесителе 6 минут при скорости 40 об/мин.

Для последующих испытаний образцы в форме пластин толщиной 2 мм получали прессованием на вулканизационном гидравлическом прессе при температуре 180 °С в течение 3 минут.

Структуру получаемых материалов характеризовали с помощью ИК-спектроскопии на ИК-Фурье-спектрометре «Инфралюм ФТ-801» (Россия) с применением метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Температуру плавления, а также степень кристалличности ПВДФ определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием прибора DSC-60 производства «Shimadzu» (Япония). Перед анализом образцы подвергали термообработке при 200 °С для устранения термической предыстории, после чего проводили нагрев со скоростью 10 °С/мин в диапазоне от 40 до 200 °С. Степень кристалличности рассчитывалась по общепринятым методикам; энтальпия плавления полностью кристаллизованного ПВДФ была принята 104,7 Дж/г [37,38].

Для изучения структуры вулканизационной сетки использовали метод равновесного набухания в о-ксилоле (квалификация «чистый для анализа» ТУ 2631–088–44493179–06) [39, 40].

Механические свойства композиций оценивали путем определения условной прочности при растяжении и удлинения при разрыве в соответствии со стандартом ASTM D638. Испытания выполняли на разрывной машине AGX фирмы «Shimadzu» (Япония) при комнатной температуре на образцах типа 4 при скорости растяжения 500 мм/мин. Данная машина оборудована термокамерой, позволяющей проводить тесты в условиях повышенных температур.

Твердость композиций оценивали согласно ASTM D2240 при помощи дюрометра типа А при комнатной температуре.

В соответствии со стандартом ISO 188:2013, испытания на ускоренное тепловое старение образцов ДТЭП проводились в сушильном шкафу ШС-80–01 СПУ (Россия). Согласно ГОСТ 9.024–74 были выбраны параметры испытаний: температура 100 °С, продолжительность 72 часа. После извлечения из шкафа образцы выдерживались при комнатной температуре в течение 24 часов, а затем оценивалось изменение условной прочности при растяжении.

Стойкость к воздействию сред оценивали по изменению массы образцов размером 10 х 10 х 2 мм в дистиллированной воде, бензине автомобильном марки ЭКТО-92 (АИ-92-К5) ГОСТ 32513–2013 (нефтебаза ООО «Тольяттинефтепродукт Сервис»), нефти (ПАО «Транснефть») и индустриальном масле марки И-40А ГОСТ 20799–88 (компания смазочных материалов ООО «ЛЛК-ИНТЕРНЕШНЛ») в течение 7 суток при комнатной температуре согласно ГОСТ 12020–2018.

Повторную промышленную переработку моделировали путем измельчения и гомогенизации образцов в микросмесителе при температуре 175 °С, скорости 40 об/мин в течение 5 минут.

Результаты и обсуждение

В результате проведенной работы были получены композиции, в которых соотношение эластомерной и термопластичной фаз составляло 50:50 (по массе). Дозировка перекиси составляла 0,0; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75 м.ч. на 100 м.ч. каучука.

Известно [41, 42], что для получения ДТЭП необходимо обеспечить обращение фаз: термопласт должен сформировать сплошную матрицу, а сшитый эластомер диспергирован в виде частиц. Образование непрерывной термопластичной фазы позволяет материалу размягчаться при нагреве и многократно перерабатываться, в то время как диспергированные сшитые частицы каучука ответственны за высокое упругое восстановление и низкую остаточную деформацию. Для оценки структуры полученных образцов использовали ИК-Фурье спектроскопию. На рисунке 2 представлены ИК-спектры полученных композиций. Данные спектры являются спектрами НПВО, поэтому характеризуют только поверхность исследуемых образцов.

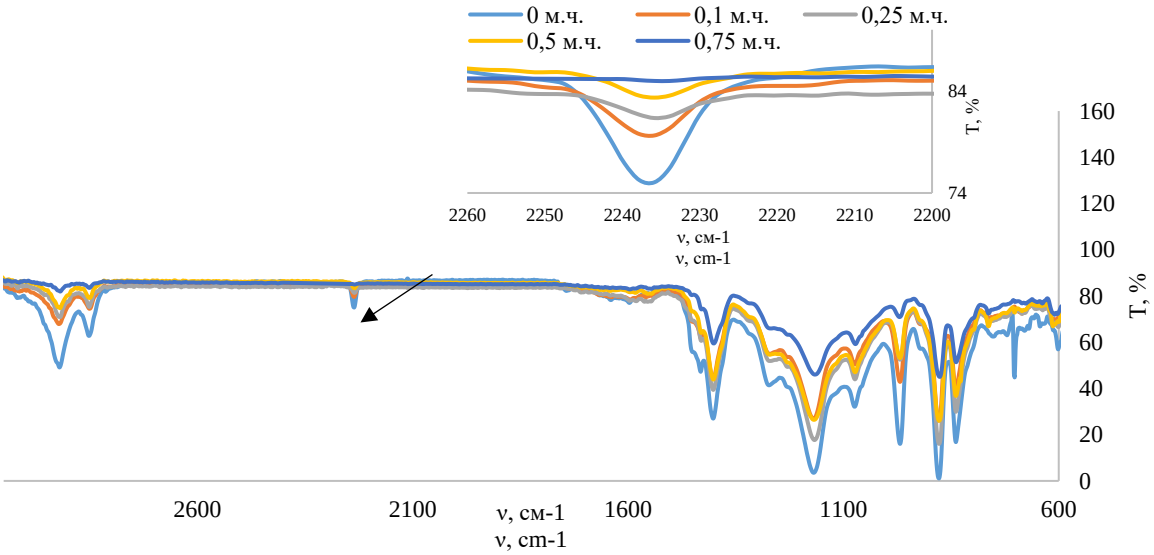


Рисунок 2. ИК-спектры исследуемых образцов с различным содержанием перекиси

Figure 2. IR-spectra of the studied samples with different peroxide content

На представленных ИК-спектрах наблюдается характерный для бутадиен-нитрильных каучуков пик при 2237 $см^{-1}$, соответствующий валентным колебаниям CN-групп. Интенсивность данного пика ослабевает по мере увеличения содержания вулканизующего агента, и при 0,75 м.ч. перекиси происходит полное исчезновение полосы поглощения при 2237 $см^{-1}$, что может свидетельствовать о том, что сплошную фазу образует термопласт – ПВДФ. Т.е. для образцов, содержащих 0,75 м.ч. перекиси формируется целевая структура ДТЭП.

Неизменность структуры ПВДФ в процессе динамической вулканизации подтверждали методом ДСК по данным о температуре плавления и степени кристалличности, т. к. любые превращения (например, сшивка термопластичной фазы) неизбежно нарушают кристаллическую структуру, что влечет за собой изменение указанных параметров. Кривые ДСК для исследуемых образцов, а также данные о температуре плавления и степени кристалличности представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

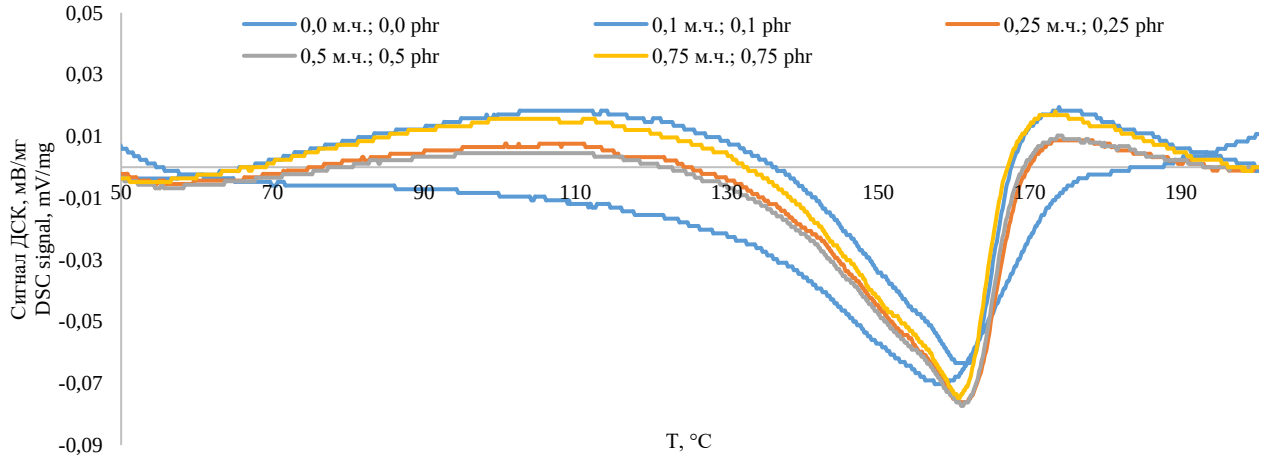


Рисунок 3. Кривые ДСК исследуемых образцов

Figure 3. DSC curves of the studied samples

Таблица 1.

Характеристики термопластичной и эластомерной фаз исследуемых образцов

Table 1.

Characteristics of thermoplastic and elastomer phases of the studied samples

Показатель | Index		Содержание перекиси, м.ч. на 100 м.ч. каучука Peroxide dosage, phr.				
		0	0,1	0,25	0,5	0,75
Термопластичная фаза Thermoplastic phase	Температура плавления, T_m,°C | Melting temperature, T_m, °C	157,95	161,31	161,33	161,25	160,64
	Степень кристалличности, χ_c, % | Crystallinity degree, χ_c, %	12,4	10,7	11,4	10,8	11,5
Эластомерная фаза Elastomeric phase	Плотность поперечного сшивания, $\nu \cdot 10^4$, моль/$см^3$ Cross-linking density, $\nu \cdot 10^4$, mol/cm^3	1,3	1,5	3,3	6,1	6,2
	Средняя молекулярная масса отрезка цепи, заключенного между двумя поперечными связями, *Mc*, г/моль The average molecular weight of a chain segment located between two cross-links, *Mc*, g/mol	7418	6560	2973	1624	1609
	Концентрация поперечных связей, $n \times 10^{-19}$, $см^{-3}$ Cross-link concentration, $n \times 10^{-19}$, cm^{-3}	4,0	4,6	10,0	18,0	19,0

При увеличении содержания вулканизующего агента в исследуемых образцах температура плавления и степень кристалличности практически не изменяются. Чуть большая степень кристалличности у образца без вулканизующего агента может быть связана с тем, что протекание динамической вулканизации замедляет процесс кристаллизации. Полученные данные подтверждают, что структура ПВДФ осталась без существенных изменений. Это однозначно свидетельствует о том, что перекись инициировала сшивку только молекул БНКС, не затронув ПВДФ.

Увеличение количества вулканизующего агента приводит к ожидаемому увеличению плотности поперечной сшивки, то есть увеличению степени вулканизации, в то время как средняя молекулярная масса между двумя соседними сшивками закономерно снижается.

Физико-механические характеристики при температуре 23 ± 2 °C, коэффициенты изменения условной прочности при +100 °C, стойкость к воздействию агрессивных сред полученных образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Свойства исследуемых образцов с различным содержанием перекиси

Table 2.

Properties of the studied samples with different peroxide contents

Показатель | Index		Содержание перекиси, м.ч. на 100 м.ч. каучука Peroxide dosage, phr				
		0	0,1	0,25	0,5	0,75
Условная прочность при растяжении, f_z, МПа Tensile strength, f_z, MPa		4,2	5,3	5,5	8,5	8,6
Напряжение при 100 % удлинении, f_{100}, МПа Stress at 100 % strain, f_{100}, MPa		3,9	5,2	-	7,6	7,2
Удлинение при разрыве, ε, % | Elongation at break, ε, %		165	135	95	175	217
Твердость по Шор А, ед. | Hardness (shore A), units		84	89	95	95	95
Коэффициент изменения условной прочности при +100 °С, $K_{100°C}$ Coefficient of change in tensile strength at 100 °C, $K_{100°C}$		0,29	0,30	0,35	0,42	0,44
Изменение массы образцов в различных средах, % Change of weight in different environments, %	Вода | Water	<1				
	Бензин | Motor gasoline	23,5	13,7	13,4	11,7	10,2
	Нефть | Petroleum	1,4	1,4	1,4	1,4	<1
	Масло |Industrial oil	3,2	1,2	<1		

С увеличением содержания перекиси в составе образцов отмечается рост физико-механических показателей полученных композиций. Наибольшие значения условной прочности при растяжении и удлинения при разрыве наблюдались у композиций, содержащих 0,5 и 0,75 м.ч. перекиси. С ростом содержания перекиси увеличивается стойкость к воздействию бензина, нефти и масла. При этом полученные образцы по шкале в соответствии с ГОСТ 12020–2018 имеют «отличную» стойкость к воде, нефти и маслу и «хорошую-удовлетворительную» к воздействию бензина.

Таким образом на основании комплексного исследования установлено, что для образцов с содержанием перекиси 0,75 м.ч. на 100 м.ч. каучука формируется целевая структура ДТЭП и наблюдается оптимальный комплекс характеристик.

В связи с этим для данной композиции была оценена стойкость к тепловому старению и сохранение упруго-прочностных свойств после повторной переработки. Полученные данные представлены в таблице 3. Необходимо отметить увеличение напряжения при 100 % удлинении (+6 %) и условной прочности (+8 %), обусловленное, предположительно, дополнительным структурированием ДТЭП. Данный процесс может протекать как вследствие термоокисления по 1,2 – структурам бутадиеновых звеньев бутадиен-нитрильного каучука, так и в результате поствулканизации каучуковой фазы, что характерно для динамически вулканизованных термоэластопластов. [43]. Однако в целом данные изменения незначительны.

Таблица 3.

Свойства образцов после ускоренного теплового старения и повторной переработки

Table 3.

Properties of samples after thermal aging and recycling

Показатель | Index	Значение | Value
Содержание перекиси, м.ч. на 100 м.ч. каучука Peroxide dosage, phr	0,75
Изменение свойств после старения при 100 °С за 72 ч, % | Change in properties after thermal aging at 100 °C for 72 h, %	
условная прочность | tensile strength	+8
относительное удлинение при разрыве | elongation at break	+9
напряжение при 100 % удлинении | stress at 100 % strain	+6
Изменение свойств после повторной переработки, % | Change in properties after recycling, %	
условная прочность | tensile strength	0
относительное удлинение при разрыве | elongation at break	+4
напряжение при 100 % удлинении | stress at 100 % strain	+6

Как уже отмечалось ранее, ключевым преимуществом ТЭП по сравнению с резинами, является возможность их повторной переработки, что, снижает количество отходов производства и потребления. Выявлено (таблица 3), что после цикла повторной переработки изменение ключевых эксплуатационных характеристик не превышают 10 %, что свидетельствует о высокой стабильности свойств.

Заключение

В результате проведенной работы установлено, что на основе каучука БНКС-40 АМН и ПВДФ может быть получен ДТЭП, стойкий к воде, бензину, маслу и нефти, который может быть переработан традиционными методами переработки расплавов полимеров. Методами ИК-Фурье спектроскопии и ДСК доказано, что при содержании перекиси 0,75 м.ч. формируется целевая морфология, при которой сшитые частицы эластомера диспергированы в непрерывной матрице термопласта, при этом кристаллическая структура ПВДФ остается неизменной. Установлено, что увеличение степени вулканизации эластомерной фазы приводит к значительному улучшению комплекса эксплуатационных характеристик. Подтверждена возможность повторной переработки полученного материала с сохранением комплекса значимых характеристик. Проведенные испытания подтвердили его практическую ценность. Полученный ДТЭП по комплексу свойств соответствует требованиям, предъявляемым к маслобензостойким резинам, и может рассматриваться в качестве перспективного материала для замены традиционных резин, сочетая при этом преимущества термопластичности с эксплуатационной долговечностью.

Литература

1 Le Hel C., Bounor-Legaré V., Catherin M., Lucas A. et al. TPV: A new insight on the rubber morphology and mechanic/elastic properties // Polymers. 2020. V. 12. № 10. doi: 10.3390/polym12102315

2 Вострякова Н.В. Свойства и применение термоэластопластов. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1979. 50 с.

3 Пол Д., Ньюмен С. Полимерные смеси / пер. с англ. под ред. Ю.К. Годовского. М.: Мир, 1981. Т. 2. С. 312–338.

4 Марк Дж., Эрман Б., Эйрич Ф. Каучук и резина. Наука и технология / пер. с англ. под ред. А.А. Берлина, Ю.Л. Морозова. М.: Интеллект, 2011. 767 с.

5 Koral P. Termoplastike vulkanizaty // Kozar strei. 1984. V. 34. № 8. P. 211–213.

6 Вольфсон С.И. Динамически вулканизованные термоэластопласты: получение, переработка, свойства. М.: Наука, 2004. 170 с.

7 Вольфсон С.И., Охотина Н.А., Нигматуллина А.И. Основные тенденции развития мирового и российского рынков нанотехнологий и нанокомпозитных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 7. С. 100–101.

8 Ning N., Li S., Wu H. et al. Preparation, microstructure, and microstructure-properties relationship of thermoplastic vulcanizates (TPVs): a review // Progress in Polymer Science. 2018. № 79. P. 61–97. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2017.11.003

9 Gessler A.M., Haslett W.H. Process for preparing a vulcanised blend of crystalline polypropylene and chlorinated butyl rubber. Пат. США № 3037954. 1962.

10 Fisher W.K. Thermoplastic blend of partially cured monoolefin copolymer rubber and polyolefin plastic. Пат. США № 3862106. 1973.

11 Cui Y., Li X., Ni H. et al. Sustainable, Processable, and Oil-Resistant Biodegradable Thermoplastic Elastomer via Dynamic Vulcanization // Macromolecules. 2025. V. 58. № 14. P. 7445–7456. doi: 10.1021/acs.macromol.5c00345

12 Li S., Tian H., Hu G.H., Ning N. et al. Effects of shear during injection molding on the anisotropic microstructure and properties of EPDM/PP TPV containing rubber nanoparticle agglomerates // Polymer. 2021. V. 229. P. 124008. doi: 10.1016/j.polymer.2021.124008

13 Kao-ian P., Banerjee S.S., Yudha S.S., Salaeh S. Strengthened Poly(vinylidene fluoride)/Epoxidized Natural Rubber Blend by a Reactive Compatibilizer Based on an Amino Acid-Modified Fluorocarbon Elastomer // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2024. V. 63. № 15. P. 6615–6631. doi: 10.1021/acs.iecr.3c04672

14 Li Q., Tang J. Reactive compatibilization of zinc dimethacrylate on dynamically vulcanized thermoplastic polyurethane/silicone rubber blends // Polymer Engineering and Science. 2025. V. 65. № 2. P. 539–549. doi: 10.1002/pen.27023

15 Wang Y., Gong Z., Xu C., Chen Y. Poly(vinylidene fluoride)/fluororubber/silicone rubber thermoplastic vulcanizates prepared through core-shell dynamic vulcanization: Formation of different rubber/plastic interfaces via controlling the core from "soft" to "hard" // Materials Chemistry and Physics. 2017. V. 195. P. 123–131. doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.04.016

16 Maghamirad G., Ghorbanzadeh Ahangari M., Karimi M., Hassani Niaki M. Effect of compatibilizer and polyhedral oligomeric silsesquioxane on mechanical, thermal, and morphological properties of polyamide6/poly(ethylene-co-vinyl acetate) composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2025. V. 44. № 17-18. P. 1036–1046. doi: 10.1177/07316844241235438

17 Huang J., Wu H., Wang X., Yu H. et al. Facile preparation of SAN/NBR TPV with balanced stiffness-toughness via metal-ligand coordination-induced dynamic vulcanization and in situ interfacial compatibilization // Polymer. 2024. V. 297. P. 126852. doi: 10.1016/j.polymer.2024.126852

18 Salaeh S., Das A., Wießner S. Design and fabrication of thermoplastic elastomer with ionic network: A strategy for good performance and shape memory capability // Polymer. 2021. V. 223. P. 123699. doi: 10.1016/j.polymer.2021.123699

19 Cui Z., Jing Y., Liu Y., Du A. Investigation on selective distribution of carbon nanotubes in thermoplastic vulcanizate (TPV) nanocomposites based on HNBR/TPEE and property optimization: road to functionalized applications // Polymer. 2025. V. 328. P. 128469. doi: 10.1016/j.polymer.2025.128469

20 Weijin S., Wentong L., Hao T. et al. Preparation and properties of silicone thermoplastic elastomer and its molecular dynamics study // Polymer Bulletin. 2024. V. 81. № 12. P. 11315–11338. doi: 10.1007/s00289-024-05218-9

21 Guo Y., Tian H., Li X., Han J. et al. Preparation of FKM/EFEP thermoplastic vulcanizate with excellent heat and oil resistance, gas barrier property and recyclability // Polymer. 2022. V. 262. P. 125429. doi: 10.1016/j.polymer.2022.125429

22 Peng T., Lv F., Gong Z., Cao L. et al. Design of PP/EPDM/NBR TPVs with tunable mechanical properties via regulating the core-shell structure // Polymer Testing. 2020. V. 90. P. 106767. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106767

23 Hou J., Zhong M., Pan X., Chen L. et al. Fabricating 3D printable BIIR/PP TPV via masterbatch and interfacial compatibilization // Composites Part B. 2020. V. 199. P. 108220. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108220

24 Вольфсон С.И., Хасанова А.Д., Казаков Ю.М., Хусаинов А.Д. и др. Структура и свойства маслобензостойких термопластичных вулканизатов, содержащих модифицированный технический углерод // Механика композитных материалов. 2021. Т. 57. № 4. С. 751–766. doi: 10.22364/mkm.57.4.10

25 Salaeh S., Thitithammawong A., Banerjee S.S. A new strategy applying ternary blends of modified natural rubber with fluoroplastic and fluorocarbon elastomer for high-performance thermoplastic vulcanizate // Polymer Testing. 2024. V. 140. P. 108594. doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108594

26 Chen Y., Fan J., Wang W., Wang Y. et al. Influence of size reduction of crosslinked rubber particles on phase interface in dynamically vulcanized poly(vinylidene fluoride)/silicone rubber blends // Polymer Testing. 2017. V. 63. P. 263–274. doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.08.021

27 Chatterjee T., Basu D., Das A., Wiessner S. et al. Super thermoplastic vulcanizates based on carboxylated acrylonitrile butadiene rubber (XNBR) and polyamide (PA12) // European Polymer Journal. 2016. V. 78. P. 235–252. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.03.027

28 Ismail S.M.R.S., Chatterjee T., Naskar K. Superior heat-resistant and oil-resistant blends based on dynamically vulcanized hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber and polyamide 12 // Polymers for Advanced Technologies. 2016. V. 28. P. 665–678. doi: 10.1002/pat.3966

29 Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. М.: Техинформ, 2012. 744 с.

30 Дик Дж.С. Технология резины: Рецептуростроение и испытания / пер. с англ. под ред. В.А. Шершнева. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.

31 Охотина Н.А., Кузнецова О.А., Кашшапов Б.Ф., Новикова Е.В. Динамически вулканизированные термоэластопласты на основе поливинилхлорида и бутадиен-нитрильного каучука // Вестник Казанского технологического университета. 2023. Т. 16. № 8. С. 162–164.

32 Quliyev A.J., Kakhramanov N.T., Koseva N.S., Arzumanova N.B. Rheological properties of mixtures of random polypropylene with butadiene-nitrile rubber and vulcanizates based on them // Azerbaijan Chemical Journal. 2021. № 1. P. 23–29. doi: 10.32737/0005-2531-2021-1-23-29

33 Шадринов Н.В., Гоголев В.Д., Исакова Т.А. Влияние химически модифицированного сверхвысокомолекулярного полиэтилена на свойства бутадиен-нитрильного каучука // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 4. С. 424–432.

34 Cui Z., Li X., Feng W., Wei L. et al. Effect of crosslinking agent dosage on the morphology and properties of thermoplastic vulcanizates based on hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber and thermoplastic polyester elastomer // Polymer. 2023. V. 287. P. 126420. doi: 10.1016/j.polymer.2023.126420

35 Singha N., Jana S. Advances in Thermoplastic Elastomers. Elsevier, 2023. 432 p. doi: 10.1016/C2021-0-01031-2

36 Прогноз научно-технического развития Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 3 янв. 2014 г. URL: https://www.researchgate.net/publication/293792988_Prognoz_naucno-tehnologiceskogo_razvitia_Rossii_2030 (дата обращения: 19.01.2026).

37 Zhang X., Lang W.Z., Xu H.P. Improved performances of PVDF/PFSA/O-MWNTs hollow fiber membranes and the synergism effects of two additives // Journal of Membrane Science. 2014. V. 469. P. 458–470. doi: 10.1016/j.memsci.2014.07.009

38 Yang S., Wu C., Ji D. et al. Preparation and characterization of fiber braided tube reinforced polyethylene hollow fiber membranes via thermally induced phase separation // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. V. 11. № 2. P. 109375. doi: 10.1016/j.jece.2023.109375

39 Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Химия, 1968. 536 с.

40 Аверко-Антонович И.Ю., Бикмуллин Р.Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.

41 Lohrasbi P., Yeganeh J.K. Synergistic toughening of poly(lactic acid)/poly(ethylene vinyl acetate) (PLA/EVA) by dynamic vulcanization and presence of hydrophobic nanoparticles // Polymers for Advanced Technologies. 2021. V. 32. № 11. P. 4326–4339. doi: 10.1002/pat.5435

42 Banerjee S.S., Bhowmick A.K. High-temperature thermoplastic elastomers from rubber-plastic blends: a state-of-the-art review // Rubber Chemistry and Technology. 2017. V. 90. № 1. P. 1–36. doi: 10.5254/rct.16.83786

43 Холден Д., Крихельдорф Х.Р., Куирк Р.П. Термоэластопласты / пер. с англ. 3-го изд. под ред. Б.Л. Смирнова. СПб.: Профессия, 2011. 720 с.

References

1 Le Hel C., Bounor-Legaré V., Catherin M., Lucas A. et al. TPV: A new insight on the rubber morphology and mechanic/elastic properties. Polymers. 2020. vol. 12. no. 10. article 2315. doi: 10.3390/polym12102315.

2 Vostryakova N.V. Properties and Application of Thermoplastic Elastomers. Moscow: TsNIITEnftekhim, 1979. 50 p. (in Russian).

3 Paul D., Newman S. Polymer Blends. Translated from English. Ed. by Yu.K. Godovsky. Moscow: Mir, 1981. vol. 2. pp. 312–338. (in Russian).

4 Mark J., Erman B., Eirich F. Rubber and Rubber. Science and Technology. Translated from English. Ed. by A.A. Berlin, Yu.L. Morozov. Moscow: Intellekt, 2011. 767 p. (in Russian).

5 Koral P. Termoplastike vulkanizaty. Kozar strei. 1984. vol. 34. no. 8. pp. 211–213.

6 Wolfson S.I. Dynamically Vulcanized Thermoplastic Elastomers: Production, Processing, Properties. Moscow: Nauka, 2004. 170 p. (in Russian).

7 Wolfson S.I., Okhotina N.A., Nigmatullina A.I. Main Trends in the Development of Global and Russian Markets for Nanotechnologies and Nanocomposite Materials. Bulletin of Kazan Technological University. 2013. vol. 16. no. 7. pp. 100–101. (in Russian).

8 Ning N., Li S., Wu H. et al. Preparation, microstructure, and microstructure-properties relationship of thermoplastic vulcanizates (TPVs): a review. Progress in Polymer Science. 2018. no. 79. pp. 61–97. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2017.11.003.

9 Gessler A.M., Haslett W.H. Process for preparing a vulcanised blend of crystalline polypropylene and chlorinated butyl rubber. US Patent no. 3037954. 1962.

10 Fisher W.K. Thermoplastic blend of partially cured monoolefin copolymer rubber and polyolefin plastic. US Patent no. 3862106. 1973.

11 Cui Y., Li X., Ni H. et al. Sustainable, Processable, and Oil-Resistant Biodegradable Thermoplastic Elastomer via Dynamic Vulcanization. Macromolecules. 2025. vol. 58. no. 14. pp. 7445–7456. doi: 10.1021/acs.macromol.5c00345.

12 Li S., Tian H., Hu G.H., Ning N. et al. Effects of shear during injection molding on the anisotropic microstructure and properties of EPDM/PP TPV containing rubber nanoparticle agglomerates. Polymer. 2021. vol. 229. article 124008. doi: 10.1016/j.polymer.2021.124008.

13 Kao-ian P., Banerjee S.S., Yudha S.S., Salaeh S. Strengthened Poly(vinylidene fluoride)/Epoxidized Natural Rubber Blend by a Reactive Compatibilizer Based on an Amino Acid-Modified Fluorocarbon Elastomer. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2024. vol. 63. no. 15. pp. 6615–6631. doi: 10.1021/acs.iecr.3c04672.

14 Li Q., Tang J. Reactive compatibilization of zinc dimethacrylate on dynamically vulcanized thermoplastic polyurethane/silicone rubber blends. Polymer Engineering and Science. 2025. vol. 65. no. 2. pp. 539–549. doi: 10.1002/pen.27023.

15 Wang Y., Gong Z., Xu C., Chen Y. Poly(vinylidene fluoride)/fluororubber/silicone rubber thermoplastic vulcanizates prepared through core-shell dynamic vulcanization: Formation of different rubber/plastic interfaces via controlling the core from "soft" to "hard". Materials Chemistry and Physics. 2017. vol. 195. pp. 123–131. doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.04.016.

16 Maghamirad G., Ghorbanzadeh Ahangari M., Karimi M., Hassani Niaki M. Effect of compatibilizer and polyhedral oligomeric silsesquioxane on mechanical, thermal, and morphological properties of polyamide6/poly(ethylene-co-vinyl acetate) composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2025. vol. 44. no. 17-18. pp. 1036–1046. doi: 10.1177/07316844241235438.

17 Huang J., Wu H., Wang X., Yu H. et al. Facile preparation of SAN/NBR TPV with balanced stiffness-toughness via metal-ligand coordination-induced dynamic vulcanization and in situ interfacial compatibilization. Polymer. 2024. vol. 297. article 126852. doi: 10.1016/j.polymer.2024.126852.

18 Salaeh S., Das A., Wießner S. Design and fabrication of thermoplastic elastomer with ionic network: A strategy for good performance and shape memory capability. Polymer. 2021. vol. 223. article 123699. doi: 10.1016/j.polymer.2021.123699.

19 Cui Z., Jing Y., Liu Y., Du A. Investigation on selective distribution of carbon nanotubes in thermoplastic vulcanizate (TPV) nanocomposites based on HNBR/TPEE and property optimization: road to functionalized applications. Polymer. 2025. vol. 328. article 128469. doi: 10.1016/j.polymer.2025.128469.

20 Weijin S., Wentong L., Hao T. et al. Preparation and properties of silicone thermoplastic elastomer and its molecular dynamics study. Polymer Bulletin. 2024. vol. 81. no. 12. pp. 11315–11338. doi: 10.1007/s00289-024-05218-9.

21 Guo Y., Tian H., Li X., Han J. et al. Preparation of FKM/EFEP thermoplastic vulcanizate with excellent heat and oil resistance, gas barrier property and recyclability. Polymer. 2022. vol. 262. article 125429. doi: 10.1016/j.polymer.2022.125429.

22 Peng T., Lv F., Gong Z., Cao L. et al. Design of PP/EPDM/NBR TPVs with tunable mechanical properties via regulating the core-shell structure. Polymer Testing. 2020. vol. 90. article 106767. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106767.

23 Hou J., Zhong M., Pan X., Chen L. et al. Fabricating 3D printable BIIR/PP TPV via masterbatch and interfacial compatibilization. Composites Part B. 2020. vol. 199. article 108220. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108220.

24 Wolfson S.I., Khasanova A.D., Kazakov Yu.M., Khusainov A.D. et al. Structure and Properties of Oil-Resistant Thermoplastic Vulcanizates Containing Modified Carbon Black. Mechanics of Composite Materials. 2021. vol. 57. no. 4. pp. 751–766. doi: 10.22364/mkm.57.4.10 (in Russian).

25 Salaeh S., Thitithammawong A., Banerjee S.S. A new strategy applying ternary blends of modified natural rubber with fluoroplastic and fluorocarbon elastomer for high-performance thermoplastic vulcanizate. Polymer Testing. 2024. vol. 140. article 108594. doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108594.

26 Chen Y., Fan J., Wang W., Wang Y. et al. Influence of size reduction of crosslinked rubber particles on phase interface in dynamically vulcanized poly(vinylidene fluoride)/silicone rubber blends. Polymer Testing. 2017. vol. 63. pp. 263–274. doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.08.021.

27 Chatterjee T., Basu D., Das A., Wiessner S. et al. Super thermoplastic vulcanizates based on carboxylated acrylonitrile butadiene rubber (XNBR) and polyamide (PA12). European Polymer Journal. 2016. vol. 78. pp. 235–252. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.03.027.

28 Ismail S.M.R.S., Chatterjee T., Naskar K. Superior heat-resistant and oil-resistant blends based on dynamically vulcanized hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber and polyamide 12. Polymers for Advanced Technologies. 2016. vol. 28. pp. 665–678. doi: 10.1002/pat.3966.

29 Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. Large Rubber Worker's Handbook. Moscow: Tekhinform, 2012. 744 p. (in Russian).

30 Dick J.S. Rubber Technology: Formulation and Testing. Translated from English. Ed. by V.A. Shershnev. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010. 620 p. (in Russian).

31 Okhotina N.A., Kuznetsova O.A., Kashshapov B.F., Novikova E.V. Dynamically Vulcanized Thermoplastic Elastomers Based on Polyvinyl Chloride and Butadiene-Nitrile Rubber. Bulletin of Kazan Technological University. 2023. vol. 16. no. 8. pp. 162–164. (in Russian).

32 Quliyev A.J., Kakhramanov N.T., Koseva N.S., Arzumanova N.B. Rheological properties of mixtures of random polypropylene with butadiene-nitrile rubber and vulcanizates based on them. Azerbaijan Chemical Journal. 2021. no. 1. pp. 23–29. doi: 10.32737/0005-2531-2021-1-23-29.

33 Shadrinov N.V., Gogolev V.D., Isakova T.A. Influence of Chemically Modified Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene on the Properties of Butadiene-Nitrile Rubber. Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2021. vol. 14. no. 4. pp. 424–432. (in Russian).

34 Cui Z., Li X., Feng W., Wei L. et al. Effect of crosslinking agent dosage on the morphology and properties of thermoplastic vulcanizates based on hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber and thermoplastic polyester elastomer. Polymer. 2023. vol. 287. article 126420. doi: 10.1016/j.polymer.2023.126420.

35 Singha N., Jana S. Advances in Thermoplastic Elastomers. Elsevier, 2023. 432 p. doi: 10.1016/C2021-0-01031-2.

36 Forecast of Scientific and Technological Development of the Russian Federation for the Period up to 2030: Approved by Order of the Government of the Russian Federation dated January 3, 2014. Available at: https://www.researchgate.net/publication/293792988_Prognoz_naucno-tehnologiceskogo_razvitia_Rossii_2030 (accessed: 19.01.2026) (in Russian).

37 Zhang X., Lang W.Z., Xu H.P. Improved performances of PVDF/PFSA/O-MWNTs hollow fiber membranes and the synergism effects of two additives. Journal of Membrane Science. 2014. vol. 469. pp. 458–470. doi: 10.1016/j.memsci.2014.07.009.

38 Yang S., Wu C., Ji D. et al. Preparation and characterization of fiber braided tube reinforced polyethylene hollow fiber membranes via thermally induced phase separation. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. vol. 11. no. 2. article 109375. doi: 10.1016/j.jece.2023.109375.

39 Tager A.A. Physical Chemistry of Polymers. Moscow: Khimiya, 1968. 536 p. (in Russian).

40 Averko-Antonovich I.Yu., Bikmullin R.T. Methods for Studying the Structure and Properties of Polymers. Kazan: KSTU, 2002. 604 p. (in Russian).

41 Lohrasbi P., Yeganeh J.K. Synergistic toughening of poly(lactic acid)/poly(ethylene vinyl acetate) (PLA/EVA) by dynamic vulcanization and presence of hydrophobic nanoparticles. Polymers for Advanced Technologies. 2021. vol. 32. no. 11. pp. 4326–4339. doi: 10.1002/pat.5435.

42 Banerjee S.S., Bhowmick A.K. High-temperature thermoplastic elastomers from rubber-plastic blends: a state-of-the-art review. Rubber Chemistry and Technology. 2017. vol. 90. no. 1. pp. 1–36. doi: 10.5254/rct.16.83786.

43 Holden D., Kricheldorf H.R., Quirk R.P. Thermoplastic Elastomers. Translated from English. 3rd ed. Ed. by B.L. Smirnov. St. Petersburg: Professiya, 2011. 720 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Виктория А. Черепанова, инженер, центр компетенций «Полимерные материалы», Вятский государственный университет, ул Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия, usr21806@vyatsu.ru
https://orcid.org/0000-0002-0592-796X

Евгения С. Широкова к.х.н., доцент, кафедра химии и технологии переработки полимеров, Вятский государственный университет, ул Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия, usr06779@vyatsu.ru
https://orcid.org/0000-0001-5735-3489

Сергей В. Фомин к.т.н., проректор, отдел международной деятельности, Вятский государственный университет, ул Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия, rubber_zerg@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0393-5613

Вклад авторов

Виктория А. Черепанова, выполнение экспериментальной части исследования, обработка и визуальное представление результатов исследования, подготовка текста статьи

Евгения С. Широкова формулировка исходной концепции и целей исследования, разработка и постановка экспериментальной методики, выполнение практических исследований, подготовка текста статьи

Сергей В. Фомин координация проекта, обеспечение материально-технической базы, интерпретация полученных данных

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Viktoria A. Cherepanova engineer, Competence Center "Polymer Materials", Vyatka State University, Moskovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia, usr21806@vyatsu.ru
https://orcid.org/0000-0002-0592-796X

Evgenia S. Shirokova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, Department of Chemistry and Technology of Polymer Processing, Vyatka State University, Moskovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia, usr06779@vyatsu.ru
https://orcid.org/0000-0001-5735-3489

Sergey V. Fomin Cand. Sci. (Engin.), vice-rector , Department of International Activities, Vyatka State University, Moskovskaya st., 36, Kirov, 610000, Russia, rubber_zerg@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0393-5613

Contribution

Viktoria A. Cherepanova implementation of the experimental part of the research, processing and visual presentation of research results, preparation of the article text

Evgenia S. Shirokova formulation of the research concept and objectives, development and implementation of experimental methodology, conducting practical research, preparation of the article text

Sergey V. Fomin project coordination, provision of material and technical base, interpretation of the obtained data

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 24/12/2025	**После редакции** 18/01/2025	**Принята в печать** 02/02/2026

Received 24/12/2025	**Accepted in revised** 18/01/2025	**Accepted** 02/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-243-249 Оригинальная статья/Research article
УДК 655.3 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Ступенчатые сенсорные композиты для индикации силы сжатия при герметизации стыков

Александра Ю. Погиба [1] pogiba.a@ya.ru 0009-0008-6550-2892
Владислав Ю. Верещагин [1] slavaver@ya.ru 0000-0002-1344-4888
Александр П. Кондратов [1] apkrezerv@mail.ru 0000-0001-6118-0808

1 Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, д. 38, г. Москва, 107023, Россия

Аннотация. Исследован цветопеременный эффект при термостимулируемой усадке комбинированного пакета металлизированных, термоусадочных и двуосноориентированных пленок из термопластичных полимеров. Цветопеременный эффект возникает и может быть обнаружен лишь в поляризованном свете. В отсутствие поляризации света пакет линейно ориентированных термоусадочных и двуосноориентированных пленок является прозрачным и бесцветным, а слой металлизированной пленки монохромным. Экспериментально установлено, что в процессе термостимулируемой усадки прозрачной линейно ориентированной пленки поливинилхлорида, обладающей двойным лучепреломлением коэффициент пропускания обычного и поляризованного света существенно различается, зависит от длины волны света и уровня внутренних напряжений в пленке. Это различие предложено использовать при изготовлении инновационного индикатора качества изоляции электрических контактов. В электротехнике существует необходимость «сглаживания» бросков напряженности электрического поля в области соединения кабелей и снижения трудоемкости процессов сборки пучка проводов. Разработке индикаторов и способов индикации (визуализации) сжимающих напряжений в области соединения проводов посвящено множество запатентованных технических решений, сочетающих использование механохромных полимерных композитов и электронных устройств. В настоящем исследовании показана возможность визуальной индикации внутренних напряжений, сжимающих контакты по цвету многослойной изоляции из металлизированных, термоусадочных и двуосноориентированных пленок в поляризованном свете. Поляризованный свет, отраженный от зеркальной поверхности металлизированной пленки, обусловливает эффект плеохроизма (появление яркой цветной окраски) вследствие интерференции электромагнитных волн на тонких прозрачных полимерных пленках составляющих «пакет изоляции» со ступенчатым слоем. Ступенчатый слой формируется спиральной намоткой «внахлест» дихроичной двуосноориентированной пленки полипропилена. В статье показан планируемый продуктовый результат исследований и приведен пример практического использования термоусадочных полимерных материалов в электротехнике. По спектрам отражения поляризованного света охарактеризован количественно переменный цвет многослойной изоляции с вешним слоем из пленки поливинилхлорида отечественного производства.

Ключевые слова: Полимерные покрытия, полипропилен, анизотропия, плеохроизм, двойное лучепреломление, координаты цвета, светлота, отражение света.

Step-by-step sensor composites for indicating the compression force during joint sealing

Aleksandra Y. Pogiba [1] pogiba.a@ya.ru 0009-0008-6550-2892
Vladislav Y. Vereshchagin [1] slavaver@ya.ru 0000-0002-1344-4888
Aleksandr P. Kondratov [1] apkrezerv@mail.ru 0000-0001-6118-0808

1 Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russia.

Abstract. The color-changing effect during thermally stimulated shrinkage of a combined package of metallized, heat-shrinkable, and biaxially oriented films made of thermoplastic polymers has been studied. The color-changing effect occurs and can only be detected in polarized light. In the absence of light polarization, the package of linearly oriented heat-shrinkable and biaxially oriented dichroic films is transparent and colorless, and the metallized film layer is monochrome. It has been experimentally established that in the process of thermally stimulated shrinkage of a transparent linearly oriented polyvinyl chloride film with dichroism, the transmission coefficient of ordinary and polarized light differs significantly, depending on the wavelength of the light and the level of internal stresses in the film. It is proposed to use this difference in the manufacture of an innovative indicator of the insulation quality of electrical contacts. In electrical engineering, there is a need to "smooth out" the surges of electric field strength in the area of cable connection and reduce the complexity of the assembly of a bundle of wires. Many patented technical solutions combining the use of mechanochromic polymer composites and electronic devices have been devoted to the development of indicators and methods for indicating (visualizing) compressive stresses in the field of wire connection. The present study shows the possibility of visual indication of internal stresses compressing contacts by the color of multilayer insulation made of metallized, heat-shrinkable and biaxially oriented films in polarized light. Polarized light reflected from the mirror surface of the metallized film causes the pleochroism effect (the appearance of bright color) due to the interference of electromagnetic waves on thin transparent polymer films that make up the "insulation package" with a stepped layer. The stepped layer is formed by spiral overlapping of a dichroic biaxially oriented polypropylene film. The article shows the product result of optical research and provides an example of the practical use of heat-shrinkable polymer materials in electrical engineering. According to the reflection spectra of polarized light, the variable color of multilayer insulation with an upper layer of a polyvinyl chloride film of domestic production is quantitatively characterized.)

Keywords: Polymer coatings, polypropylene, anisotropy, pleochroism, birefringence, color coordinates, lightness, and light reflection.

Для цитирования
Погиба А.Ю., Верещагин В.Ю., Кондратов А.П. Ступенчатые сенсорные композиты для индикации силы сжатия при герметизации стыков // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 243–249. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-243-249

For citation
Pogiba A.Y., Vereshchagin V.Yu., Kondratov A.P. Step-by-step sensor composites for indicating the compression force during joint sealing. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 243–249. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-243-249

© 2026, Погиба А.Ю. и др. / Pogiba A.Y. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В машиностроении, теплотехнике и промышленной энергетике, в частности, существует необходимость «сглаживания» бросков напряженности электрического поля в области соединения кабелей и снижения трудоемкости процессов сборки пучка проводов или герметизации стыков коммуникаций.

В патентных источниках описаны втулки из термопластичных материалов для соединения нескольких кабелей или иных коммуникаций, включающие гибкий лист, предназначенный для укладки вокруг кабельного соединения имеющий ряд продольных разрезов по направлению укладки соединения образующих «язычки». Сжатие при укладке листа вокруг кабельного соединения достигается перекрытием язычков. При этом разрезанная краевая часть листа зажимается вручную. Дополнительная обмотка стыка изоляционной лентой или его фиксация полимерной термоусадочной трубкой, обеспечивают необходимую прочность [1]. Для надежной герметизации предложено также использовать втулки с термоусадочными концевыми участками для соединения с соответствующими смежными торцевыми поверхностями трубчатых секций. Концевые термоусадочные участки должны быть выполнены заодно со средней частью и иметь относительно небольшую толщину стенки [2]. Термоусадочная трубка может быть выполнена из композиции сшитого радиацией полиолефина, способного менять цвет в зависимости от температуры для индикации нарушения электрических контактов и предупреждения аварийных ситуаций [3].

Таким образом частично решается задача визуализации качества соединения и герметизации стыков. Изменение цвета в известных технических решениях не всегда позволяет оценить силу сжатия, поэтому рядом исследователей продолжается разработка различных, в том числе оптических, датчиков силы сжатия. В патенте Японии [4] описаны сенсорные полимерные композиты, способ и устройство для оценки сжатия композиционного материала с электронным модулем обработки данных интенсивности оптического излучения, распространяющегося от источника оптического излучения к приемнику в среде деформируемого пористого или монолитного наполнителя методом оптической анизотропной диффузионной тензометрии. Интенсивность оптического излучения, распространяющего в наполнителе, зависит от его светопроницаемости. В случае пористого наполнителя его светопроницаемость зависит не только от светопоглощения полимерного композита, которое увеличивается за счет изменения плотности при деформации наполнителя, но и от направления деформации пор, которое приводит к анизотропному светорассеянию, вследствие чего изменяется средняя траектория света между источником и приемником оптического излучения. Учет параметров анизотропного изменения светорассеяния в среде пористого наполнителя в состоянии его деформации реализуется программными средствами в модуле обработки данных [5]. Известные запатентованные композиционные материалы и способы индикации силы сжатия при герметизации стыков основаны на использовании дорогостоящих ингредиентов и сложны в практической реализации.

Целью настоящего исследования является описание оптических свойств новых многослойных ступенчатых полимерных пленочных материалов и обоснование возможности их применения для индикации процесса сжатия термоусадкой, например, при герметизации стыков электрических проводов или коммуникаций.

Предмет исследования – плеохроизм при интерференции поляризованного света в многослойном пакете прозрачных бесцветных пленок из различных термопластов и его использование на примере герметизации стыков.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использованы:

Бесцветная прозрачная термоусадочная пленка поливинилхлорида (по ТУ 22.21.30–001–35639164–2019 производства ТД «Упак Трейд, Воронеж» толщиной 90 ± 5 мкм)

Бесцветная прозрачная биоксиально ориентированная пленка полипропилена (BOPP производства завода «Биаксплен», Московская область, марки HGGW-40 толщиной 45 ± 5 мкм

Металлизированная биоксиально ориентированная пленка полипропилена (BOPP производства завода «Биаксплен» марки HMGW.M-20 толщиной 25 ± 5 мкм.)

Металлизированные самоклеющиеся ленты на основе пленки полипропилена с алюминиевым напылением марок Зубр, AVIORA, Unibob и Tesa ТУ 2245–001–45077247–2007)

Пленочные поляризаторы (NPF F1205DU (Япония), обеспечивающие степень поляризации света до 95,8%.)

Стеклянные пластины – антибликовые поляризаторы (марка «HNNYKRAY» модель Wanbo T6 Max (КНР)

Полимерные поляризационные линзы для очков («Cantilen» POLARIZED (КНР).

Для демонстрации плеохроизма при интерференции поляризованного света в многослойном пакете прозрачных бесцветных пленок

и практического использования цветных эффектов при герметизации стыков коммуникаций собрались макеты термоусадочных втулок и лабораторный стенд для оптических измерений.

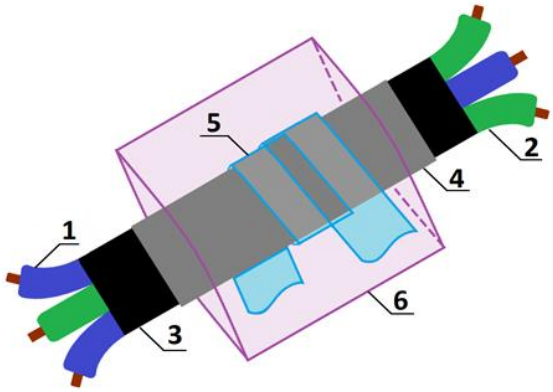


Рисунок 1. Схема укладки и расположения пленок при герметизации стыков: 1 и 2 – соединяемые провода, 3 – слой электроизоляции, 4 – слой материала отражающего свет, 5 – слой оптически активной полимерной пленки, 6 – термоусадочная пленка

Figure 1. Layout and arrangement of films during joint sealing: 1 and 2 – connected wires, 3 – electrical insulation layer, 4 – light-reflecting material layer, 5 – optically active polymer film layer, 6 – shrink film

Схема макета соединения электрических кабелей (1 и 2) с помощью прозрачной многослойной втулки, содержащей ступенчатый слой оптически активной в поляризованном свете пленки BOPP (5), слоя изоляции со светоотражающей поверхностью (4) и внешнего термоусадочного слоя пленки поливинилхлорида (6) показана на рисунке 1.

Втулка показана в положении сборки до нагревания термоусадочной трубки и без поляризационного светофильтра, необходимого для цветной индикации процесса сжатия. Слои пленок расположенные поверх изоляции со светоотражающей поверхностью (4) бесцветны и прозрачны в обычном неполяризованном свете до и после нагревания для сжатия. «Цветными становятся» слои пленки BOPP при наблюдении стыка в очках с поляризационными стеклами или при его освещении и фотографировании сквозь пленочные поляризаторы.

Процесс сборки макета стыка электрических кабелей (поз. 1 и 2 на рисунок 1) включает следующие операции. Концы электрических кабелей изолируют диэлектрическим материалом (поз. 3 на рисунок 1). Ленты, вырезанные из пленок полипропилена BOPP обматываются поверх слоя металлизированной самоклеющиеся пленки (поз. 4 на рисунок 1) в форме спирали внахлёст с шагом 0,2–0,5 ширины лент для формирования ступенчатого оптически активноого слоя (поз. 5 на рисунок 1). На ступенчатый оптически активный слой пленок полипропилена BOPP надевают термоусадочный рукав из пленки поливинилхлорида (поз. 6 на рисунок 1). Производят фотографирование сборки пленок сквозь сквозь пленочный поляризатор для фиксации цвета до сжатия.

Для исследования интерференции и определения зависимости цвета пакета пленок в поляризованном свете от силы сжатия собран лабораторный стенд для фотографирования и оптических измерений (рисунок 2). На стенде установлен спетрофотометр и/или фотокамера (поз. 5 на рисунок 2) с возможностью изменения угла наблюдения. Осуществляли фотографирование цветовых эффектов, возникающих при отражении поляризованного света лампы (поз. 1 на рисунок 2) от зеркального слоя самоклеющиеся пленки (поз. 4 на рисунок 2) в различных направлениях. Стабильная цветопередача во всем наборе данных обеспечена калибровкой цвета с использованием стандартизированной мишенью X-Rite ColorChecker Passport, которая фотографировалась в начале каждого сеанса фотографирования. Объект для фотосъемки в отраженном потоке поляризованного света это – комбинация нескольких прозрачных полимерных пленок (ПВХ + BOPP или ПВХ + BOPP + BOPP), проявляющая плеохроизм при размещении на различных отражающих поверхностях [6]. Все изображения были получены в условиях контролируемого освещения для поддержания постоянства в течение всей экспериментальной процедуры.

Обработка RAW-изображений производилась с помощью программного обеспечения Darktable с открытым исходным кодом, которое обеспечивает точное управление цветом и калибровку рабочих процессов. Пользовательский цветовой профиль был создан с помощью модуля цветовой калибровки (Color Calibration) в Darktable, реализующего стратегию оптимизации, основанную на минимизации среднего значения ΔE_{76} (цветового различия) участков (ступеней) на фотографии пленки [7].

Результаты и обсуждения

Оптическая активность прозрачных стеклообразных плёнок поливинилхлорида в проходящем поляризованным свете была обнаружена, исследована полуколичественно ранее и предложена для использования в светотехнике и уличной световой рекламе [8]. При этом зависимость прозрачности и цвета термоусадочных плёнок от деформации усадки и уровня внутренних напряжений в плёнках не анализировалась. Установлены лишь периодическая (синусоидальная) зависимость прозрачности плёнок и «повторяемость» цвета пакетов прозрачных пленок в проходящем потоке поляризованного света по мере увеличения количества слоёв [9].

Различие цвета пакетов прозрачных плёнок по мере увеличения их числа в пакете оценивается величиной ΔE_{76} и наиболее существенно при дублировании или сложении трёх-четырёх слоёв. Высечка части одного из слоёв в пакете плёнок или размещение между слоями плоских фигур, вырезанных из прозрачной плётки того же или другого полимера приводит к получению нового вида слоистых композитов, названных нами "ступенчатыми". Свойства ступенчатых прозрачных полимерных плёночных материалов аналогичны оптическим свойствам пакетов прозрачных минеральных пластин известных в геометрической оптике под именем «Стопа Столетова» и называемых в экспериентальных исследованиях интерференции полимерных систем, «multilayer optical film», «multilayer film stack» или optical film stack [10].

Новые технические решения в области индикации и/или измерения силы сжатия полимерных материалов при герметизации емкостей с жидкостью [11], а позднее пучков проводов [12] основаны на недавно обнаруженном изменении цвета ступенчатых оптически активных плёнок в поляризованном свете и систематических исследованиях механохромных материалов с памятью формы [13, 14]. Все предшествующие исследования цвета и прозрачности многослойных полимерных плёнок осуществлялись в проходящем потоке света при размещении пленок между двумя поляризаторами. Применения на практике таких вариантов прохождения света и наблюдения изменений цвета полимерных пленок с целью диагностики напряженного состояния материалов в изделиях или инженерных конструкциях весьма ограничены.

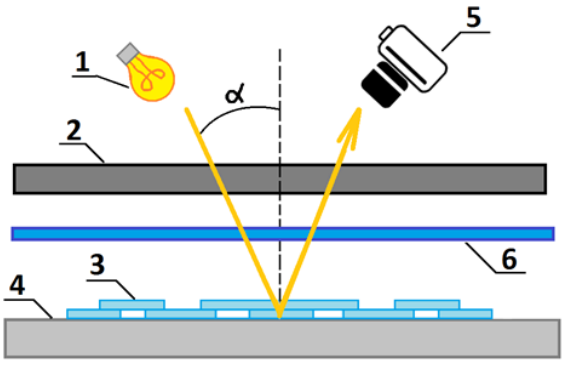


Рисунок 2. Схема стенда для изучения цвета и оптических характеристик пакета пленки в отраженном от зеркала световом потоке: 1 – Источник света; 2 – подвижный поляризатор; 3 – пакет лент из пленок BOPP внахлест; 4 – светоотражающая поверхность; 5 – фотокамера, 6 – термоусадочная пленка ПВХ

Figure 2. Diagram of the stand for studying the color and optical characteristics of a film package in the light reflected from a mirror: 1 – light source; 2 – movable polarizer; 3 – BORR film package (Stoletov stack); 4 – reflective surface; 5 – camera; 6 – PVC shrink film

В настоящем исследовании использована схема измерения цвета и прозрачности многослойных полимерных плёнок с одним поляризатором (рисунок 2), где роль источника поляризованного света, проходящего сквозь пакет пленок выполняет отражение от зеркал – металлизированной плёнки со светоотражающей поверхностью (поз. 4 на рисунок 2) расположенной на изделии или узле сжимаемых коммуникаций. Анализатором служит поляризационная пленка фильтр (поз. 2 на рисунок 2) или очки наблюдателя с поляризационными стеклами (не показаны).

На рисунке 3 показана реализация продуктового результата исследований – пример практического использования обнаруженных и количественно оценённых по контрасту цветных оптических эффектов. Изменение цвета пакета плёнок поляризованном свете после термоусадки внешнего слоя пленки поливинилхлорида как индикатор качества изоляции.

Цветопеременный эффект как индикатор изоляции исследован на комбинации пленок ПВХ и BOPP размещенных в одной плоскости на стенде для оптических измерений (рисунок 2) с использованием различных светоотражающих материалов. Цвет в поляризованном свете под углом α менее 10 градусов комбинации пленок ПВХ с 1 или 2 слоями пленки BOPP фиксировался на фотографиях и записывался в форме спектра.

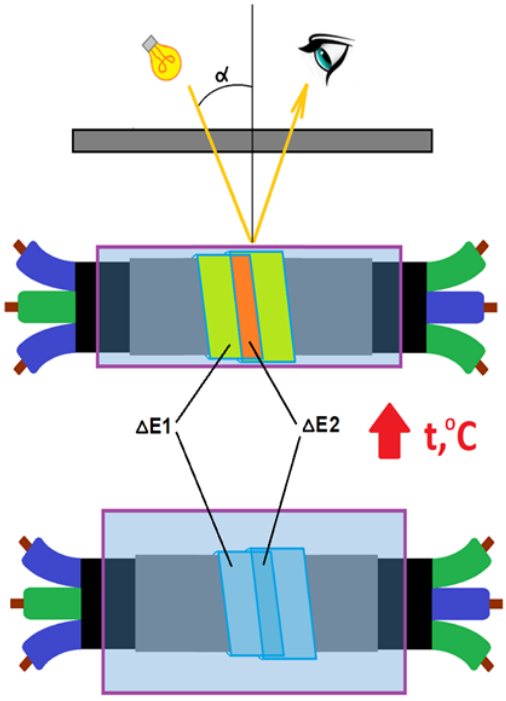


Рисунок 3. Выявление силы сжатия стыка по цвету ступенчатого слоя ленты BOPP в поляризованном свете после термоусадки внешнего слоя пленки ПВХ (рукава с памятью формы)

Figure 3. Identification of the compression force of the joint by the color of the stepped layer of the BOPP tape in polarized light after the shrinkage of the outer layer of the PVC film (shape-memory sleeves)

Пленка ПВХ подвергалась частичной свободной усадке с ограничением 50% и повторно фотографировалась в составе комбинации пленок ПВХ и (1–2) BOPP. На фотографиях (рисунок 3 внизу), показан цвет плёнок полипропилена в поляризованном свете размещённых на зеркальной поверхности. После нагревания и сжатия внешнего слоя термоусадочной пленки ПВХ до максимально возможной величины (≈ 50% диаметра) цвет ступенчатого слоя пленок BOPP меняется и это изменение указывает на успешной завершение герметизации стыка проводов. Следует отметить, что в отсутствие поляризатора весь пакет пленок является прозрачным и бесцветным до и после термоусадки.

Изменение цвета ступенчатого слоя пленок BOPP в поляризованном свете показано на рисунке 4 и измерено спектрофотометром (рисунок 5).

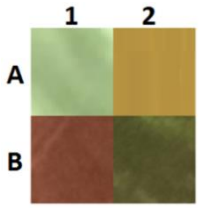


Рисунок 4. Изменение цвета ступеней пленки BOPP на светоотражающей поверхности 1,2 – количество слоев пленки BOPP; A – BOPP + PVC 0%; B – BOPP + PVC сжатие относительно первоначального размера 50%

Figure 4. Change in color of the BOPP film steps on the reflective surface 1, 2 – number of plecka layers BOPP; A – BOPP + PVC 0%; B – BOPP + PVC compression relative to the original size of 50%

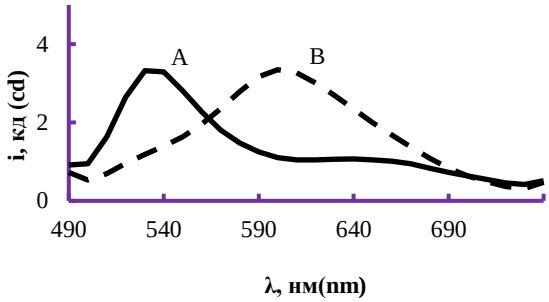


Рисунок 5. Коэффициент спектральной прозрачности. BOPP + PVC сжатие относительно первоначального размера: B – 50%; A – 0%

Figure 5. Spectral transparency coefficient. BOPP + PVC compression relative to the original size: B – 50%; 2 – 0%

Заключение

1 Поляризация и интерференция света, отраженного от зеркальной поверхности обеспечивают многоцветный эффект плеохроизма, обусловленный наличием и уровнем внутренних напряжений в дихроичной термоусадочной пленке поливинилхлорида.

2 Сочетание дихроичной термоусадочной пленки поливинилхлорида пленок с несколькими слоями дихроичной двуосноориентированной пленки полипропилена усиливает интерференцию поляризованного света в слоистом пакете и изменение палитры цвета в процессе термостимулируемой усадки.

3 Цветопеременный эффект при термостимулируемой усадке комбинированного пакета металлизированных, термоусадочных и двуосноориентированных пленок из термопластичных полимеров предложено использовать при визуальном контроле качества герметизации стыков электрических проводов или узлов соединения коммуникаций.

Благодарности

Настоящее исследование проведено при финансовой поддержке Московского Политехнического Университета в рамках гранта имени В.Е. Фортова.

Литература

1 Пат. 4731271 US, МПК H02G15/18; H02G15/08; H01R4/72. Cable connection sleeve / Heucke K.H., Ott A.; опубл. 15.03.1988.

2 Пат. 6355318 B1 US, МПК B29C65/34; F16L47/22; F16L59/20. Heat shrinkable member / Tailor D.K., Verge M., Steele R.E. et al.; опубл. 12.03.2002.

3 Пат. 105566736 A CN, МПК B29C61/06; C08F2/00. Radiation-crosslinked polyolefin heat shrink tube capable of changing color along with temperature for warning / Shiping X., Xuelian L., Jun L. et al.; опубл. 11.05.2016.

4 Пат. 5722259 B2 JP, МПК G01L1/24; G01L5/16. Flexible tactile sensor / Nagano U., Watanabe T., Maruyama S.; опубл. 20.05.2015.

5 Пат. 2822100 РФ. Способ измерения силы нажатия методом оптической анизотропной диффузионной тензометрии и датчик для измерения силы нажатия / Чех И.И., Синцов М.Ю.; заявл. 02.06.2022.

6 Верещагин В.Ю., Погиба А.Ю., Кондратов А.П. Плеохроизм бесцветных полимерных покрытий на светоотражающей поверхности // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 214–219. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033

7 Nikolaev A.A., Kondratov A.P. Method for hidden marking of transparent polypropylene film // Fine Chemical Technologies. 2022. V. 17. № 4. P. 346–356. doi: 10.32362/2410-6593-2022-17-4-346-356

8 Kondratov A.P. New materials for light strain-optical panels // Light & Engineering. 2014. V. 22. № 3. P. 74–77.

9 Ермакова И.Н., Нагорнова И.В., Кондратов А.П. Прозрачные слоистые материалы на основе полиолефинов с варьируемой окраской // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. 2015. С. 101–102.

10 Пат. 20160216427 US, МПК G02B5/08; G02B5/30. Multilayer optical film / Johnson M.B., Haag A.D., Denker M.E.; опубл. 02.07.2016.

11 Пат. по заявке № 2025101494 РФ. Термоусадочный колпачок / Погиба А.Ю. и др.; заявл. 24.01.2025.

12 Пат. по заявке № 2025135670 РФ. Устройство для изоляции пучка проводов / Ямилиненц В.Ю. и др.; заявл. 12.12.2025.

13 Angelsky O.V., Bekshaev A.Y., Vasnetsov M.V. et al. Optical phase singularities: Physical nature, manifestations and applications // Frontiers in Physics. 2022. V. 10. P. 1060787. doi: 10.3389/fphy.2022.1060787

14 Balderas I., Kondratov A.P., Vereshchagin V.Y., Pogiba A.Y. Optical Properties of Colorless Polymer Coatings on the Mirrored Surface of Containers // Physics of the Solid State. 2026. V. 68. № 3. P. 283–289.

15 Dorohoi D.O., Postolache M., Nechifor C.D. et al. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for various applications // Molecules. 2023. V. 28. № 7. P. 2955. doi: 10.3390/molecules28072955

16 Kosmalska-Olańska A., Olszewski J., Masek A. A brief review of optical polymers in material engineering // Express Polymer Letters. 2024. V. 18. № 12. P. 1291–1326. doi: 10.3144/expresspolymlett.2024.99

17 Bokobza L. Infrared linear dichroism for the analysis of molecular orientation in polymers and in polymer composites // Polymers. 2022. V. 14. № 6. P. 1257. doi: 10.3390/polym14061257

18 Юдаев П.А., Тамбура Б., Чистяков Е.М. Антистатические полимерные материалы // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 2. С. 139.

19 Vilasó-Cadre J.E., González-Fernández L.A., Medellín-Castillo N.A., Reyes-Domínguez I.A. Diversified Analytical Methods Used to Analyze Plastic Biodegradation // Advanced Strategies for Biodegradation of Plastic Polymers. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 165–192. doi: 10.1007/978-3-031-80853-7_7

20 Dorohoi D.O., Postolache M., Nechifor C.D. et al. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for various applications // Molecules. 2023. V. 28. № 7. P. 2955. doi: 10.3390/molecules28072955

21 Inoue T. Strain-induced birefringence of amorphous polymers and molecular design of optical polymers // ACS Applied Polymer Materials. 2021. V. 3. № 5. P. 2264–2273. doi: 10.1021/acsapm.1c00001

References

1 Patent no. 4731271 US, IPC H02G15/18; H02G15/08; H01R4/72. Cable connection sleeve. Heucke K.H., Ott A.; publ. 15.03.1988.

2 Patent no. 6355318 B1 US, IPC B29C65/34; F16L47/22; F16L59/20. Heat shrinkable member. Tailor D.K., Verge M., Steele R.E. et al.; publ. 12.03.2002.

3 Patent no. 105566736 A CN, IPC B29C61/06; C08F2/00. Radiation-crosslinked polyolefin heat shrink tube capable of changing color along with temperature for warning. Shiping X., Xuelian L., Jun L. et al.; publ. 11.05.2016.

4 Patent no. 5722259 B2 JP, IPC G01L1/24; G01L5/16. Flexible tactile sensor. Nagano U., Watanabe T., Maruyama S.; publ. 20.05.2015.

5 Patent no. 2822100 RF. Method for measuring pressing force by optical anisotropic diffusion tensiometry and sensor for measuring pressing force. Chekh I.I., Sintsov M.Yu.; filed 02.06.2022. (in Russian).

6 Vereshchagin V.Yu., Pogiba A.Yu., Kondratov A.P. Pleochroism of Colorless Polymer Coatings on a Light-Reflecting Surface. Polzunovsky Bulletin. 2025. no. 2. pp. 214–219. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033 (in Russian).

7 Nikolaev A.A., Kondratov A.P. Method for hidden marking of transparent polypropylene film. Fine Chemical Technologies. 2022. vol. 17. no. 4. pp. 346–356. doi: 10.32362/2410-6593-2022-17-4-346-356.

8 Kondratov A.P. New materials for light strain-optical panels. Light & Engineering. 2014. vol. 22. no. 3. pp. 74–77.

9 Ermakova I.N., Nagornova I.V., Kondratov A.P. Transparent Layered Materials Based on Polyolefins with Variable Color. Technique and Technology of Petrochemical and Oil and Gas Production. 2015. pp. 101–102. (in Russian).

10 Patent no. 20160216427 US, IPC G02B5/08; G02B5/30. Multilayer optical film. Johnson M.B., Haag A.D., Denker M.E.; publ. 02.07.2016.

11 Patent application no. 2025101494 RF. Heat-shrinkable cap. Pogiba A.Yu. et al.; filed 24.01.2025. (in Russian).

12 Patent application no. 2025135670 RF. Device for insulating a bundle of wires. Yamilinenets V.Yu. et al.; filed 12.12.2025. (in Russian).

13 Angelsky O.V., Bekshaev A.Y., Vasnetsov M.V. et al. Optical phase singularities: Physical nature, manifestations and applications. Frontiers in Physics. 2022. vol. 10. article 1060787. doi: 10.3389/fphy.2022.1060787.

14 Balderas I., Kondratov A.P., Vereshchagin V.Y., Pogiba A.Y. Optical Properties of Colorless Polymer Coatings on the Mirrored Surface of Containers. Physics of the Solid State. 2026. vol. 68. no. 3. pp. 283–289.

15 Dorohoi D.O., Postolache M., Nechifor C.D. et al. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for various applications. Molecules. 2023. vol. 28. no. 7. article 2955. doi: 10.3390/molecules28072955.

16 Kosmalska-Olańska A., Olszewski J., Masek A. A brief review of optical polymers in material engineering. Express Polymer Letters. 2024. vol. 18. no. 12. pp. 1291–1326. doi: 10.3144/expresspolymlett.2024.99.

17 Bokobza L. Infrared linear dichroism for the analysis of molecular orientation in polymers and in polymer composites. Polymers. 2022. vol. 14. no. 6. article 1257. doi: 10.3390/polym14061257.

18 Yudaev P.A., Tambura B., Chistyakov E.M. Antistatic Polymer Materials. Nanotechnologies in Construction. 2023. vol. 15. no. 2. p. 139. (in Russian).

19 Vilasó-Cadre J.E., González-Fernández L.A., Medellín-Castillo N.A., Reyes-Domínguez I.A. Diversified Analytical Methods Used to Analyze Plastic Biodegradation. In: Advanced Strategies for Biodegradation of Plastic Polymers. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. pp. 165–192. doi: 10.1007/978-3-031-80853-7_7.

20 Dorohoi D.O., Postolache M., Nechifor C.D. et al. Review on optical methods used to characterize the linear birefringence of polymer materials for various applications. Molecules. 2023. vol. 28. no. 7. article 2955. doi: 10.3390/molecules28072955.

21 Inoue T. Strain-induced birefringence of amorphous polymers and molecular design of optical polymers. ACS Applied Polymer Materials. 2021. vol. 3. no. 5. pp. 2264–2273. doi: 10.1021/acsapm.1c00001.

Сведения об авторах

Александра Ю. Погиба преподаватель, кафедра инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, pogiba.a@ya.ru
https://orcid.org/0009-0008-6550-2892

Владислав Ю. Верещагин к.т.н., доцент, кафедра инфо-когнитивные технологии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, slavaver@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-1344-4888

Александр П. Кондратов д.т.н., профессор, кафедра инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, apkrezerv@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6118-0808

Information about authors

Aleksandra Y. Pogiba lecturer, innovative materials of printmediaindustry department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, pogiba.a@ya.ru
https://orcid.org/0009-0008-6550-2892

Vladislav Y. Vereshchagin Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, infocognitive technologies department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, slavaver@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-1344-4888

Aleksandr P. Kondratov Dr. Sci. (Engin.), professor, innovative materials of printmediaindustry department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, apkrezerv@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6118-0808

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 22/12/2025	**После редакции** 18/01/2026	**Принята в печать** 09/02/2026

Received 22/12/2025	**Accepted in revised** 18/01/2026	**Accepted** 09/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-250-266 Оригинальная статья/Research article
УДК 691.17 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Рецептурно-технологические решения по управлению морфологической структурой вспененных эластомерных материалов на основе СКЭПТ

Алексей М. Толстов [1] tolstovalex2029@gmail.ru 0000-0003-2266-9613
Юлия А. Наумова [1] naumova_yulia@mail.ru 0000-0001-9968-8244
Елена Г. Поповских [2] epopovskikh@bk.ru 0009-0009-9115-5131
Артём С. Трусов [1] trusoff.artyom2015@ya.ru 0009-0005-1758-3366

1 Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, пр-т Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Россия
2 ООО Гавари Групп, ул. Ленина, д. 87, пгт Обухово, 142440, Россия

Аннотация. Исследовано влияние рецептурно-технологических параметров на формирование морфологической структуры открытопористых эластомерных материалов (ОПЭМ) на основе этилен-пропилен-диенового каучука (СКЭПТ), предназначенных для сорбции нефтепродуктов. В качестве ключевого подхода использована двухстадийная технология вспенивания, обеспечивающая температурное и временное разделение процессов газовыделения и вулканизации. На первой стадии при 120 °С и избыточном давлении происходило разложение низкотемпературного порообразователя (бикарбонат натрия, БКН), что закладывало основу открытой макропористой структуры. На второй стадии при 180 °С и атмосферном давлении осуществлялся основной рост пор за счет разложения высокотемпературного порообразователя (азодикарбонамида) и фиксация структуры вулканизационной сетки. Установлено, что морфология материала (от квазисферической до стохастически-трабекулярной) и доля открытых пор (от 1 до 91%) определяются концентрацией БКН (2–10 масс.ч.) и длительностью первой стадии (5–9 мин). Показано, что трабекулярная структура с высокой извилистостью поровых каналов демонстрирует максимальную сорбционную емкость (до 17.5 г/г для масла 15W40) и эффективно удерживает сорбат за счет капиллярных сил. Выявлена склонность материала к набуханию в углеводородах, что ограничивает его ресурс при многократных циклах «сорбция-отжим». Разработанное решение открывает путь к целенаправленному проектированию структуры ОПЭМ с заданными сорбционными свойствами.

Ключевые слова: открытопористые эластомерные материалы, этилен-пропилен-диеновый каучук, двухстадийное вспенивание, нефтесорбент .

Formulation and Technological Approaches for Controlling the Morphological Structure of Foamed Elastomeric Materials Based on EPDM

Aleksey M. Tolstov [1] tolstovalex2029@gmail.ru 0000-0003-2266-9613
Yulia A. Naumova [1] naumova_yulia@mail.ru 0000-0001-9968-8244
Elena G. Popovskikh [2] epopovskikh@bk.ru 0009-0009-9115-5131
Artem S. Trusov [1] trusoff.artyom2015@ya.ru 0009-0005-1758-3366

1 Elastomer Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA — Russian Technological University, Vernadsky Av., 78, Moscow, 119454, Russia
2 , Limited Liability Company Gavary Group, Lenina St., Building 87, uts Obukhovo, 142440, Russia

Abstract. The influence of formulation and technological parameters on the formation of the morphology of open-cell elastomeric materials based on ethylene-propylene-diene rubber (EPDM), intended for the sorption of petroleum products, was investigated. A two-stage foaming technology, providing temporal and temperature separation of gas evolution and vulcanization processes, was employed as the key approach. In the first stage at 120°C and excess pressure, decomposition of the low-temperature blowing agent (sodium bicarbonate, SB) occurred, laying the foundation for an open macroporous structure. In the second stage at 180°C and atmospheric pressure, the main pore growth proceeded via the high-temperature blowing agent (azodicarbonamide) with simultaneous structure fixation by the vulcanization network. It was established that the material's morphology (ranging from quasi-spherical to stochastically trabecular) and the fraction of open pores (from 1 to 91%) are determined by the SB concentration (2–10 phr) and the duration of the first stage (5–9 min). It was shown that the trabecular structure with high tortuosity of pore channels exhibits maximum sorption capacity (up to 17.5 g/g for 15W40 oil) and effectively retains the sorbate due to capillary forces. A tendency of the material to swell in hydrocarbons was identified, which limits its service life during multiple "sorption-pressing" cycles. The developed solution paves the way for the targeted design of structure with predetermined sorption properties.

Keywords: open-cell elastomeric materials, ethylene-propylene-diene rubber, EPDM, two-stage foaming, oil sorbent.

Для цитирования
Толстов А.М., Наумова Ю.А., Поповских Е.Г., Трусов А.С. Рецептурно-технологические решения по управлению морфологической структурой вспененных эластомерных материалов на основе СКЭПТ // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 250–272. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-250-266

For citation
Tolstov A.M., Naumova Y.A., Popovskikh E.G., Trusov A.S. Formulation and Technological Approaches for Controlling the Morphological Structure of Foamed Elastomeric Materials Based on EPDM. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 250–266. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-250-266

© 2026, Толстов А.М.. и др. / Tolstov A.M. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Ключевыми характеристиками синтетического полимерного нефтесорбента, которые свидетельствуют о его эффективности являются: маслоемкость, гидрофобность, скорость впитывания нефтепродуктов, кратность применения и др. [1–3]. Данные показатели определяются, прежде всего, двумя важнейшими факторами – природой сорбента и его морфологической структурой. Чтобы обеспечить эффективность работы нефтесорбента и в полной мере реализовать потенциал данных факторов требуется реализация совокупности методов и инструментов, последовательности изысканий, содержащих в себе научные знания, т. е. технологии.

Целью данной работы являлось исследование влияния рецептурно-технологических параметров на закономерности формирования морфологической структуру открытопористых эластомерных материалов (ОПЭМ) на основе СКЭПТ для производства нефтесорбирующих материалов. ОПЭМ получали по технологии двухстадийного вспенивания в пресс-форме, где первый этап осуществляется на прессу с избыточным давлением на резиновую смесь, второй – путем продолжения процесса вспенивания в печи при атмосферном давлении (рисунок 1).

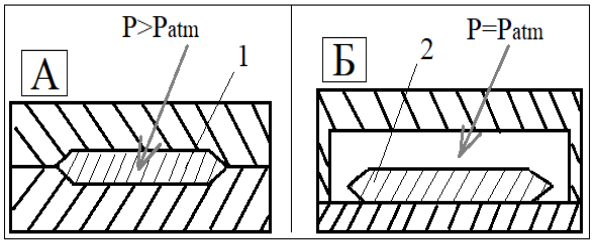


Рисунок 1. Схема прессования по двухстадийной технологии вспенивания в пресс-форме: А) – 1 стадия с избыточным давлением на резиновую смесь внутри пресс-формы при полном заполнении; Б) – 2 стадия при атмосферном давлении. 1 – резиновая смесь, 2 – полуфабрикат после 1 стадии вспенивания

Figure 1. Scheme of pressing using two-stage foaming technology: A) – 1 stage with excess pressure on the rubber mixture inside the mold when completely filled; B) – 2 stage at atmospheric pressure. 1 – rubber mixture, 2 – semi-finished product after 1 stage of foaming

Процесс формирования пористых полимерных материалов включает три фундаментальные стадии: зарождение газовых пузырьков, их рост и стабилизацию ячеистой структуры [4, 5]. Ключевым фактором, определяющим конечную морфологию структуры эластомерного материала (размер пор, их распределение и открытость), является соотношение между скоростями образования газообразных продуктов при разложении порообразователя и сшивания полимерной матрицы при вулканизации [6, 7].

На основании полученных ранее данных [8] и анализа кинетики процессов были сформулированы основные требования для гарантированного получения равномерной открытопористой структуры: во-первых, скорость газовыделения должна существенно опережать скорость вулканизации. Второе необходимо условие – следует прерывать процесс вулканизации на стадии не полной, но достаточной для набора прочности густоты трехмерной сетки и продолжать процесс без давления.

Реализовать стабильную по размеру ячеек и распределению открытопористую структуру в рамках одностадийной технологии достаточно сложно, поскольку, чтобы обеспечить необходимые физико-механические характеристики и зафиксировать газо-ячеистую структуру требуется довести вулканизацию до оптимума. В работе [8] был проведен сравнительный анализ одно- и двухстадийного способов получения открытопористых эластомерных материалов на основе этилен-пропилен-диенового каучука (СКЭПТ). Было установлено, что именно двухстадийный режим с бинарной системой порообразователей позволяет направленно регулировать морфологию материала за счет температурного и временного разделения стадий вспенивания и вулканизации. Наибольшую сорбционную эффективность продемонстрировали образцы, полученные при температуре первой стадии 130 °С, что обеспечило формирование открытой макропористой структуры. Однако при плотности в 80 кг/м^3 вспененного материала, водопоглощение составило 420%, что соответствует 40% доли открытых пор. С функциональной точки зрения, закрытые поры представляют собой неиспользуемый для сорбции объем. Более того, изолированные газонаполненные полости выступают в роли структурного «балласта», увеличивая плавучесть и препятствуя эффективному погружению материала в сорбат. Следовательно, для достижения максимальной эффективности нефтесорбента долю закрытых пор в его структуре необходимо минимизировать, стремясь к нулевому значению.

При создании материала с абсолютно прогнозируемой структурой, но разными переменными в составе рецептуры, необходимо выявить более глубокие, фундаментальные принципы управления процессом. Оптимизация состава композиции (введение наполнителей, мягчителей, модификаторов) представляет собой сложную многопараметрическую задачу. Поэтому первым этапом данного исследования стала разработка упрощенной модельной композиции, позволяющей установить реперные зависимости между технологическими параметрами, реологическими свойствами смеси и формируемой пористой структурой, исключив влияние многочисленных добавок.

Первая стадия (низкотемпературная): проходится при температуре активации низкотемпературного порофора (НТП) и под высоким давлением (4–7 МПа). На этой стадии в подвулканизованной полимерной матрице происходит зародышеобразование и коалесценция пузырьков, что закладывает основу для открытой макропористой структуры. В исследовании была сформирована выборка из следующих НТП: карбонат и бикарбонат аммония (БКА), 4,4′-Оксибис-бензенсульфонилгидразид (ОБСГ) и бикарбонат натрия (БКН). Все эти вещества при разложении выделяют неполярные газы, которые хорошо растворяются в неполярном СКЭПТ каучуке, тем самым создавая большую диффузию в объеме резиновой смеси.

ОБСГ был отвергнут по причине экзотермической реакции – это могло негативно повлиять на преждевременную подвулканизацию, до момента полного разложения НТП. Также ОБСГ является очень дорогим порофором, что необходимо учитывать в условиях коммерческого промышленного производства.

Карбонат и бикарбонат аммония имеют ряд недостатков. Их температура разложения начинается от 35 °C, что является нетехнологичным при смешении ингредиентов резиновой смеси, где активно идут тепловыделения за счет сдвиговых деформаций [9]. В процессе термолиза (1, 2) выделяется огромное количество аммиака, что представляет большую угрозу здоровья.

$$(NH_4)_2CO_3 \xrightarrow{T} 2NH_3 + CO_2\uparrow + H_2O \quad (1)$$

$$NH_4HCO_3 \xrightarrow{T} NH_3 + CO_2\uparrow + H_2O \quad (2)$$

Существуют методы повысить термостойкость бикарбоната аммония, путем модификации его лимонной кислотой (3):

$$3(NH_4)_2CO_3 + 2C_6H_8O_7 \xrightarrow{T}$$
$$2(NH_4)_3C_6H_5O_7 + 3CO_2\uparrow + 3H_2O \quad (3)$$

Такая модификация повышает термостойкость КБА и смещает начальную температуру разложения в сторону высоких температур (90 °C – 110 °C). Конечными продуктами реакции являются цитрат аммония, вода и углекислый газ (около 95%). Однако, цитрат аммония является термически нестабильной солью и также при повышенной температуре (> 180 °C) может выделять аммиак:

$$NH_4)_3C_6H_5O_7 \rightarrow C_6H_8O_7 + 3NH_3\uparrow \quad (4)$$

Гидрокарбонат натрия является более безопасным порофором, который в ходе реакции разложения не образует токсичных веществ:

$$2NaHCO_3 \rightarrow Na_2CO_3(тв.) + CO_2\uparrow + H_2O \quad (5)$$

Карбонат натрия является термически устойчивой солью, которая остается абсолютно инертной в составе резиновой смеси. Это довольно распространенный неорганический порофор, который используется индивидуально или совместно с азодикарбонамидом [10]. Исходя из стехиометрического уравнения выделяется большое количество газа около 250 мл/г. Обычно БКН модифицируют лимонной кислотой [11–13] чтобы повысить температуру разложения. Это необходимо, если требуется вспенивать полиэтилены и полипропилен, а для этого температура его разложения должна быть выше температуры плавления пластиков. Однако, в нашем случае требуется менее высокая температура выделения газообразных продуктов, поэтому использовали БКН в чистом виде без дополнительной модификации.

За счет низкой температуры реакции и высокой скорости газовыделения [10] до момента образования вулканизационной сетки происходит диффузия газа в объеме полимерной смеси, что приводит к эффекту «рыхления» структуры.

Вторая стадия (высокотемпературная): осуществляется при температуре разложения высокотемпературного порофора (ВТП), атмосферном давлении и служит для основного роста, сформированных после перовой стадии, газовых пузырьков – окончательного вспенивания материала до заданной плотности и фиксации полученной структуры за счет достижения оптимума вулканизации полимерной матрицы, в стенках образованных ячеек.

Такой подход предоставляет максимальное количество степеней свободы для управления процессом: позволяя оптимизировать морфологическую структуру на стадии формирования пор и на последующей стадии фиксировать физико-механические свойства материала.

Материалы и методы

В работе использовали этилен-пропилен-диеновый каучук (СКЭПТ) марки Keltan с содержанием этилиденнорборнена 8%, пропилена 55%, и вязкостью 60 ед. Муни, В состав композиций вводили: нафтеновое масло, технический углерод N330 (ТУ) (АО «ЯТУ имени В.Ю. Орлова»), тальк, азодикарбонамид (АДК) производства KUM YANG CO., LTD и бикарбонат натрия (БКН). Вулканизующая система включала серу и ускорители классов тиурама, тиазолов и дитиокарбамата цинка. В качестве активаторов и кикеров реакции разложения ВТП применялись коммерческие марки оксид цинка (ZnO) и стеариновая кислота (StAc). На основании этих ингредиентов были изготовлены маточная и модельная резиновая смеси.

Для исследования кинетики вспенивания и вулканизации использовали: реометр Foam Force Rheometer GT-M2000F. Для оценки реакции терморазложения порофора исследования проводили с использованием методов ТГА и ДСК, выполненные на приборе TGA/DSC3 Mettler Toledo, с условиями испытаний нагрева 10 °С/мин в среде воздуха. Для анализа морфологии и размера ячеек применяли микроскоп Levenhuk. Сорбирующие характеристики ОПЭМ исследовали по ГОСТ 33627–2015. В качестве сорбирующей жидкости использовали дизельное топливо и моторное масло 15W40 с плотностью 863 кг/м^3 и 881 кг/м^3 соответственно. Водопоглощение измеряли согласно стандарту ASTM 1056. Долю открытых пор для ОПЭМ рассчитывали по формуле (1):

$$V = \frac{(m1\text{-}m0)}{m0} * \frac{\rho 0}{(\rho 1 - \rho 0)}, \% \qquad (6)$$

где, m_0 – масса пробы до испытания, г; m_1 – масса пробы после испытания на водопоглощение, г; ρ_0 – плотность ОПЭМ, кг/м^3; ρ_1 – плотность воды, кг/м^3.

Плотность резиновой смеси и ОПЭМ определяли по ГОСТ 409–2017, на лабораторном плотномере VIBRA.

По методике ГОСТ Р 59112–2020 исследовали гель-золь фракцию вспененных вулканизатов. Коэффициент вспенивания вычисляли на пластометре типа ИИРТ, фиксируя перемещения штока.

Результаты и обсуждения

Разработка модельной композиции

В состав модельной смеси были включены только необходимые компоненты для осуществления процессов вулканизации и вспенивания: эластомерная основа (СКЭПТ), зародышеобразующий агент – тальк с рекомендуемой дозировкой 2 масс. ч. [14–16], активный наполнитель и пластификатор, системы вулканизации и порообразования.

Технический углерод (ТУ) является активным усиливающим наполнителем. Марка ТУ N330 обеспечивает высокий модуль наравне со сравнительно невысоким загущением резиновой смеси по сравнению с другими доступными марками сажи [17].

Как следует из данных литературы [18], реологические свойства, в частности вязкость исходной резиновой смеси, оказывают определяющее влияние на кинетику разложения порообразователя и, как следствие, на конечную плотность. С целью снижения факторов, влияющих на вспенивание, была поставлена задача на установление максимально эффективной вязкости резиновой смеси. Для этого исследовалась зависимость коэффициента вспенивания от вязкости маточной композиции (смесь без вулканизующей группы), наполненной сажей при фиксированной концентрации порообразователя. Именно АДК несет функцию роста пузырьков, обеспечивает плавное расширение предварительно сформированной на первой стадии ячеистой структуры. Такой механизм воздействия позволяет целенаправленно регулировать конечную плотность материала, позиционируя АДК в качестве ключевого агента, ответственного за финальное увеличение объема и достижение заданных результирующих плотностных характеристик пеноматериала. Основой модельной композиции является создание маточной смеси, содержащей 5 масс. ч. высокотемпературного порофора. (табл 1.).

Таблица 1.

Маточная смесь

Table 1.

Masterbatch

Ингредиент / ingredient	Содержание, масс. ч. / Content, phm.
СКЭПТ (EPDM)	100
Тальк (Talcum)	2
ТУ N330 (CB)	30
АДК (ADC)	5
Нафтеновое масло (oil)	0–100

Регулирование вязкости композиции осуществляли путем введения в состав нафтенового масла. Коэффициент вспенивания (или коэффициент расширения) определяли методом пластометрии с использованием прибора ИИРТ (рисунок 6). Пробу маточной композиции загружали в вертикальный рабочий канал пластометра, с загерметизированным выходом капилляра. Сверху на пробу герметично устанавливался шток без нагрузки. В процессе разложения порофора при температуре 220^0 С газ создавал расширяющее воздействие внутри полимерной матрицы и выдавливал шток, по перемещению которого оценивали коэффициент объемного вспенивания.

Было установлено, что с повышением концентрации мягчителя увеличивается продолжительность процесса смешения. Наполнение маслом приводит к чрезмерному набуханию полимерной матрицы, что вызывает резкое падение вязкости и, как следствие, снижение способности смеси к созданию сдвиговых напряжений при перемешивании смеси (рисунок 7).

Таким образом, оптимальная концентрация мягчителя определялась на основе компромисса между двумя факторами: достижением оптимальной вязкости, обеспечивающей эффективное расширение материала при вспенивании и сохранением реологических свойств, необходимых

для обеспечения технологичности процесса переработки и получения однородной структуры без снижения производительности.

Исходя из зависимостей наиболее эффективная вязкость обеспечивается содержанием 80 масс. ч масла на 100 масс. ч. каучука. Чтобы обеспечить конечную плотность вспененного материала в 80 кг/м³, необходимо расширить резиновую смесь в 13 раз. Таким образом требуется повысить содержание азодикарбонамида в композиции до 16 масс. ч.

Для снижения температуры термолиза АДК [19–21] применяются активаторы («кикеры»). Наиболее известными и эффективными из них являются комплексы на основе оксида цинка и стеариновой кислоты, которые способны снижать температуру разложения АДК до 150–170 °С [22, 23].

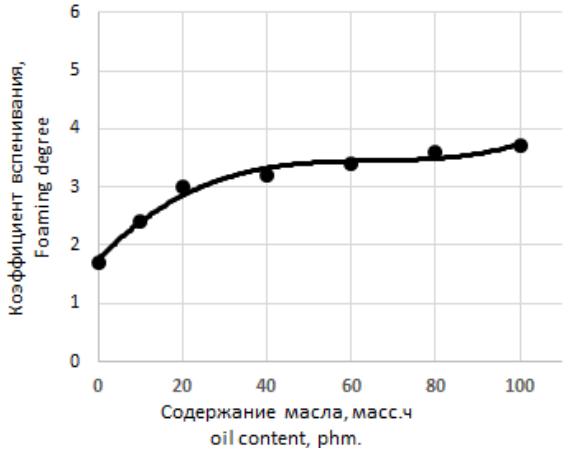


Рисунок 2. Зависимость коэффициента вспенивания маточной смеси от количества нафтенового масла

Figure 2. Dependence of the foaming coefficient of the masterbatch on the amount of naphthenic oil

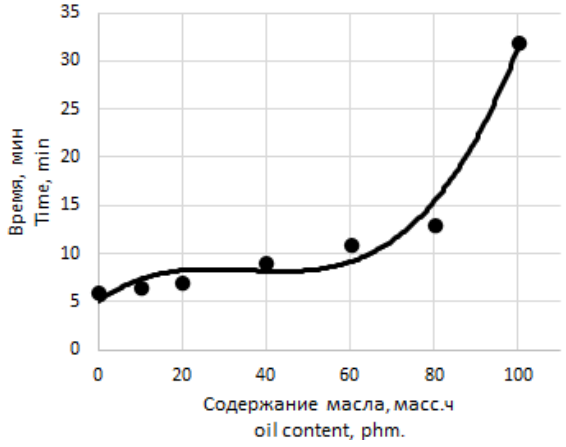


Рисунок 3. Зависимость времени смешения маточной смеси в резиносмесителе от количества нафтенового масла

Figure 3. Dependence of the mixing time of the masterbatch in a rubber mixer on the amount of naphthenic oil.

Как показано в работе [24], ключевым фактором является не как таковое применения активаторов, а их оптимальное соотношение с порообразователем. Авторами был установлен синергизм при совместном действии, позволяющий снизить концентрацию дорогостоящего АДК без ухудшения эффективности вспенивания при пониженных температурах. Оптимальным было признано массовое соотношение компонентов системы «порофор-оксид цинка-стеариновая кислота» – 0,75 / 0,19 / 0,06.

Данные дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА), представленные на рисунке 8, наглядно иллюстрируют влияние указанной композиции на термолиз АДК: наблюдается четкое смещение пиков экзотермической реакции в область более низких температур. Анализ позволил зафиксировать температуру начала разложения и температуру максимальной скорости газовыделения.

Как говорилось ранее, для целенаправленного управления морфологической структурой и конечными свойствами материала решающее значение имеет фиксация структуры, образованной на первой стадии вспенивания, где идет активная работа НПВ при низких температурах (рисунок 9).

Анализ графика ДСК/ТГА совместного использования порофоров в одной рецептуре, отчетливо иллюстрирует 2 пика реакции которые разделяются широким температурным диапазоном (рисунок 10). Температура в 120 °С обеспечивает высокую скорость термолиза БКН (рисунок 11). Для фиксации пористой структуры при такой температуре требуется активная вулканизующая группа с длительным индукционным периодом.

В резиновой промышленности для вулканизации каучука обычно используются системы вулканизации серой или пероксидом [25–27]. Наличие ENB третьего диена, в выбранном СКЭПТ каучуке, позволяет проводить его сшивку с использованием серных агентов, которые как известно создают лучший комплекс физико-механических свойств по сравнению с пероксидным.

Ключевым параметром является время подвулканизации – время, необходимое для начала активного образования поперечных связей при заданной температуре. С одной стороны, это время должно быть достаточно продолжительным, чтобы обеспечить полное насыщение полимерной матрицы газами НТП до начала структурирования, предотвращая дефекты. С другой стороны, оно должно быть достаточно коротким для минимизации производственного

цикла и работать на создание заданной морфологии [28, 29]. Использование совместно нескольких ультраускорителей серной вулканизации позволяет достигать требуемой скорости вулканизации. Таким образом, была разработана активная вулканизующая группа, использующая в качестве активаторов те же вещества, которые способствуют разложению АДК – оксид цинка и стеариновую кислоту.

В условиях синергических эффектов, потребовалось скорректировать концентрацию кикеров, чтобы сохранилась эффективность всех термических реакций [24].

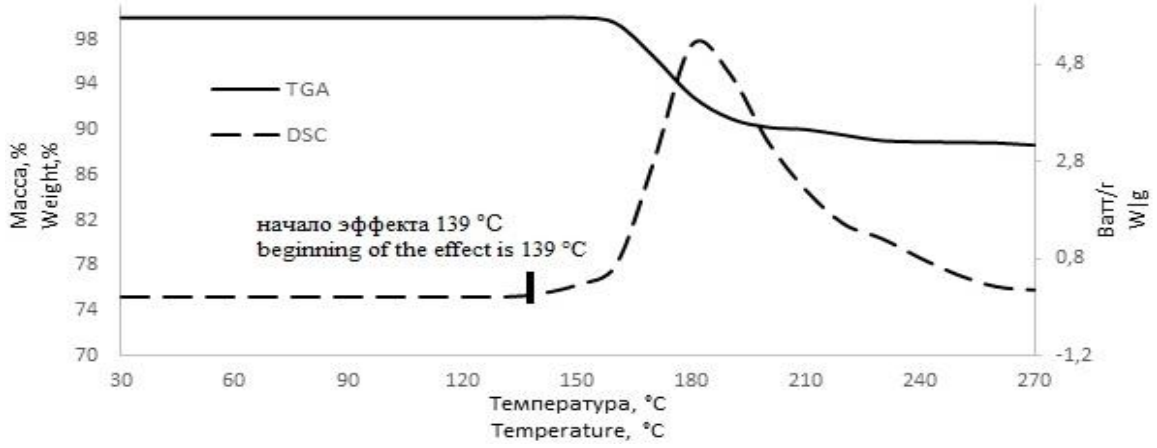


Рисунок 4. ТГА/ДСК высокотемпературного комплекса [24] в составе маточной смеси

Figure 4. TGA/DSC of the high-temperature complex [24] in the masterbatch

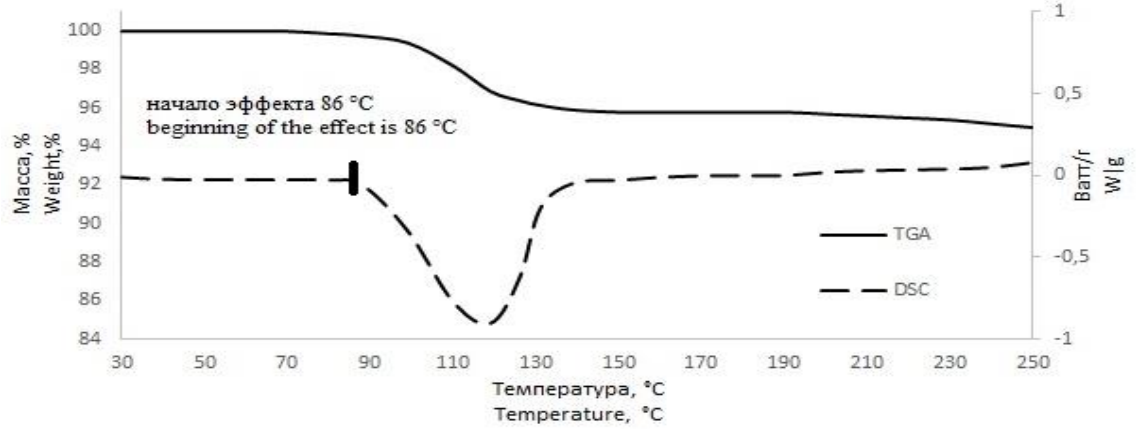


Рисунок 5. ТГА/ДСК смеси БКН: СКЭПТ – 1:9

Figure 5. TGA/DSC of the mixture SB: EPDM – 1:9

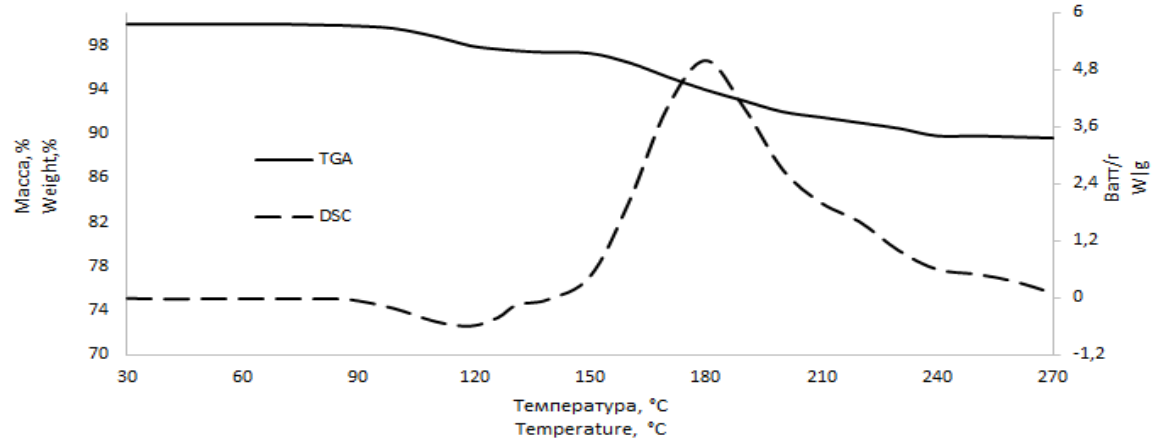


Рисунок 6. ДСК/ТГА совместного использования НТП (10 масс. ч.) и ВСП [3] в составе маточной смеси

Figure 6. DSC/TGA of the combined use of low-temperature foaming agent (10 parts by weight) and high temperature foaming agent [3] in the composition of the masterbatch

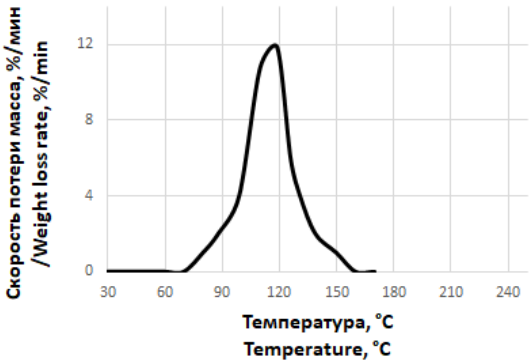


Рисунок 7. Скорость потери массы для БКН при нагреве исходя из данных ТГА/ДСК смеси БКН: СКЭПТ – 1:9

Figure 7. Rate of mass loss for BKN during heating, basic on TGA/DSC of the mixture SB: EPDM – 1:9

Таблица 2.

Резиновая смесь № 1

Table 2.

Rubber blend № 1

Ингредиент / Ingredient	Содержание, масс. ч. / Content, phm.
СКЭПТ (EPDM)	100
Тальк (Talcum)	2
ТУ N330 (CB)	30
Нафтеновое масло (oil)	80
АДК (ADC)	13,5
ZnO	5,6
StAc	2,2
БКН (sodium bicarbonate)	2 – 10
Вулканизующая группа (Vulcanizing group)	5,2

Технологические параметры

Реометрическая кривая вулканизации резиновой смеси без БКН при 120^0 С дает представление о длительном индукционном периоде и высокой скорости в основном периоде (рисунок 12).

Для регулирования морфологической структуры материала при фиксированных времени и температуре на каждом из этапов получения ОПЭМ изучали влияние концентрации низкотемпературного порофора – бикарбоната натрия (2,4, 6, 8, 10 масс. ч.) на кинетические закономерности вулканизации и газовыделения (таблица. 2). С ростом концентрации БКН установлено увеличение индукционного периода, а также снижение приращения крутящего момента и скорости в главном периоде. Данные явления можно связать с образованием газовой фазы, распределенной внутри полимерной матрицы, а также эндотермическим характером процесса разложения бикарбоната натрия, что затрудняет формирование сетчатой структуры [30, 31].

Данные реометра по кривым давления в камере позволяют с уверенностью сказать, что термическое разложение НТП происходит до наступления главного периода вулканизации. Температура 120^0 С позволяет четко отделить процесс термического разложения НТП от реакции разложения ВВС, для которой начало реакции превращения находится выше 140^0 С (рисунок 8, 10).

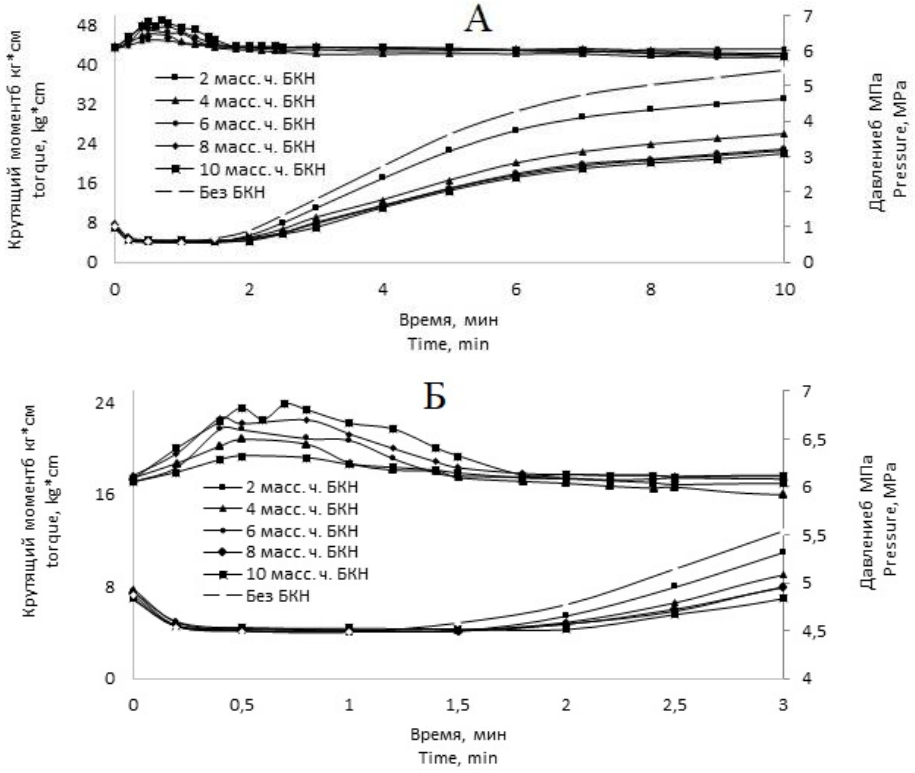


Рисунок 8. Кинетики вулканизации и порообразования резиновой смеси № 1 при 120 °С: А) Область шкалы времени от 0 до 10 мин. Б) область шкалы времени от 0 до 3 минут

Figure 8. Vulcanization and pore formation kinetics of rubber compound No. 1 at 120 °C: A) Time scale range from 0 to 10 minutes. B) Time scale range from 0 to 3 minutes

В работе [31] показано, что при использовании двухстадийной технологии оптимальная предварительная степень вулканизации, достигнутая на первой стадии и составляющая 30%, способствует формированию газовых ячеек максимального размера. Для реализации этого условия в работе время первой стадии было определено на основе анализа реометрических данных (рисунок 12). Время, соответствующее достижению 30%-ной степени сшивки, составило 240 секунд и было принято в качестве «стартовой» реперной точки.

Выбирая продолжительность 1 этапа получения изделия при температуре 120 °С в производственных условиях, необходимо учесть прогрев резиновой смеси в пресс-форме. С использованием программного продукта Elcut с учетом теплофизических характеристик эластомерного материала и пресс-формы, геометрических и граничных условий на основании решения дифференциального уравнения теплопроводности построены температурные поля и осуществлено прогнозирование требуемого времени на 1 этапе процесса (рисунок 13), которое составило при Т = 120 °С 6 минут для первого этапа: 2 мин на прогрев резиновой смеси и 4 мин – на сам процесс вспенивания и вулканизации. Второй этап формования проводили при Т = 180 °С и продолжительности, отвечающей оптимальному времени вулканизации и до стабилизации роста вулканизата. В дальнейшем режимы вулканизации на первой и второй стадиях корректировались с учетом результатов оценки структуры вулканизатов по данным гель-золь фракции ОПЭМ, в зависимости дозировки БКН (таблица 3).

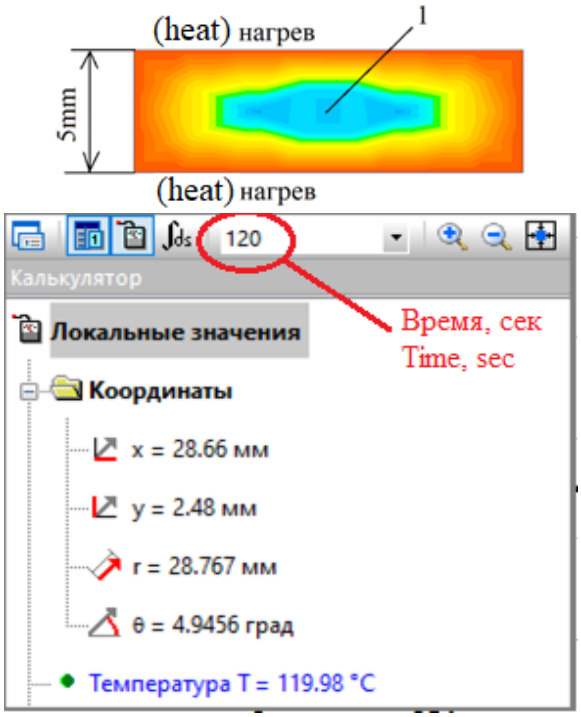


Рисунок 9. Моделирование нестационарной теплопередачи для прогрева резиновой смеси в пресс-форме, построенной в ПО «Elcut». Температура пресс-формы 120 градусов. Точка «1» соответствует значению для локального участка, принятого как равноудаленная от греющих поверхностей на 120 секунде от начала прогрева

Figure 9. Simulation of transient heat transfer for heating a rubber compound in a mold, built in Elcut software. The mold temperature is 120 degrees. Point "1" corresponds to the value for a local area assumed to be equidistant from the heating surfaces at 120 seconds from the start of heating

Морфология ОПЭМ

Продолжая решение задач по обоснованию технологических параметров получения ОПЭМ, далее в работе проводили оценку морфологических особенностей их структуры при различных временах первой и второй стадии. Для полученных образцов ОПЭМ были определены размеры ячеек с использованием оптической микроскопии, плотность, водопоглощение, процентное содержание открытых пор (таблица 3).

Данные оптической микроскопии позволили разделить сформированные морфологические структуры образцов на 3 группы (рисунок 14).

Группа I – структура сформирована с отчетливыми квазисферическими ячейками, разделенными тонкими, локально перфорированными стенками (рисунок 15 а). Для количественного описания такой организации введены морфометрические параметры: средний диаметр ячеек и (δ) толщина стенок ячеек (1) [35].

$$\delta = d\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{\rho_f}{\rho_\chi}}}-1\right], \qquad (7)$$

где d – диаметр ячейки, мкм; ρ_f – плотность вспененного материала (г/см^3) и ρ_χ – плотность резиновой смеси (г/см^3).

Данные оптической микроскопии позволили разделить сформированные морфологические структуры образцов на 3 группы (рисунок 14).

Группа II – морфология материала соответствует открыто-ячеистой структуре с преобладанием квазисферических пор, в которой участки с сохранёнными тонкими стенками соседствуют с зонами их частичного или полного разрыва, что придает структуре выраженную рыхлость (рисунок 10 б). Размер ячейки эмпирически возможно определить по микрофотографиям, а уравнение 8 подходит для расчета размера толщины стенки.

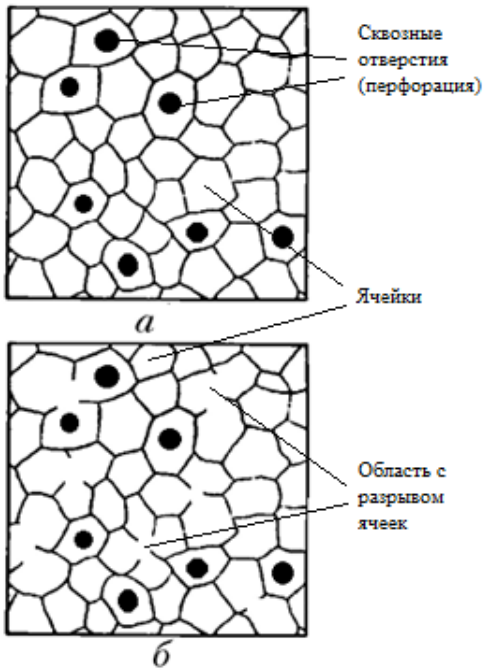


Рисунок 10. Схематичное изображение квазисферической структуры с перфорацией стенок ячеек (а) и с участками разрыва стенок (б)

Figure 10. Model representation of a quasi-spherical structure with perforation of cell walls (a) and with areas of wall rupture (b)

Группа III – Вспененные материалы, характеризующиеся трабекулярной стохатической морфологией (рисунок 11). Данная структура представляет собой трехмерную сеть беспорядочно ветвящихся и взаимосвязанных эластичных элементов (стренг), формирующих иррегулярную систему пор.

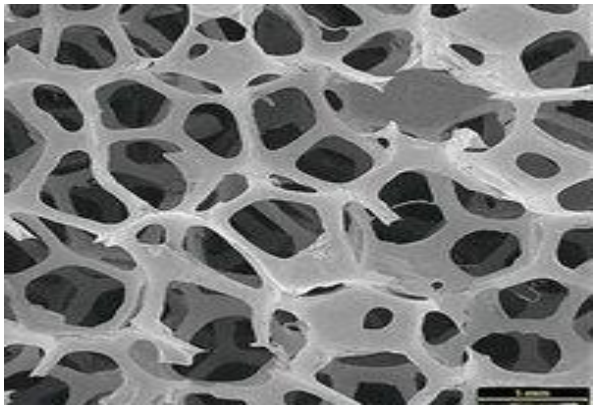


Рисунок 11. Схематичное изображение трабекулярной стохатической структуры

Figure 11. Model representation of a trabecular stochastic structure

Отсутствие четких линейных границ («ребер») ячеек и идентифицируемых вершин делает невозможным применение для данного материала количественных дескрипторов, характерных для ячеистых структур (например, толщина стенки или диаметр ячейки). Наблюдаемая топологическая организация морфологически схожа со структурой трабекулярной костной ткани или скелета некоторых порифер [32]. Чтобы описать подобную анизотропную структуру авторы [33, 34] ввели понятия тензора, в основе которого лежит количественная характеристика – среднее расстояние между центрами соседних пор L. Нами предложена упрощенная форма расчета (7), чтобы сравнивать морфологию образцов:

$$L = \frac{\sum l}{\mathrm{I}(\theta)}, \text{ мм} \qquad (8)$$

где $\sum \boldsymbol{l}$ – суммарная длина тестовых линий, ограниченные выбранным фрагментом площади ОПЭМ; $\mathrm{I}(\boldsymbol{\theta})$ – суммарное число пересечений между линиями сетки и границами «материал-пора» для всех тестовых линий (рисунок 12).

В ходе практического эксперимента для режима 120 °С / 5 мин при всех концентрациях БКН, а также для материала, произведенного в условиях 120 °С / 6 мин при дозировке бикарбоната натрия 10 масс. ч., был получен брак. Для этих проб наблюдалось образование крупных рытвин и внутренних трещин на первой стадии формовой вулканизации, а также наличием высокой липкости (рисунок 18), что является следствием низкой густоты вулканизационной сетки.

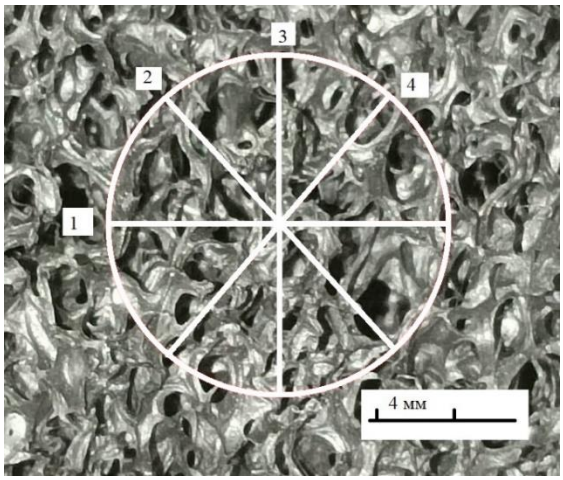


Рисунок 12. Горизонтальный срез пробы 6–6. 1, 2, 3, 4 – тестовые линии внутри выбранной области

Figure 12. Horizontal section of sample 6–6. 1, 2, 3, 4 – test lines within the selected area

Можно отметить зависимость полученной морфологической структуры от продолжительности вулканизации на первой стадии и содержания БКН. Продолжительность определяет содержание гель фракции, которая варьируется от 20 до 80%. Согласно данным таблицы 3 ОПЭМ с показателем гель фракции 20–30% соответствует Группе III, 30–50% – Группе II и от 45% и выше – Группе I.

Согласно данным представленным в таблице 3 и на рисунке 19 оптимальным сочетанием структурных характеристик ОПЭМ, определяющих их потенциал в качестве сорбентов, являются образцы № 8, 9, 14, 15, для дальнейшего изучения сорбционных свойств.

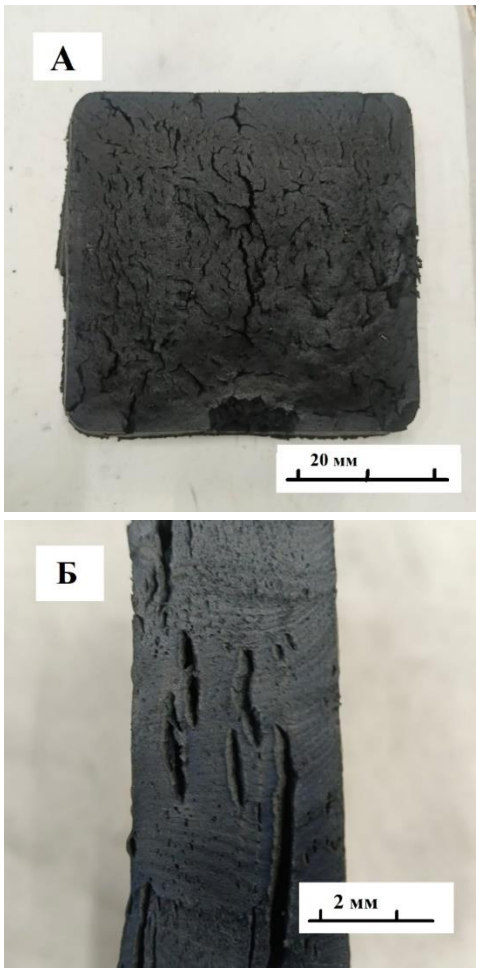


Рисунок 13. Материал, полученный после первой стадии вспенивания на технологическом режиме 120 °С / 5 мин: А) вид сверху; Б) боковой срез

Figure 13. Material obtained after the first stage of foaming at a process temperature of 120 °C/5 min: A) top view; B) side section

Сорбция нефтепродукта в основном объясняется капиллярными явлениями [38, 39], определяемыми морфологической структурой сорбента и свойствами жидкости. Капиллярные силы формируются поверхностным натяжением жидкости и ее межмолекулярным взаимодействием и взаимодействием со стенками пор сорбента. Они ответственны за захват и удержание сорбирующей жидкости внутри сорбента. В ОПЭМ гидрофобная поверхность стенок пор является «промотором» этого процесса.

Согласно работам [1–3, 37, 38] ключевыми факторами, определяющими эффективность сорбции вспененных эластомерных материалов, являются вязкость нефтепродукта, олеофильность и извилистость сорбента. Оценку сорбционной способности разработанных ОПЭМ в зависимости от особенностей их морфологической структуры определяли на основании таких количественных характеристик как сорбционная емкость, скорость сорбции и регенерируемость (таблица 4).

Сорбционная емкость. Данный параметр характеризует максимальное количество нефтепродукта, которое может поглотить единица массы или объема сорбента (г/г или мл/г). Емкость определяется, главным образом, долей полезного (сорбирующего) объема, который складывается из объёма открытых, сообщающихся пор. В ходе эксперимента, после погружения ОПЭМ в нефтепродукт наблюдается необратимое увеличение объема сорбента. Это объясняется набуханием стенок ячеек материала в следствии абсорбции. СКЭПТ практически не имеет стойкости к углеводородам, так как является неполярным каучуком, однако, в нашем конкретном случае это является больше положительным свойством, чем отрицательным. Пересчет плотности после первичной сорбции ОПЭМ дает представление о значительном улучшении этой характеристики, что перекрывает негативный эффект абсорбции.

Образцы с двумя типами морфологической структуры (Группы II и III) были испытаны при контакте с двумя видами углеводородов, отличающихся вязкостью – дизельным топливом и минеральным маслом 15W40. Выявлено, что ОПЭМ с трабекулярной структурой легко сорбирует жидкости, однако не способен удерживать дизель, в момент извлечения материала из испытательной емкости, легкий нефтепродукт вытекает из объема материала. В случае с образцами № 14 и № 15 (таблица 4) – время проникновение масла в объем сорбента измерялось сутками.

Скорость сорбции. Динамический параметр, определяющий время достижения равновесной емкости, критически важен для оперативного реагирования при ликвидации разливов. Как говорилось ранее, структура определяет способность к сорбции в зависимости от вязкости жидкостей. Чтобы объяснить данное явления обратились к морфологической характеристике – «извилистость» (tortuosity) [37], который описывает

отношение реальной длины диффузионного пути жидкости в поре к прямой линии. Низкий коэффициент извилистости, характерный для материалов с открытой макропористой структурой, обеспечивает быстрое капиллярное всасывание и проникновение сорбата вглубь материала, но также снижает удерживающую способность сорбата внутри ОПЭМ. Высокой скоростью сорбции при первичном и повторных испытаниях обладали образцы 8 и 9, что закономерно, учитывая низкий коэффициент извилистости.

Регенерируемость (многократность применения). Способность к многократному циклу «сорбция–механический отжим» является ключевым требованием к современным экономичным и экологичным сорбентам. Данное свойство присуще в первую очередь упругим эластомерам с устойчивой пространственной сеткой. Для прогнозирования ресурса материала необходимо оценить его сопротивление циклическому сжатию и остаточную деформацию после n циклов нагружения. Важным сопутствующим фактором является стойкость к набуханию в нефтепродуктах. Значительное набухание полимерной матрицы приводит к снижению прочности связи между макромолекулами и, как следствие, к прогрессирующему накоплению повреждений после каждого цикла отжима, что снижает эффективность регенерации.

Таким образом, для комплексной оценки регенерируемости материала необходимо моделирование условий эксплуатации: предварительное насыщение сорбентом в течение заданного времени с последующим циклическим сжатием. Количественный показатель сорбционной емкости после серии таких циклов является объективным критерием сохранения эффективности и механической целостности материала при многократном использовании (рисунок 14).

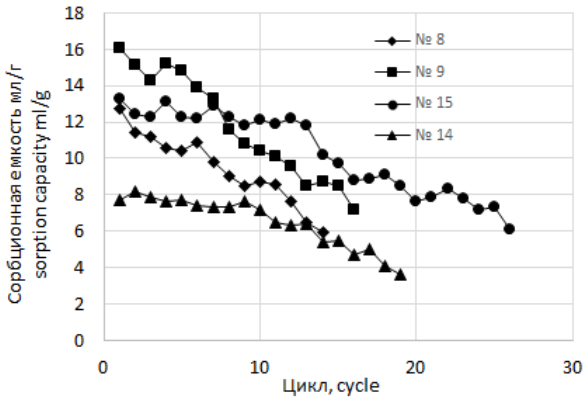


Рисунок 14. Поглощение нефтепродуктов исследуемыми ОПЭМ в последовательных циклах «сорбция–отжим». Для образцов № 8 и № 9 – в масле 15W40, для № 14 и № 15 – в дизельном топливе

Figure 14. Absorption of petroleum products by the studied open-cell foams in successive sorption–pressing cycles. For samples № 8 and № 9 – in 15W40 oil, for № 14 and № 15 – in diesel fuel

Таблица 3.

Данные кинетики вулканизации и вспенивания модельной смеси с различным содержанием БКН

Table 3.

Data of the kinetics of vulcanization and foaming for rubber blend № 1 with different content of sodium bicarbonate

Образец / sample	ML (kg • cm)	MH (kg • cm)	MH-ML (kg • cm)	S2 (kg • cm)	T S2 (s)	MT240s (kg • cm)	PH-PL (MPa)	TP (finish) (s)
без КБН / without SB	4	39	35	4,7	75	15,5	-	-
2 масс. ч. БКН / 2 phm SB	4,2	33	28,8	4,8	98	12,8	0,27	68
4 масс. ч. БКН / 4 phm SB	4,1	26	21,9	4,5	86	8,5	0,4	69
6 масс. ч. БКН / 6 phm SB	4,2	23	18,8	4,6	101	7,3	0,55	75
8 масс. ч. БКН / 8 phm SB	4,1	22,5	18,4	4,5	105	7,3	0,6	90
10 масс. ч. БКН / 10 phm SB	4,4	22	17,6	4,8	127	6,6	0,74	104

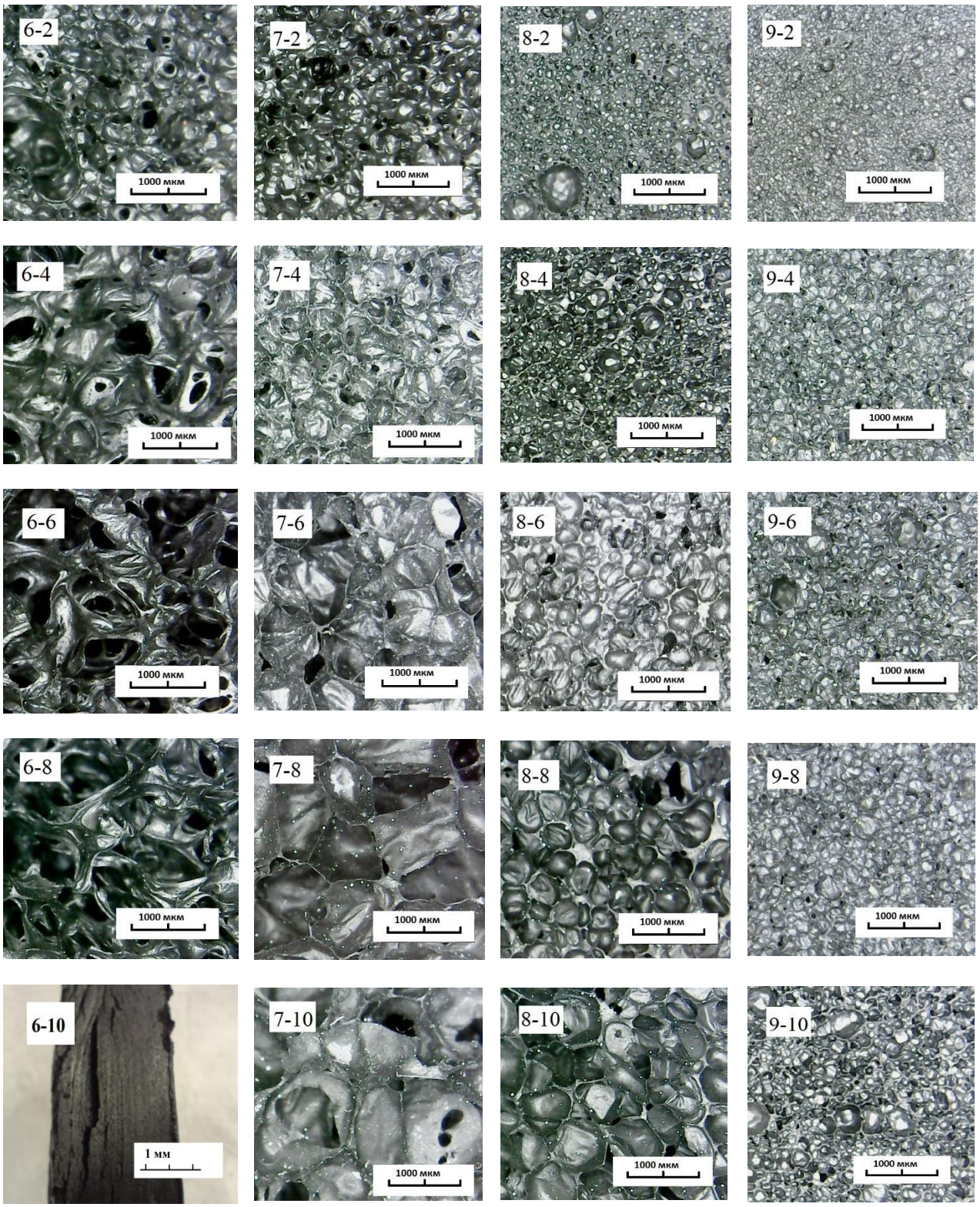


Рисунок 15. Фотографии и микрофотографии внутренней структуры ОПЭМ полученных при разных времени цикла на первой стадии технологии (первая цифра, мин) и концентрации БКН (вторая цифра, масс. ч.). Материал «6–10» – фотография поперечного среза после первой стадии технологии

Figure 15. Photographs and micrographs of the internal structure of open-cell materials obtained at different cycle times in the first stage of the technology (first digit, min) and SB concentrations (second digit, mass parts). Material "6–10" is a photograph of a cross-section after the first stage of the technology

Таблица 4.

Характеристики ОПЭМ на основе модельной смеси № 1, полученные при разных технологических режимах и с различным содержанием БКН

Table 4.

Characteristics of samples based on model mixture No. 1, obtained under different technological conditions and with different content of sodium bicarbonate

БКН, масс. ч / SB, phm	Технологический режим: 1 стадия 1st stage	2 стадия / 2d stage	Средний размер пор, мкм / Average cell size, microns	Плотность, кг/ м^3 / Density, kg/m3	Водопоглощение, % / Water absorption, %	Содержание открытых пор, % / The content of open cellss,%	Гель фракция полуфабриката после 1 стадии технологии, % / The gel fraction of the semi-finished product after the 1st stage of technology, %	Морфологическая Группа / Morphological Group
	Температура^0 С – время, мин / Temperature^0 C – time, min							
2	120 – 5	-	-	-	-	-	11	-
4	120 – 5	-	-	-	-	-	7	-
6	120 – 5	-	-	-	-	-	13	-
8	120 – 5	-	-	-	-	-	8	-
10	120 – 5	-	-	-	-	-	9	-
2	120 – 6	180 – 10	500	112	150	19	24	II–III
4	120 – 6	180 – 10	-	104	420	49	26	III
6	120 – 6	180 – 10	-	86	920	87	21	III
8	120 – 6	180 – 10	-	79	1060	91	23	III
10	120 – 6	-	-	-	-	-	20	-
2	120 – 7	180 – 8	400	101	120	13	36	II
4	120 – 7	180 – 8	750	96	260	28	32	II
6	120 – 7	180 – 8	1600	89	360	35	34	II
8	120 – 7	180 – 8	1900	96	630	67	32	II
10	120 – 7	180 – 8	2400	95	840	88	32	II
2	120 – 8	180 – 7	100	122	42	6	49	I
4	120 – 8	180 – 7	300	111	83	10	47	I
6	120 – 8	180 – 7	800	105	140	16	51	I
8	120 – 8	180 – 7	1000	110	170	21	48	II
10	120 – 8	180 – 7	1400	108	250	30	49	II
2	120 – 9	180 – 7	50	123	6	1	76	I
4	120 – 9	180 – 7	250	125	12	2	71	I
6	120 – 9	180 – 7	300	132	8	1	74	I
8	120 – 9	180 – 7	350	126	26	4	69	I
10	120 – 9	180 – 7	350	135	15	2	72	I

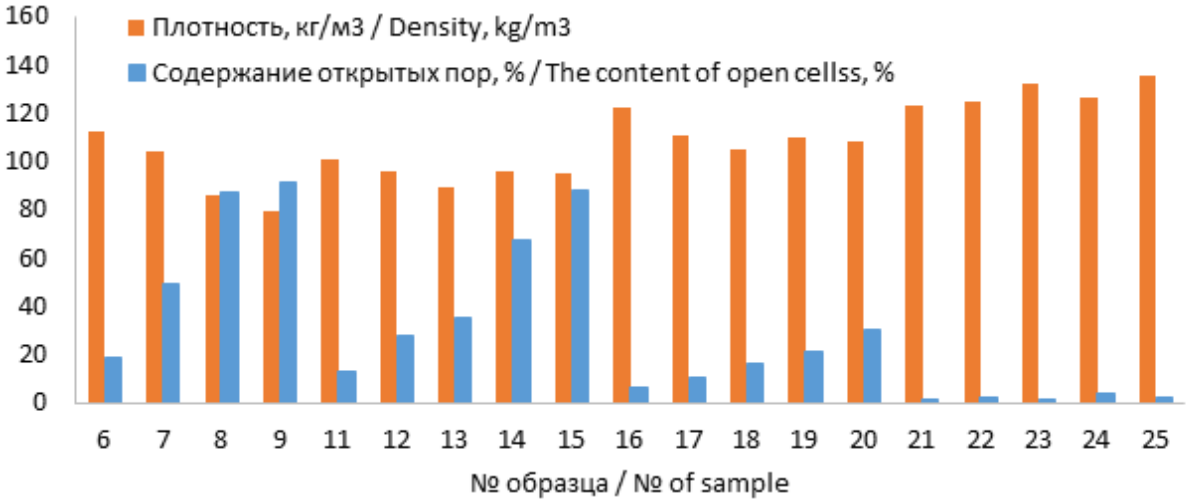


Рисунок 16. Результаты определения плотности и содержания открытых пор в ОПЭМ

Figure 16. Results of determination of density and content of open cells in elastomeric foamed material

Таблица 5.

Сорбционные свойства образцов ОПЭМ № 8, 9, 14, 15

Table 5.

Sorption properties of samples № 8, 9, 14, 15

Показатели ОПЭМ	№ образца по таблице 3 / Sample number according to Table 3			
	8	9	14	15
Плотность, кг/м^3, density, kg/m3	86	79	96	95
Средний размер пор, мкм / Average cell size, microns	–	–	1900	2400
Толщина стенки, мкм / Wall thickness, microns	–	–	94	117
Среднее расстояние между центрами соседних пор, мм / The average distance between the centers of neighboring ports, mm	1,9	2,8	–	–
Коэффициент извилистости / The tortuosity coefficient	1,7	1,6	6,2	4,2
Набухание, % / Swelling ,%	620	640	510	530
Пересчет плотности после сорбции нефтепродукта, кг (ОПЭМ) / м^3 / Recalculation of density after sorption of petroleum product, kg (materials) / m^3	49	44	69	56
Первичная сорбционная емкость в масле 15W40, г/ г Primary sorption capacity in oil 15W40, g/g	14,8	17,5	–	–
Первичная сорбционная емкость в дизеле, г/ г Primary sorption capacity in diesel, g/g	11,2	11,8	7,8	12,9
Первичная скорость сорбции, (г/г) / мин / Primary sorption rate, (g/g) / min	0,47 (oil)	0,75 (oil)	0,12	0,25
Повторная скорость сорбции, (г/г) / мин / Repeated sorption rate, (g/g) / min	2,36 (oil)	2,81 (oil)	0,53	0,87
Количество повторений сорбции до потери эффективность 50%, цикл / The number of sorption repetitions until the loss of efficiency is 50%, cycle	14	16	19	26

Заключение

Апробация технологии производства открытопористых материалов была осуществлена на модельных рецептурах на основе СКЭПТ, содержащих только базовые компоненты. Такой подход позволил выявить ключевые закономерности влияния состава, технологических параметров производства ОПЭМ на структуру и сорбирующие свойства получаемых материалов.

Установлено, что для получения открытопористой структуры ОПЭМ на основе СКЭПТ, при использовании серосодержащих вулканизующих систем, наряду с обеспечением условия опережения скорости газовыделения при разложении порообразователя от скорости вулканизации, необходимо использование бинарной вспенивающей системы на основе низко- и высокотемпературных порофоров. Второй составляющей получения ОПЭМ является реализация двухстадийной технологии компрессионного формования изделий. Это позволяет на первой стадии при Т = 120 °С в течении заданного времени зафиксировать степень завершенности процесса вулканизации на 20–40% и обеспечить полное разложение низкотемпературного порофора. На второй стадии при Т = 180 – обеспечить разложение высокотемпературного порофора и завершить процесс вулканизации. Данные рецептурно-технологические решения обеспечили формирование развитой открытопористой структуры ОПЭМ от стохастически-трабекулярной до квазисферической.

На основании сравнительного анализа сорбирующей способности была проведена оценка наиболее эффективных композиций. Их последующее исследование выявило корреляцию между параметрами пористой структуры (объемом открытых пор, их размером и характером морфологии) и функциональными характеристиками нефтесорбции. В результате сформулированы критерии оптимальной структуры для сорбционных применений: высокий объем открытой пористости (не менее 60%) с преобладанием пор эффективного сорбционного размера (2000 – 3000 мкм) и трабекулярным типом строения если необходимо собирать вязкие нефтепродукты (масла), либо квазисферическим – для сорбции жидкого топлива (бензин, дизель). Для достижения таких структур необходим строгий контроль времени вулканизации на первой стадии технологии компрессионного формования и концентрация низкотемпературного порофора в количестве 6–10 масс. ч. на 100 массовых частей СКЭПТ.

Таким образом, разработанные рецептурно-технологические решение обеспечивают формирование целевой открытопористой структуры ОПЭМ. Перспективным направлением дальнейшего развития работы будет является оптимизация состава эластомерного материала, направленная на повышение его регенерационной способности, обеспечивающей сохранение эксплуатационных характеристик в процессе многократных (не менее 50) циклов «сорбция–механический отжим».

Литература

1 Лисичкин Г.В., Кулакова И.И. Ликвидация аварийных разливов нефти: состояние и проблемы (обзор) // Журнал прикладной химии. 2022. Т. 95. № 9. С. 1082–1110. doi: 10.31857/S0044461822090018

2 Скирдин К.В., Казьмина О.В. Анализ нефтесорбентов: виды, свойства и эффективность применения // Нефтехимия. 2022. Т. 62. № 6. С. 797–815. doi: 10.31857/S002824212206003X

3 Толстов А.М., Наумова Ю.А. О перспективах применения полимерных материалов для сорбентов, предназначенных для очистки воды от нефтепродуктов // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 1. С. 240–248. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-240-248

4 Бакирова И.Н., Зенитова Л.А. Газонаполненные полимеры: учебное пособие. Казань: КГТУ, 2009. 105 с.

5 Клочков В.И., Рыжков В.Л. Производство пористых изделий из эластомеров. Л.: Химия, 1984. 96 с.

6 Жансакова К.С. Пористые теплоизоляционные резины на основе бутадиен-метилстирольного каучука: дис. ... канд. техн. наук. 2022. 128 с.

7 Rostami-Tapeh-esmaeil E., Rodrigue D., Vahidifar A., Esmizadeh E. Chemistry, processing, properties, and applications of rubber foams // Polymers. 2021. V. 13. № 10. P. 1565. doi: 10.3390/polym13101565

8 Толстов А.М., Наумова Ю.А., Поповских Е.Г., Худякова И.П. Роль технологических факторов в формировании структуры открытопористых вспененных материалов на основе этилен-пропилен-диеновых сополимеров путем компрессионного формования // Polymer Science, Series D. 2025. Т. 18. № 1. С. 164–168. doi: 10.1134/S1995421224702058

9 Авдин В.В., Кириллов В.В., Лымарь А.А. Термолиз карбоната и гидрокарбоната аммония как твёрдых охладителей продуктов сгорания топлива // Вестник ЮУрГУ. 2011. Т. 229. № 12. С. 36–40.

10 Petchwattana N., Covavisaruch S. Influences of Modified Chemical Blowing Agents on Foaming of Wood Plastic Composites Prepared from Poly(Vinyl Chloride) and Rice Hull // Advanced Materials Research. 2011. V. 32. № 5. P. 2844–2850. doi: 10.1016/j.matdes.2010.12.044

11 Luo D., Pei X., Fu H. et al. Modification of sodium bicarbonate and its effect on foaming behavior of polypropylene // e-Polymers. 2021. V. 21. № 1. P. 366–367. doi: 10.1515/epoly-2021-0032

12 Harnnarongchai W., Chaochanchaikul K. Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam // Applied Mechanics and Materials. 2015. V. 804. P. 25–29. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.804.25

13 Yao S.J., Zhou Z.F., Ye F. et al. Modifying Sodium Bicarbonate for Foaming Polymers // Advanced Materials Research. 2014. V. 940. P. 59–62. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.940.59

14 Пат. 5225107 United States. Nucleating agents (pore regulators) for the preparation of directly gassed thermoplastic foams / Kretzschmann G., Scholz D., Hilgert K.H.; заявл. 23.09.1992; опубл. 06.07.1993.

15 Zepnik S., Hendriks S., Kabasci S., Radusch H.J. Foam extrusion behavior, morphology, and physical foam properties of organic cellulose ester // Journal of Materials Research. 2013. V. 28. № 17. P. 2394–2400. doi: 10.1557/jmr.2013.141

16 Wypych G. Handbook of Polymer Processing Additives. Toronto: ChemTec Publishing, 2023. 120 p.

17 Li H.Z., Zhang J., Chen S.J. Effects of carbon blacks with various structures on vulcanization and reinforcement of filled ethylene-propylene-diene rubber // Express Polymer Letters. 2008. V. 2. № 10. P. 695–704. doi: 10.3144/expresspolymlett.2008.83

18 Марков А.В., Саки Т.А., Токарева Е.В. Влияние процесса разложения порофора азодикарбонамида на процесс вспенивания полимерных композиций // Пластические массы. 2020. № 9–10. С. 35–39. doi: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-35-39

19 Wypych G. Handbook of Foaming and Blowing Agents. Toronto: ChemTec Publishing, 2017. 250 p.

20 Цвайфель Х., Маер Р.Д., Шиллер М. Добавки к полимерам: справочник / пер. с 6-го англ. изд. СПб.: Профессия, 2010. 1144 с.

21 Krutko I., Danylo I., Kaulin V. Kinetics of azodicarbonamide decomposition in the presence of an initiator for obtaining solid foams // Issues of Chemistry and Chemical Technology. 2019. № 1. P. 26–34. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-26-34

22 Vahidifar A., Khorasani S.N., Park C.B., Naguib H.E. Fabrication and Characterization of Closed-Cell Rubber Foams Based on Natural Rubber/Carbon Black by One-Step Foam Processing // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. V. 55. № 8. P. 2407–2416. doi: 10.1021/acs.iecr.5b04448

23 Шуваева А.В., Горденко Д.Р., Люсова Л.Р., Наумова Ю.А. Реометрические исследования процессов вулканизации и порообразования вспененных эластомерных материалов // Каучук и резина. 2017. Т. 76. № 3. С. 166–171.

24 Толстов А.М., Наумова Ю.А., Трусов А.С. Исследование синергических эффектов, реализуемых системами порофор – активатор в закрытопористых материалах на основе СКЭПТ // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. Т. 61. № 3. С. 78–83. doi: 10.25699/SSSB.2025.61.3.008

25 Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. М.: Истек, 2009. 502 с.

26 Аверко-Антонович Ю.О., Омельченко Р.Я., Охотина Н.А., Эбич Ю.Р. Технология резиновых изделий. Л.: Химия, 1991. 352 с.

27 Дик Дж.С. Технология резины: рецептуростроение и испытания. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.

28 Choi D., Kader M.A., Cho B.H. et al. Vulcanization kinetics of nitrile rubber/layered clay nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2005. V. 98. № 4. P. 1688–1696. doi: 10.1002/app.22341

29 Ghosh P., Katare S., Patkar P. et al. Sulfur vulcanization of natural rubber for benzothiazole accelerated formulations: From reaction mechanisms to a rational kinetic model // Rubber Chemistry and Technology. 2003. V. 76. № 3. P. 592–693. doi: 10.5254/1.3547762

30 Charoeythornkhajhornchai P., Samthong C., Boonkerd K., Somwangthanaroj A. Effect of azodicarbonamide on microstructure, cure kinetics and physical properties of natural rubber foam // Journal of Cellular Plastics. 2017. V. 53. № 3. P. 287–303. doi: 10.1177/0021955X16652101

31 Wang X., Feng N., Chang S. Effect of precured degrees on morphology, thermal, and mechanical properties of BR/SBR/NR foam // Polymer Composites. 2013. V. 34. № 6. P. 849–859. doi: 10.1002/pc.22489

32 Киченко А.А. Перестройка структуры губчатой костной ткани: математическое моделирование // Российский журнал биомеханики. 2019. Т. 23. № 3. С. 336–358. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2019.3.02

33 Киченко А.А., Тверье В.М., Няшин Ю.И., Заборских А.А. Экспериментальное определение тензора структуры трабекулярной костной ткани // Российский журнал биомеханики. 2011. Т. 15. № 4. С. 78–93.

34 Киченко А.А., Тверье В.М., Сотин А.В. Математическое моделирование структуры губчатой костной ткани с использованием тензора структуры // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 9. С. 41–44. doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_9_41

35 Bayat H., Fasihi M., Zare Y., Rhee K. An experimental study on one-step and two-step foaming of natural rubber/silica nanocomposites // Nanotechnology Reviews. 2020. V. 9. № 1. P. 427–435. doi: 10.1515/ntrev-2020-0032

36 ГОСТ 8.586.5–2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: Стандартинформ, 2007. 143 с.

37 Lopez-Gonzalez E., Saiz-Arroyo C., Rodriguez-Perez M.A. Low-density open-cell flexible polyolefin foams as efficient materials for oil absorption: influence of tortuosity on oil absorption // International Journal of Environmental Science and Technology. 2020. V. 17. P. 1663–1674. doi: 10.1007/s13762-019-02576-0

38 Lim T.T., Huang X. Evaluation of kapok (Ceiba pentandra (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic-oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup // Chemosphere. 2007. V. 66. № 5. P. 955–963. doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.05.062

39 Choi H.M., Moreau J.P. Oil sorption behavior of various sorbents studied by sorption capacity measurement and environmental scanning electron microscopy // Microscopy Research and Technique. 1993. V. 25. № 5–6. P. 447–455. doi: 10.1002/jemt.1070250516

References

1 Lisichkin G.V., Kulakova I.I. Elimination of Oil Spills: State and Problems (Review). Russian Journal of Applied Chemistry. 2022. vol. 95. no. 9. pp. 1082–1110. doi: 10.31857/S0044461822090018 (in Russian).

2 Skirdin K.V., Kazmina O.V. Analysis of Oil Sorbents: Types, Properties and Application Efficiency. Petroleum Chemistry. 2022. vol. 62. no. 6. pp. 797–815. doi: 10.31857/S002824212206003X (in Russian).

3 Tolstov A.M., Naumova Yu.A. On the Prospects of Using Polymer Materials for Sorbents Designed for Water Purification from Oil Products. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 240–248. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-240-248 (in Russian).

4 Bakirova I.N., Zenitova L.A. Gas-Filled Polymers: A Textbook. Kazan: KSTU, 2009. 105 p. (in Russian).

5 Klochkov V.I., Ryzhkov V.L. Production of Porous Products from Elastomers. Leningrad: Khimiya, 1984. 96 p. (in Russian).

6 Zhansakova K.S. Porous Heat-Insulating Rubbers Based on Butadiene-Methylstyrene Rubber. Candidate Dissertation (Cand. Sci. Tech.). 2022. 128 p. (in Russian).

7 Rostami-Tapeh-esmaeil E., Rodrigue D., Vahidifar A., Esmizadeh E. Chemistry, processing, properties, and applications of rubber foams. Polymers. 2021. vol. 13. no. 10. article 1565. doi: 10.3390/polym13101565.

8 Tolstov A.M., Naumova Yu.A., Popovskikh E.G., Khudyakova I.P. The Role of Technological Factors in the Formation of the Structure of Open-Cell Foamed Materials Based on Ethylene-Propylene-Diene Copolymers by Compression Molding. Polymer Science, Series D. 2025. vol. 18. no. 1. pp. 164–168. doi: 10.1134/S1995421224702058 (in Russian).

9 Avdin V.V., Kirillov V.V., Lymar A.A. Thermolysis of Ammonium Carbonate and Bicarbonate as Solid Coolants of Fuel Combustion Products. Bulletin of SUSU. 2011. vol. 229. no. 12. pp. 36–40. (in Russian).

10 Petchwattana N., Covavisaruch S. Influences of Modified Chemical Blowing Agents on Foaming of Wood Plastic Composites Prepared from Poly(Vinyl Chloride) and Rice Hull. Advanced Materials Research. 2011. vol. 32. no. 5. pp. 2844–2850. doi: 10.1016/j.matdes.2010.12.044.

11 Luo D., Pei X., Fu H. et al. Modification of sodium bicarbonate and its effect on foaming behavior of polypropylene. e-Polymers. 2021. vol. 21. no. 1. pp. 366–367. doi: 10.1515/epoly-2021-0032.

12 Harnnarongchai W., Chaochanchaikul K. Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam. Applied Mechanics and Materials. 2015. vol. 804. pp. 25–29. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.804.25.

13 Yao S.J., Zhou Z.F., Ye F. et al. Modifying Sodium Bicarbonate for Foaming Polymers. Advanced Materials Research. 2014. vol. 940. pp. 59–62. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.940.59.

14 Patent no. 5225107 United States. Nucleating agents (pore regulators) for the preparation of directly gassed thermoplastic foams. Kretzschmann G., Scholz D., Hilgert K.H.; filed 23.09.1992; publ. 06.07.1993.

15 Zepnik S., Hendriks S., Kabasci S., Radusch H.J. Foam extrusion behavior, morphology, and physical foam properties of organic cellulose ester. Journal of Materials Research. 2013. vol. 28. no. 17. pp. 2394–2400. doi: 10.1557/jmr.2013.141.

16 Wypych G. Handbook of Polymer Processing Additives. Toronto: ChemTec Publishing, 2023. 120 p.

17 Li H.Z., Zhang J., Chen S.J. Effects of carbon blacks with various structures on vulcanization and reinforcement of filled ethylene-propylene-diene rubber. Express Polymer Letters. 2008. vol. 2. no. 10. pp. 695–704. doi: 10.3144/expresspolymlett.2008.83.

18 Markov A.V., Saki T.A., Tokareva E.V. Influence of the Decomposition Process of Azodicarbonamide Blowing Agent on the Foaming of Polymer Compositions. Plastics. 2020. no. 9–10. pp. 35–39. doi: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-35-39 (in Russian).

19 Wypych G. Handbook of Foaming and Blowing Agents. Toronto: ChemTec Publishing, 2017. 250 p.

20 Zweifel H., Maier R.D., Schiller M. Plastics Additives Handbook. Translated from English. 6th ed. St. Petersburg: Professiya, 2010. 1144 p. (in Russian).

21 Krutko I., Danylo I., Kaulin V. Kinetics of azodicarbonamide decomposition in the presence of an initiator for obtaining solid foams. Issues of Chemistry and Chemical Technology. 2019. no. 1. pp. 26–34. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-26-34.

22 Vahidifar A., Khorasani S.N., Park C.B., Naguib H.E. Fabrication and Characterization of Closed-Cell Rubber Foams Based on Natural Rubber/Carbon Black by One-Step Foam Processing. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. vol. 55. no. 8. pp. 2407–2416. doi: 10.1021/acs.iecr.5b04448.

23 Shuvaeva A.V., Goldenko D.R., Lyusova L.R., Naumova Yu.A. Rheometric Studies of Vulcanization and Pore Formation Processes of Foamed Elastomeric Materials. Rubber and Resin. 2017. vol. 76. no. 3. pp. 166–171. (in Russian).

24 Tolstov A.M., Naumova Yu.A., Trusov A.S. Study of Synergistic Effects Implemented by Blowing Agent – Activator Systems in Closed-Cell Materials Based on EPDM. South Siberian Scientific Bulletin. 2025. vol. 61. no. 3. pp. 78–83. doi: 10.25699/SSSB.2025.61.3.008 (in Russian).

25 Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdyaev O.N. Technology of Elastomeric Materials. Moscow: Istek, 2009. 502 p. (in Russian).

26 Averko-Antonovich Yu.O., Omelchenko R.Ya., Okhotina N.A., Ebich Yu.R. Technology of Rubber Products. Leningrad: Khimiya, 1991. 352 p. (in Russian).

27 Dick J.S. Rubber Technology: Formulation and Testing. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010. 620 p. (in Russian).

28 Choi D., Kader M.A., Cho B.H. et al. Vulcanization kinetics of nitrile rubber/layered clay nanocomposites. Journal of Applied Polymer Science. 2005. vol. 98. no. 4. pp. 1688–1696. doi: 10.1002/app.22341.

29 Ghosh P., Katare S., Patkar P. et al. Sulfur vulcanization of natural rubber for benzothiazole accelerated formulations: From reaction mechanisms to a rational kinetic model. Rubber Chemistry and Technology. 2003. vol. 76. no. 3. pp. 592–693. doi: 10.5254/1.3547762.

30 Charoeythornkhajhornchai P., Samthong C., Boonkerd K., Somwangthanaroj A. Effect of azodicarbonamide on microstructure, cure kinetics and physical properties of natural rubber foam. Journal of Cellular Plastics. 2017. vol. 53. no. 3. pp. 287–303. doi: 10.1177/0021955X16652101.

31 Wang X., Feng N., Chang S. Effect of precured degrees on morphology, thermal, and mechanical properties of BR/SBR/NR foam. Polymer Composites. 2013. vol. 34. no. 6. pp. 849–859. doi: 10.1002/pc.22489.

32 Kichenko A.A. Restructuring of Spongy Bone Tissue: Mathematical Modeling. Russian Journal of Biomechanics. 2019. vol. 23. no. 3. pp. 336–358. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2019.3.02 (in Russian).

33 Kichenko A.A., Tverie V.M., Nyashin Yu.I., Zaborovskikh A.A. Experimental Determination of the Structure Tensor of Trabecular Bone Tissue. Russian Journal of Biomechanics. 2011. vol. 15. no. 4. pp. 78–93. (in Russian).

34 Kichenko A.A., Tverie V.M., Sotin A.V. Mathematical Modeling of the Structure of Spongy Bone Tissue Using the Structure Tensor. Mathematical Methods in Technologies and Engineering. 2023. no. 9. pp. 41–44. doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_9_41 (in Russian).

35 Bayat H., Fasihi M., Zare Y., Rhee K. An experimental study on one-step and two-step foaming of natural rubber/silica nanocomposites. Nanotechnology Reviews. 2020. vol. 9. no. 1. pp. 427–435. doi: 10.1515/ntrev-2020-0032.

36 GOST 8.586.5–2005. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Measurement of Flow Rate and Quantity of Liquids and Gases by Means of Standard Orifice Devices. Moscow: Standartinform, 2007. 143 p. (in Russian).

37 Lopez-Gonzalez E., Saiz-Arroyo C., Rodriguez-Perez M.A. Low-density open-cell flexible polyolefin foams as efficient materials for oil absorption: influence of tortuosity on oil absorption. International Journal of Environmental Science and Technology. 2020. vol. 17. pp. 1663–1674. doi: 10.1007/s13762-019-02576-0.

38 Lim T.T., Huang X. Evaluation of kapok (Ceiba pentandra (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic-oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup. Chemosphere. 2007. vol. 66. no. 5. pp. 955–963. doi: 10.1016/j.chemosphere.2006.05.062.

39 Choi H.M., Moreau J.P. Oil sorption behavior of various sorbents studied by sorption capacity measurement and environmental scanning electron microscopy. Microscopy Research and Technique. 1993. vol. 25. no. 5–6. pp. 447–455. doi: 10.1002/jemt.1070250516.

Сведения об авторах

Алексей М. Толстов аспирант, кафедра химии и технологии переработки эластомеров им. Кошелева Ф.Ф., Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, пр-т Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Россия, tolstovalex2029@gmail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2266-9613

Юлия А. Наумова д.т.н., профессор, кафедра химии и технологии переработки эластомеров им. Кошелева Ф.Ф., Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, пр-т Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Россия, naumova_yulia@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9968-8244

Елена Г. Поповских ведущий инженер-технолог, отдел разработок и исследований, Общество с Ограниченной Ответственностью Гавари Групп, ул. Ленина, д. 87, пгт Обухово, 142440, Россия, epopovskikh@bk.ru
https://orcid.org/0009-0009-9115-5131

Артём С. Трусов магистр, кафедра химии и технологии переработки эластомеров им. Кошелева Ф.Ф., Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, пр-т Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Россия, trusoff.artyom2015@ya.ru
https://orcid.org/0009-0005-1758-3366

Вклад авторов

Алексей М. Толстов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат
Юлия А. Наумова консультация в ходе исследования
Елена Г. Поповских обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Артём С. Трусов обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Aleksey M. Tolstov graduate student, F.F. Koshelev department of chemistry and technology of elastomer processing, Elastomer Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA — Russian Technological University, Vernadsky Av., 78, Moscow, 119454, Russia, tolstovalex2029@gmail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2266-9613

Yulia A. Naumova Dr. Sci. (Chem.), professor, F.F. Koshelev department of chemistry and technology of elastomer processing, Elastomer Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA — Russian Technological University, Vernadsky Av., 78, Moscow, 119454, Russia, naumova_yulia@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9968-8244

Elena G. Popovskikh leading process engineer, research and development department, Limited Liability Company Gavary Group, Lenina St., Building 87, uts Obukhovo, 142440, Russia, epopovskikh@bk.ru
https://orcid.org/0009-0009-9115-5131

Artem S. Trusov graduate student, F.F. Koshelev department of chemistry and technology of elastomer processing, Elastomer Processing, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA — Russian Technological University, Vernadsky Av., 78, Moscow, 119454, Russia, trusoff.artyom2015@ya.ru
https://orcid.org/0009-0005-1758-3366

Contribution

Aleksey M. Tolstov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism
Yulia A. Naumova consultation during the study
Elena G. Popovskikh review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Artem S. Trusov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 27/01/2025	**После редакции** 10/02/2025	**Принята в печать** 02/03/2026

Received 27/01/2025	**Accepted in revised** 10/02/2025	**Accepted** 02/03/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-267-272 Оригинальная статья/Research article
УДК 678.762.9 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Получение древесно-полимерного композита с применением этенилнафталина

Надежда С. Никулина [1] nad.nikulina2013@ya.ru 0000-0003-2586-7738
Сергей С. Никулин [2] nikulin.nikuli@ya.ru 0000-0002-8141-8008
Лариса А. Власова [2] vllar65@ya.ru 0000-0003-1515-8321
Вячеслав М. Мисин [3] misinnn@gmail.com 0000-0003-4204-8531

1 Воронежский институт федеральной службы исполнения наказаний, ул. Иркутская 1А, г. Воронеж, 394072, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, 394036, Россия
3 Институт биохимической физики РАН им. Н.М. Эмануэля, ул. Косыгина, 4, Москва, 119991, Россия

Аннотация. Настоящее исследование посвящено модификации древесины с использованием этенилнафталина (ЭН) с целью улучшения её эксплуатационных характеристик, таких как водостойкость, влагостойкость и устойчивость к биодеструкции. Основная цель работы — разработка эффективного метода пропитки древесины мягколиственных пород (на примере березы) для создания древесно-полимерного композита с повышенными защитными свойствами. Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения ассортимента экологически безопасных и экономически выгодных пропитывающих составов для древесины. Результаты исследования показали значительное улучшение эксплуатационных свойств модифицированной древесины. Установлено, что увеличение содержания ПЭН в древесине (от 9,3% до 24,6%) приводит к снижению водопоглощения и разбухания, что подтверждает повышение водо- и влагостойкости материала. Контрольные эксперименты подтвердили высокую реакционную способность ЭН и его эффективность в качестве модификатора. Разработанный метод модификации древесины с использованием ЭН может быть применен в строительной, мебельной и деревообрабатывающей промышленности, особенно для малоценных пород древесины. Результаты исследования представляют интерес для решения задач экологии и рационального использования ресурсов, так как ЭН является доступным и экономически выгодным материалом, а его применение позволяет сократить использование дорогостоящих и дефицитных составов. Исследование подтвердило перспективность использования этенилнафталина для модификации древесины. Полученные древесно-полимерные композиты обладают улучшенными физико-механическими и защитными свойствами, что делает их пригодными для широкого промышленного применения. Метод отличается высокой эффективностью, экологичностью и может быть масштабирован для производства

Ключевые слова: древесина, пропитывающий состав, этенилнафталин, модификация, защитные свойства .

Wood Modification Using Ethenylnaphthalene

Nadezhda S. Nikulina [1] nad.nikulina2013@ya.ru 0000-0003-2586-7738
Sergey S. Nikulin [2] nikulin.nikuli@ya.ru 0000-0002-8141-8008
Larisa A. Vlasova [2] vllar65@ya.ru 0000-0003-1515-8321
Vyacheslav M. Misin [3] misinnn@gmail.com 0000-0003-4204-8531

1 Voronezhskiy institut federal'noy sluzhby ispolneniya nakazaniy, ul. Irkutskaya 1A, g. Voronezh, 394072, Rossiya
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
3 Institut biokhimicheskoy fiziki RAN im. N.M. Emanuelya, ul. Kosygina, 4, Moskva, 119991, Rossiya

Abstract. The present study is devoted to the modification of wood using ethenylnaphthalene (EN) in order to improve its performance characteristics, such as water resistance, moisture resistance and resistance to biodegradation. The main objective of the work is to develop an effective method for impregnating softwood (using birch as an example) to create a wood-polymer composite with enhanced protective properties. The relevance of the study is due to the need to expand the range of environmentally friendly and cost-effective impregnating compounds for wood, especially low-value species. The results of the study showed a significant improvement in the performance properties of the modified wood. It was found that an increase in the content of PEN in wood (from 9.3% to 24.6%) leads to a decrease in water absorption and swelling, which confirms an increase in the water and moisture resistance of the material. In addition, the modified samples demonstrated antiseptic properties, which helps to increase the service life of products. Control experiments confirmed the high reactivity of EN and its effectiveness as a modifier. The developed method of wood modification using EN can be applied in the construction, furniture and woodworking industries, especially for low-value wood species. The results of the study are of interest for solving problems of ecology and rational use of resources, since EN is an accessible and cost-effective material, and its use allows to reduce the use of expensive and scarce compounds. The study confirmed the prospects of using ethenylnaphthalene for wood modification. The obtained wood-polymer composites have improved physical, mechanical and protective properties, which makes them suitable for wide industrial use. The method is highly efficient, environmentally friendly and can be scaled up for production. Further research can be aimed at optimizing the impregnation process and studying the long-term stability of modified materials.

Keywords: wood, impregnating composition, ethenylnaphthalene, modification, protective properties.

Для цитирования
Никулина Н.С., Никулин С.С., Власова Л.А., Мисин В.М. Получение древесно-полимерного композита с применением этенилнафталина // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 267–272. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-267-272

For citation
Nikulina N.S., Nikulin S.S., Vlasova L.A., Misin V.M. Wood Modification Using Ethenylnaphthalene. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 267–272. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-267-272

© 2026, Никулина Н.С. и др. / Nikulina N.S. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Древесина исторически является основным строительным материалом. На Руси из древесины делали предметы утвари и мебель, игрушки и музыкальные инструменты, строились дома и т. д. В настоящее время древесина и изделия на ее основе находят широкое применение, как в строительстве, так и в качестве интересных дизайнерских решениях. Это связано с уникальными природными свойствами самого материала, а также его экологичностью и эстетичностью [1–3].

В свою очередь для продления срока службы изделиям из древесины, а также для защиты от воздействия воды и влаги, увеличения прочности, твердости и т. д. применяют различные технологические приемы [4–7]. С древних времен в строительстве для защиты от грызунов, гниения и горения использовалась химическая обработка древесины. Для этих целей использовались смеси с добавками медного и железного купороса, соли, смолы и масла.

В условиях современной тенденции для химической обработки используются различные пропитывающие составы. В зависимости от используемого в составе антисептика активного вещества различают органические и неорганические составы [8–12]. Неорганические составы ограничено проходят в структуру древесины, образуя при этом поверхностный защитный слой, который в силу малой глубины проникновения не может обеспечивать высокую эффективность и будет быстро вымываться, что будет вести к снижению защиты, а, следовательно, и срока службы. В свою очередь органические составы легко проникают в структурные элементы древесины, повышаются адгезивные свойства поверхности, повышается сопротивляемость к неблагоприятным факторам воздействия и увеличивается срок службы.

В России насчитывается сравнительно небольшой ассортимент защитных пропитывающих составов, по сравнения с зарубежным рынком. При разработке новых составов часто за базу используют ранее выпускающиеся химические вещества.

В ряде опубликованных работ [13 – 18], посвященных защитной обработке древесины, предложено использовать составы на основе мономеров винилароматического ряда (стирол, дивинилбензол и др.), акрилового (акриловая кислота, метилметакрилат и др.), мочевина и др. соединения с полимеризацией их в проводящих сосудах натуральной древесины.

Перспективными в этом плане могут служить олигомерные материалы, приготовленные из отходов и побочных продуктов химической и нефтехимической промышленности [19–22]. Использование отходов и побочных продуктов для получения олигомерных материалов позволяет решить вопрос не только экологического характера, но и более полно и рационально использовать ценное углеводородное сырье. При этом важно отметить тот факт, что в данном направлении могут применяться олигомерные продукты, которые по своим показателям ограниченно используются в других направлениях. Например, высокая цветность (нельзя использовать в производстве светлых красок), наличие опалесценции (мутный раствор, покрытие теряет прозрачность) и другие недостатки. Однако наличие этих недостатков не является критичным для использования этих растворов для модификации древесины, а также для защитной обработки сушильных камер лесопромышленного комплекса. Из древесины в процессе её сушки выделяются летучие компоненты, обладающие повышенной коррозионной способностью [9, 10].

В качестве примера модификации древесины можно рассмотреть радиационную низкотемпературную полимеризацию мономеров, таких как стирол, акрилонитрил, акриламид и др. в структурах древесины, сопровождающуюся прививкой получаемых полимеров к компонентам древесины. Модифицированные таким образом древесные композиты обладают улучшенным комплексом свойств.

Еще один способ модификации древесины – обработка ее при повышенной температуре винильными мономерами в сочетании с радикальным инициатором. Способ позволяет одновременно проводить отгонку растворителя, содержащегося в модифицированной древесине. Проведение полимеризационных процессов в клеточных структурах натуральной древесины также не получило своего широкого применения. Это объясняется тем, что радикальные процессы, протекающие в структурах древесины, тормозятся фенольными соединениями, присутствующими в древесине. Данные продукты ингибируют радикальные процессы и снижают выход по полимерам. Неполная конверсия мономеров снижает показатели древесно-полимерного композита. Древесно-полимерный композит будет фонить, например, стиролом, что будет требовать проведения дегазации целевого продукта.

До настоящего времени не проводились комплексные исследования по применению нафталиновых производных для модификации древесины, в том числе и этенильных производных нафталина (ЭН).

Интерес, к процессу, основан на доступности вышеупомянутых соединений [11].

Производные нафталина кипят при температуре свыше 200 о С, это способствует их длительному сохранению в структурах древесины. Необходимо отметить, что высокомолекулярным соединениям на основе ЭН присущи повышенные физико-механические показатели, что создает условия, позволяющие улучшить характеристики мягкой древесины.

Существенный недостаток древесины – невысокая способность сопротивляться действию неблагоприятных факторов: при сушке, хранении и транспортировке древесных материалов не исключена возможность поражения их деревоокрашивающими и плесневыми грибами, что способствует ухудшению товарного вида. Возможно предотвратить разрушение древесины и конструкций из нее применяя антисептики, к которым и относится ЭН. То есть, используя его, возможно комплексно подойти к защитной обработке древесины: повысить водо- и влагостойкость древесины, защитить её от биологического разрушения и продлить срок службы изготовленных изделий.

Так же следует обратить внимание на хорошую совместимость ЭН с компонентами древесины, благодаря наличию в них ароматических фрагментов.

Задача исследования – оценка возможности использования 1-этенилнафталина для модификации древесины.

Важным преимуществом ЭН является его высокая совместимость с древесной структурой, что объясняется химическим сходством с лигнином – природным полимером древесины, содержащим ароматические фрагменты.

Скорость полимеризации этенилнафталина примерно в 2000 раз выше, чем у стирола. Благодаря этому при термообработке пропитанной древесины (160–165 0С) происходит радикальная полимеризация ЭН в её анатомических полостях с образованием полиэтенилнафталина (1):

$$nCH_2 = CH \rightarrow (- CH_2\text{-}CH -) \,||\, C_{10}H_7\ C_{10}H_7 \quad (1)$$

Результаты исследований по модификации натуральной древесины винилнафталином показали, что степень полимеризации данного мономера в древесной структуре достигает 60%. Ограничение выхода полимера связано с присутствием в древесине фенольных соединений, ингибирующих процесс высокотемпературной полимеризации [12]. Дополнительным фактором, снижающим эффективность процесса, является низкая теплопроводность древесины, что приводит к неравномерному протеканию полимеризации – преимущественно в поверхностных слоях и в значительно меньшей степени во внутренних.

Для повышения степени конверсии мономера рекомендуется введение радикальных инициаторов в полимеризуемую систему. Образующийся полиэтенилнафталин (ПЭН) демонстрирует повышенную устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов.

Модифицированная таким образом древесина будет приобретать ряд ценных показателей: повышенную механическую прочностью; повышенную водо- и влагостойкость; увеличенный срок эксплуатации изделий.

Материалы и методы

В работе была изучена березы влажностью около 12% мас. и плотностью 640 кг/м^3. Использовались образцы размером 20 × 20 × 30 мм. Количество образцов для каждого испытания составляло 8 шт. Окончательные данные представляли собой среднее арифметическое значение полученных результатов.

Этилникотинат (ЭН) – высоковязкое масло, которое сложно ввести в древесную структуру, так как большая его часть остается на поверхности. Для улучшения пропитки на основе ЭН были приготовлены углеводородные растворы с толуолом в качестве растворителя. Для инициирования полимеризации в раствор добавляли 2,0% мас. радикального инициатора – гидропероксида пинана (ГП), который широко применяется в производстве синтетических каучуков, получаемых эмульсионной полимеризацией [13, 14].

Образцы древесины березы выдерживали в растворах в течение 10 часов при температуре 60–70 °С. В данных условиях протекали два процесса: проникновение толуольного раствора ЭН в анатомические структуры древесины и начало полимеризационного процесса ЭН в присутствии радикального инициатора. В дальнейшем повышали температуру до 90–100 °С. Это способсьвлвад ло отгонке толуола, в том числе и в виде водно-толуольного азеотропа, из древесины. При этом протекала дальнейшая полимеризация ЭН и заполнение проводящих сосудов натуральной древесины смесью ЭН с полимером на его основе. После максимального снижения количества толуола в древесине ее образцы подвергали температурному воздействию (160–165 0С) в течение 5 часов. При этом отмечалось повышение молекулярной массы пропитывающего состава по радикальному механизму с образованием ПЭН.

Ниже представлен протекающий полимеризационный процесс ЭН в присутствии ГП:

– распад ГП:

$$R\text{-}COOH \rightarrow R\text{-}CO^{\bullet} + HO^{\bullet},$$

где R – радикал пинана;

– полимеризация ЭН:

$$R\text{-}CO^{\bullet} + CH_2 = CH \rightarrow$$

$$\rightarrow (R\text{-}CO - CH_2\text{-}CH -)n \,||\, C_{10}H_7\ C_{10}H_7 \quad (2)$$

В результате полимеризация этилениорборнена (ЭН) в анатомических структурах древесины может быть описана как процесс, происходящий в микрореакторах, роль которых выполняют естественные сосуды древесины. На начальной стадии реакция протекает по радикальному механизму в толуольном растворе в присутствии гидропероксида (ГП), а завершающая стадия происходит в массе после удаления толуола. Степень конверсии ЭН в полиэтиленорборнен (ПЭН) составила 95%.

Для оценки влияния содержания в композите ЭН были применены модельные растворы ЭН в толуоле с концентрацией его 10–50% мас.

Присутствие ПЭН, с незначительным количеством ЭН, в изготовленных образцах древесины, в зависимости от концентрации вводимого раствора варьировалось от 9,3 до ~ 24,6%. Присутствие в пропитывающей системе небольшого количества ЭН, обладающего высокой температурой кипения (270.9 °С при 760 мм. рт. ст.), не приводит к выделению его в воздушную среду производственных помещений из изделий из древесины в процессе их эксплуатации даже при повышенных температурах. Кроме того ЭН может дополимеризовываться в структурах древесины со временем.

Результаты

Экспериментальные результаты по определению водопоглощения и разбухания натуральной и модифицированной древесины березы после 1 и 30 суток нахождения в воде представлены на рисунках 1–3.

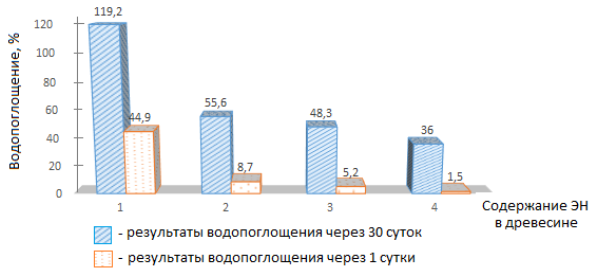


Рисунок 1. Влияние содержания ЭН в древесине березы на водопоглощение

Figure 1. The influence of the ED content in birch wood on water absorption



Рисунок 2. Влияние содержания ЭН в древесине березы на разбухание в радиальном направлении

Figure 2. The influence of the ED content in birch wood on swelling in the radial direction



Рисунок 3. Влияние содержания ЭН в древесине березы на разбухание в тангенциальном направлении

Figure 3. The influence of the ED content in birch wood on swelling in the tangential direction

По результатам проведенных экспериментов (рисунки 1–3) можно утверждать, что возрастание содержания модификатора в березовой древесине способствует снижению её водопоглощения и степени разбухания. Что дает возможность говорить о перспективности применения ЭН в качестве эффективного средства для защиты древесины низкосортных лиственных пород.

Подтверждением высокой эффективности ЭН явилось изучение его полимеризационной способности при 190–195 °С в течение 5 часов. Выход ПЭН достигал практически 95,0%.

Модифицированные таким способом древесные образцы показали повышенную влагоустойчивость. Содержание ЭН в древесине: 1 – 0%; 2 – 9,3%; 3 – 15,8%; 4 – 24,6%.

Заключение

Модифицированные ЭН образцы натуральной древесины обладают повышенными эксплуатационными качествами, делая её более устойчивой к влаге и биоповреждениям. Содержание ПЭН в древесине определяет ее устойчивость к неблагоприятным факторам. Использование ЭН открывает новые возможности для создания древесно-полимерных композитов с улучшенными свойствами, что способствует рациональному использованию древесных ресурсов и снижению зависимости от дорогостоящих пропитывающих составов.

Литература

1 Багаев Е.С., Макаров С.С., Багаев С.С., Чудетский А.И. Береза карельская в Центральной России: биологические особенности и перспективы воспроизводства. Пушкино: ВНИИЛМ, 2022. 125 с.

2 Ветошкин Ю.И., Яцун И.В., Коцюба И.В. Эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе древесины. Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 100 с.

3 Sajeena T.A.M., Pallath N. Industrial waste // Handbook of Biomass. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 231–246. doi: 10.1007/978-981-99-6727-8_9

4 Дональдсон Н. Химия и технология соединений нафталинового ряда. М.: ГНТИ, 1963. 656 с.

5 Колесников Г.С. Синтез винильных производных ароматических и гетероциклических соединений. М.: АН СССР, 1960. 303 с.

6 Менсон Дж. Полимерные смеси и композиты. М.: Химия, 1979. 440 с.

7 Ugwu S.C., Obele C.M. A mini-review on expanded polystyrene waste recycling and its applications // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2023. V. 8. № 1. P. 315–329. doi: 10.30574/wjaets.2023.8.1.0057

8 Никулина Н.С., Вострикова Г.Ю., Дмитренков А.И., Никулин С.С. Применение олигомеров из побочных продуктов производства полибутадиена, модифицированного вторичным пенополистиролом для защитной обработки древесных материалов // Химия, физика и механика материалов. 2018. № 1 (16). С. 23–32.

9 Никулина Н.С., Дмитренков А.И., Никулин С.С., Власова Л.А., Санникова Н.Ю. Перспектива применения для модификации древесных материалов винилнафталина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 73–79.

10 Бовтрель А.Ю., Божелко И.К., Нехведович П.С., Генюш И.В. Исследование современных биовлагозащитных препаратов для обработки древесины и деревянных конструкций // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024. № 2 (282). С. 187–193.

11 Гончарова Ю.К., Гончаров С.В., Харитонов Е.М. и др. Антиоксиданты растительного происхождения и их нетрадиционные источники (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2024. Т. 59. № 1. С. 39–53. doi: 10.15389/agrobiology.2024.1.39rus

12 Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Академия, 2004. 266 с.

13 Suhaimi N.A.S., Muhamad F., Abd Razak N.A., Zeimaran E. Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications // Polymer Engineering & Science. 2022. V. 62. № 8. P. 2355–2375. doi: 10.1002/pen.26017

14 Хозин В.Г. Полимеры в строительстве – реальные границы и перспективы эффективного применения // Полимеры в строительстве. 2024. № 1 (1). С. 9–26.

15 Belchinskaya L.I. Elaboration of a composition based on spent engine oil and wood flour for birch wood impregnation and railway sleepers production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 392. P. 012075. doi: 10.1088/1755-1315/392/1/012075

16 Mubarok M., Gérardin-Charbonnier C., Azadeh E. et al. Modification of wood by Tannin-Furfuryl Alcohol resins-effect on dimensional stability, mechanical properties and decay durability // Journal of Renewable Materials. 2023. V. 11. P. 505–521. doi: 10.32604/jrm.2022.024872

17 Jančíková V., Jablonský M. Thermal Modification of Wood—A Review // Sustainable Chemistry. 2025. V. 6. P. 19. doi: 10.3390/suschem6030019

18 Khan M.A. Studies of physico-mechanical properties of wood and wood plastic composite (WPC) // Journal of Applied Polymer Science. 1992. V. 45. № 1. P. 167–172. doi: 10.1002/app.1992.070450118

19 Khan A., Mishra A., Thakur V.K., Pappu A. Towards sustainable wood–plastic composites: polymer types, properties, processing and future prospects // RSC Sustainability. 2025. V. 3. № 7. P. 2833–2862. doi: 10.1039/D5SU00153F

20 Wang Y., Ge-Zhang S., Mu P. et al. Advances in sol-gel-based superhydrophobic coatings for wood: a review // International Journal of Molecular Sciences. 2023. V. 24. № 11. P. 9675. doi: 10.3390/ijms24119675

21 Wang J., Zhang D., Chu F. Wood-derived functional polymeric materials // Advanced Materials. 2021. V. 33. № 28. P. 2001135. doi: 10.1002/adma.202001135

22 Woźniak M. Antifungal agents in wood protection—A review // Molecules. 2022. V. 27. № 19. P. 6392. doi: 10.3390/molecules27196392

23 Blanchet P., Pepin S. Trends in chemical wood surface improvements and modifications: A review of the last five years // Coatings. 2021. V. 11. № 12. P. 1514. doi: 10.3390/coatings11121514

24 Liu H., Zhou T., Sun X., Zong G. Organosilane-modified Wood Materials: A Review of Research and Applications // BioResources. 2023. V. 18. № 3. P. 6561–6582.

References

1 Bagaev E.S., Makarov S.S., Bagaev S.S., Chudetsky A.I. Karelian Birch in Central Russia: Biological Features and Prospects for Reproduction. Pushkino: VNIILM, 2022. 125 p. (in Russian).

2 Vetoshkin Yu.I., Yatsun I.V., Kotsyuba I.V. Operational Properties of Composite Materials Based on Wood. Yekaterinburg: USFTU, 2018. 100 p. (in Russian).

3 Sajeena T.A.M., Pallath N. Industrial waste. In: Handbook of Biomass. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. pp. 231–246. doi: 10.1007/978-981-99-6727-8_9.

4 Donaldson N. Chemistry and Technology of Naphthalene Series Compounds. Moscow: GNTI, 1963. 656 p. (in Russian).

5 Kolesnikov G.S. Synthesis of Vinyl Derivatives of Aromatic and Heterocyclic Compounds. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1960. 303 p. (in Russian).

6 Manson J. Polymer Blends and Composites. Moscow: Khimiya, 1979. 440 p. (in Russian).

7 Ugwu S.C., Obele C.M. A mini-review on expanded polystyrene waste recycling and its applications. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2023. vol. 8. no. 1. pp. 315–329. doi: 10.30574/wjaets.2023.8.1.0057.

8 Nikulina N.S., Vostrikova G.Yu., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S. Application of Oligomers from By-Products of Polybutadiene Production Modified with Secondary Polystyrene Foam for Protective Treatment of Wood Materials. Chemistry, Physics and Mechanics of Materials. 2018. no. 1 (16). pp. 23–32. (in Russian).

9 Nikulina N.S., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S., Vlasova L.A., Sannikova N.Yu. Prospect of Using Vinylnaphthalene for Modification of Wood Materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. no. 2. pp. 73–79. (in Russian).

10 Bovtrel A.Yu., Bozhelko I.K., Nekhvedovich P.S., Genyush I.V. Study of Modern Bio-Moisture Protection Preparations for Wood and Wooden Structures Treatment. Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources. 2024. no. 2 (282). pp. 187–193. (in Russian).

11 Goncharova Yu.K., Goncharov S.V., Kharitonov E.M. et al. Plant-Derived Antioxidants and Their Unconventional Sources (Review). Agricultural Biology. 2024. vol. 59. no. 1. pp. 39–53. doi: 10.15389/agrobiology.2024.1.39rus (in Russian).

12 Ugolev B.N. Wood Science and Forest Commodity Science. Moscow: Akademiya, 2004. 266 p. (in Russian).

13 Suhaimi N.A.S., Muhamad F., Abd Razak N.A., Zeimaran E. Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications. Polymer Engineering & Science. 2022. vol. 62. no. 8. pp. 2355–2375. doi: 10.1002/pen.26017.

14 Khozin V.G. Polymers in Construction – Real Boundaries and Prospects for Effective Application. Polymers in Construction. 2024. no. 1 (1). pp. 9–26. (in Russian).

15 Belchinskaya L.I. Elaboration of a composition based on spent engine oil and wood flour for birch wood impregnation and railway sleepers production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. vol. 392. article 012075. doi: 10.1088/1755-1315/392/1/012075.

16 Mubarok M., Gérardin-Charbonnier C., Azadeh E. et al. Modification of wood by Tannin-Furfuryl Alcohol resins-effect on dimensional stability, mechanical properties and decay durability. Journal of Renewable Materials. 2023. vol. 11. pp. 505–521. doi: 10.32604/jrm.2022.024872.

17 Jančíková V., Jablonský M. Thermal Modification of Wood—A Review. Sustainable Chemistry. 2025. vol. 6. Article 19. doi: 10.3390/suschem6030019.

18 Khan M.A. Studies of physico-mechanical properties of wood and wood plastic composite (WPC). Journal of Applied Polymer Science. 1992. vol. 45. no. 1. pp. 167–172. doi: 10.1002/app.1992.070450118.

19 Khan A., Mishra A., Thakur V.K., Pappu A. Towards sustainable wood–plastic composites: polymer types, properties, processing and future prospects. RSC Sustainability. 2025. vol. 3. no. 7. pp. 2833–2862. doi: 10.1039/D5SU00153F.

20 Wang Y., Ge-Zhang S., Mu P. et al. Advances in sol-gel-based superhydrophobic coatings for wood: a review. International Journal of Molecular Sciences. 2023. vol. 24. no. 11. article 9675. doi: 10.3390/ijms24119675.

21 Wang J., Zhang D., Chu F. Wood-derived functional polymeric materials. Advanced Materials. 2021. vol. 33. no. 28. article 2001135. doi: 10.1002/adma.202001135.

22 Woźniak M. Antifungal agents in wood protection—A review. Molecules. 2022. vol. 27. no. 19. article 6392. doi: 10.3390/molecules27196392.

23 Blanchet P., Pepin S. Trends in chemical wood surface improvements and modifications: A review of the last five years. Coatings. 2021. vol. 11. no. 12. article 1514. doi: 10.3390/coatings11121514.

24 Liu H., Zhou T., Sun X., Zong G. Organosilane-modified Wood Materials: A Review of Research and Applications. BioResources. 2023. vol. 18. no. 3. pp. 6561–6582.

Сведения об авторах

Надежда С. Никулина к.т.н., доцент, кафедра технических комплексов и связи, Воронежский институт федеральной службы исполнения наказаний, Иркутская, 1А, г. Воронеж, 394072, Россия, nad.nikulina2013@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2586-7738

Сергей С. Никулин д.т.н., профессор, кафедра технологии органического синтеза и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nikulin.nikuli@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-8141-8008

Лариса А. Власова к.т.н., доцент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий,, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vllar65@ya.ru
https://orcid.org/*0000-0003-1515-8321*

Вячеслав М. Мисин д.т.н, профессор, ведущий научный сотрудник, отдел электроники органических материалов и наноструктур, Институт биохимической физики РАН им. Н.М. Эмануэля, Место для ввода текста., ул. Косыгина 4, г. Москва, 119991, Россия, misinnn@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4204-8531

Information about authors

Nadezhda S. Nikulina , Cand. Sci. (Engin.), technical complexes and communications department , Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service, nad.nikulina2013@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2586-7738

Sergey S. Nikulin DR. Sci. (Engin.), professor, technologies of organic compounds and polymer processingdepartment, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, nikulin.nikuli@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-8141-8008

Larisa A. Vlasova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, vllar65@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-1515-8321

Vyacheslav M. Misin Dr. Sci. (Engin.), professor leading researcher, department of electronics of organic materials and nanostructures Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences named after N.M. Emanuel, Место для ввода текста., Kosygina 4, Moscow, 119991, Russia, misinnn@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4204-8531

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 10/01/2026	**После редакции** 19/01/2026	**Принята в печать** 22/02/2026
Received 10/01/2026	**Accepted in revised** 19/01/2026	**Accepted** 22/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-273-280 Оригинальная статья/Research article
УДК 621.929.2 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Проектирование узлов опирания привода на крышку аппарата с механическим перемешивающим устройством

Дмитрий С. Долгин [1] dim_dol.94@mail.ru 0000-0001-5179-3854
Юрий А. Веткин [1] vetkinya@ystu.ru
Илья С. Гуданов [1] goudanov@ya.ru
Антон Е. Лебедев [1] lae4444@mail.ru 0000-0002-0856-3209
Александр А. Ватагин [1] vatagerr@bk.ru
Александра И. Холодкова [2] holodkovaa@list.ru 0009-0001-7373-5265

1 Ярославский государственный технический университет, пр-т Московский, 88, г. Ярославль, 150023, Россия
2 Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны имени Маршала Советского Союза Л.А. Говорова, пр-т Московский, 28, г. Ярославль, 150001, Россия

Аннотация. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами широко применяются в химической и смежной с ней отраслях промышленности. При работе таких аппаратов на штуцер под перемешивающее устройство действуют сжимающая сила и крутящий момент, со стороны привода. Результатом их действия является деформации штуцера установки привода, что приводит к возникновению вибраций и снижению прочности конструкции. Таким образом важной задачей является снижение вибрации на корпус аппарата, добиться этого можно с помощью укрепление штуцера. В работе представлены результаты проектирования узла опирания на крышку аппарата, укрепленного ребрами жесткости и укрепляющим кольцом. С помощью системы Autodesk Inventor Professional была создана расчетная схема и получены различные соотношения параметров, отвечающих требованию жесткости конструкции. Для определения количества ребер жесткости была исследована зависимость нагрузки, создаваемой приводом в зависимости от угла приложения действующей на опору. С целью выбора ширины укрепляющего кольца был построен график зависимости радиуса укрепляющего кольца от количества ребер. Длина ребра жесткости определена с помощью анализа графика зависимости напряжения в штуцере. На основе анализа полученных данных был разработан метод укрепления фланца с помощью кольца и добавления ребер жесткости, отвечающего требованиям прочности и минимально допустимого угла отклонения.

Ключевые слова: аппарат с механическим перемешивающим устройством, вибрация, штуцер, кольцо укрепляющее, ребра жесткости.

Designing the drive support units on the cover of the machine with a mechanical mixing device

Dmitry S. Dolgin [1] dim_dol.94@mail.ru 0000-0001-5179-3854
Yuri A. Vetkin [1] vetkinya@ystu.ru
Ilya S. Gudanov [1] goudanov@ya.ru
Anton E. Lebedev [1] lae4444@mail.ru 0000-0002-0856-3209
Alexander A. Vatagin [1] vatagerr@bk.ru
Alexandra I. Holodkova [2] holodkovaa@list.ru 0009-0001-7373-5265

1 Yaroslavl State Technical University, 88 Moskovsky Avenue, Yaroslavl, 150023, Russia
2 Yaroslavl Higher Military School of Air Defense named after Marshal of the Soviet Union L.A. Govorov, 28 Moskovsky Avenue, Yaroslavl, 150001, Russia

Abstract. Devices with mechanical mixing devices are widely used in chemical and related industries. When such devices are operating, a compressive force and a torque from the drive side act on the fitting for the mixing device. The result of their action is the deformation of the drive fitting, which leads to vibrations and a decrease in structural strength. Thus, an important task is to reduce vibration on the body of the device, this can be achieved by strengthening the fitting. The paper presents the results of designing a support unit for the lid of the device, reinforced with stiffeners and a reinforcing ring. Using the Autodesk Inventor Professional system, a calculation scheme was created and various parameter ratios were obtained that meet the requirements of structural rigidity. To determine the number of stiffeners, the dependence of the load generated by the drive on the angle of application acting on the support was investigated. In order to select the width of the reinforcing ring, a graph was constructed of the dependence of the radius of the reinforcing ring on the number of edges. The length of the stiffener is determined by analyzing the graph of the voltage dependence in the fitting. Based on the analysis of the data obtained, a method was developed for strengthening the flange using a ring and adding stiffeners that meet the requirements of strength and the minimum allowable deflection angle.

Keywords: apparatus with a mechanical mixing device, vibration, fitting, reinforcing ring, stiffeners.

Для цитирования
Долгин Д.С., Веткин Ю.А., Гуданов И.С., Лебедев А.Е., Ватагин А.Е., Холодкова А.И. Проектирование узлов опирания привода на крышку аппарата с механическим перемешивающим устройством // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 273–280. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-273-280

For citation
Dolgin D.S., Vetkin Yu.A., Gudanov I.S., Lebedev A.E., Vatagin A.E., Kholodkova A.I. Designing the drive support units on the cover of the machine with a mechanical mixing device. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 273–280. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-273-280

© 2026, Долгин Д.С. и др. / Dolgin D.S. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Аппараты с механическими перемешивающими устройствами широко применяются в химической и смежных с ней отраслях промышленности для получения однородных растворов, эмульсий, суспензий, а также для ускорения тепловых, диффузионных и химических процессов [1–4]. Несмотря на большое разнообразие мешалок принцип работы у них одинаков: внутри емкости постоянно вращается перемешивающее устройство (лопастное, якорное, ленточное или другие), приводящееся в движение приводом (электродвигателем, редуктором) [5–7]. Во время работы аппарат с мешалкой испытывает нагрузку на корпус со стороны привода, что приводит к возникновению вибраций и снижению прочности конструкции в целом [8–10].

Цель работы – проектирование узлов опирания привода на крышку аппарата с механическим перемешивающим устройством с целью снижения вибрации на корпус.

Материалы и методы

Классическая конструкция аппарата с механическим перемешивающим устройством приведен на рисунке 1. Аппарат состоит из корпуса 1, верхней крышки 2, в которую врезан штуцер под перемешивающее устройство 3, именно к этому элементу и будет приложены нагрузки от привода. На штуцер монтируется перемешивающее устройство, состоящее из электродвигателя 4 и редуктора 5, которые монтируются на стойку 6, вала 7, на который установлена мешалка 8. Для герметизации внутренней среды аппарата предусмотрено уплотнение 9.

Для увеличения жесткости конструкции можно использовать несколько способов:

1. Увеличение толщин днища (S_K, см. рисунок 1).
2. Увеличение толщины патрубка штуцера ($S_П$, см. рисунок 1).
3. Использование накладного кольца (рисунок 1, п. 10).
4. Использование укрепляющих ребер (рисунок 1, п. 11).

Первый способ не рационален и ведет к заметному увеличению металлоемкости, так нагрузки от привода имеют местный характер, и быстро затухают по мере удаления от центра днища [11]. Второй способ полностью не решает проблему, так как при достаточной толщине штуцера деформациям подвергается место соединения днища со штуцером [11].

В статьях можно встретить различные варианты укрепления фланцевого соединения и его исследования на прочность [12–15]. Существуют так же варианты укрепления соединения только ребрами жесткости [16,17]. Наиболее предпочтительным является использование комбинации накладного кольца и укрепляющих ребер [11]. Толщина укрепляющего кольца, как правило принимается равной толщине днища. При этом предстоит выяснить как влияют наружный диаметр кольца, длина и количество укрепляющих ребер на укрепляющую способность данного узла.

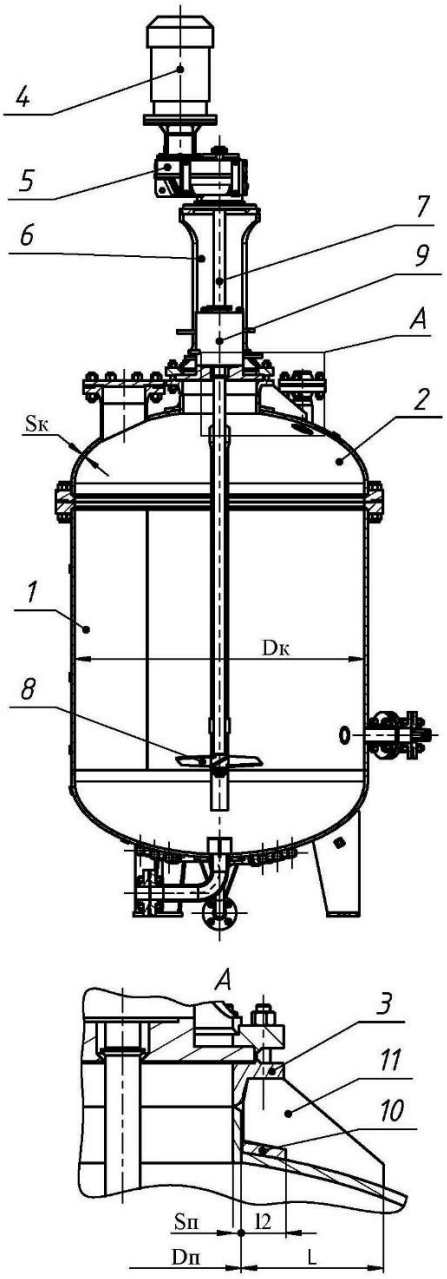


Рисунок 1. Конструкция аппарата с механическим перемешивающим устройством: 1 – корпус, 2 – крышка, 3 – штуцер под перемешивающее устройство, 4 – электродвигатель, 5 – редуктор, 6 – стойка, 7 – вал, 8 – мешалка, 9 – уплотнение, 10 – кольцо укрепляющее, 11 – ребро

Figure 1. The design of the device with a mechanical mixing device: 1 – body, 2 – lid, 3 – fitting for the mixing device, 4 – electric motor, 5 – gearbox, 6 – rack, 7 – shaft, 8 – agitator, 9 – seal, 10 – reinforcing ring, 11 – rib

Исходными данными для моделирования приняты:

1. Диаметр корпуса: $D_K = 1600$ мм (см. рисунок 1).

2. Толщина стенки крышки: $S_K = 8$ мм (см. рисунок 1).

3. Диаметр штуцера под механическое перемешивающее устройство: $D_П = 250$ мм (рисунок 1).

4. Толщина патрубка штуцера под механическое перемешивающее устройство: $S_П = 8$ мм (см. рисунок 1).

5. Крутящий и изгибающий моменты, передаваемые от привода: $M = 1100$ Н$\cdot$мм.

6. Осевая сила, равная весу привода: $M = 3000$ Н.

Переменными параметрами были приняты.

1. Ширина кольца жесткости (l_2, см. рисунок 1) изменялась в пределах от 25 до 75 мм с шагом 25 мм. Максимальную ширину кольца целесообразно ограничить зоной укрепления днища по ГОСТ 34233.3–2017. В данном случае она равна 113 мм.

2. Количество ребер принято $n = 2,3,4,6,9,12$.

3. Длина ребер (L) принята от 200 до 250 мм с шагом 25 мм.

Результаты

При проектировании узлов опирания опытно-экспериментальные исследования не всегда являются целесообразными в связи с увеличением времени и ресурсозатратностью. Поэтому актуальным и менее энергозатратным методом является вычислительный эксперимент и использование виртуального проектирования [18–20]. Моделирование и расчет производились с использованием метода конечных элементов в программе Autodesk Inventor Professional.

При моделировании учитываем, что максимальный угол поворота фланца, на который прикреплен привод, не должен быть больше $0,05°$.

Условие опирания днища по наружному контуру в виде жесткой заделки, моменты и сила от привода приложены к уплотнительной поверхности фланца штуцера (рисунок 2).

Для контроля угловая деформация фланца α была пересчитана в линейную деформацию Δ края фланца (рисунок 2) по формуле:

$$\Delta = \frac{D_Ф}{2} \cdot tg\alpha ,$$

где $D_Ф$ – наружный диаметр фланца.

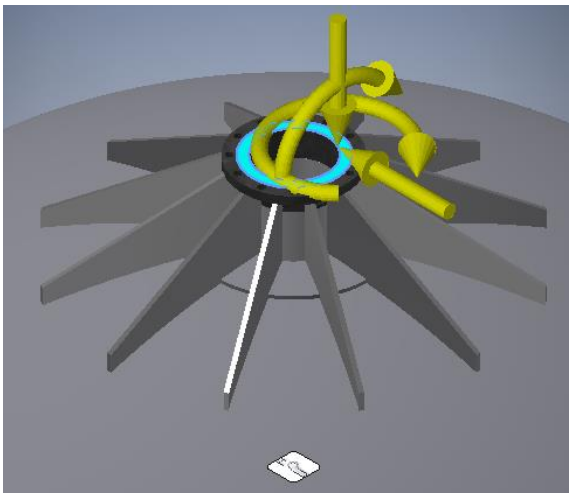


Рисунок 2. Расчётная схема

Figure 2. Design scheme

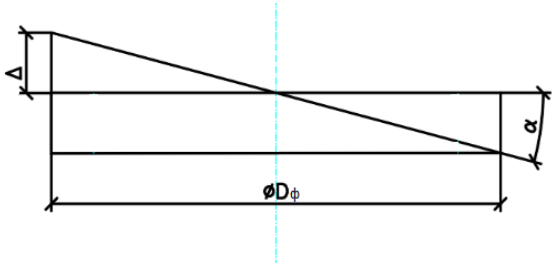


Рисунок 3. Схема пересчета угловой в линейную деформацию

Figure 3. Scheme for converting angular to linear deformation

Для диаметра фланца 150 мм при угле $0,05°$ линейная деформация составляет 0,13 мм. Эту величину контролирум при дальнейших расчетах.

В результате расчёта методом конечных элементов в таблицу 1 внесены возможные соотношения параметров, отвечающих необходимому требованию жесткости конструкции.

Определение количества ребер

Нагрузка на фланец, является циркулирующей по окружности. Произведено исследование максимальных напряжений, возникающих в узле опирания при разном количестве ребер от угла действия нагрузки. Расчет проведен с шагом в 5°. Результаты представлены на рисунке 4.

Из рисунка хорошо видно, что с увеличением числа ребер амплитуда колебаний нагрузки уменьшается. Для того что бы данные колебания можно было не учитывать, как малоцикловые, в соответствии с ГОСТ 34233.6–2017, величина этих колебаний должна составлять не более 15 % от нагрузки. Данному условию удовлетворяют кривые 4,5,6. Тем самым количество ребер должно быть не менее 6 штук.

Таблица 1

Результаты расчетов

Table 1

Calculation results

Рёбра, шт. Edges, pcs	Длина ребра, мм Rib length, mm	Ширина укрепления кольца, мм Ring reinforcement width, mm
2	250	75
3	200	75
	250	50
4	200	50
	230	75
	250	25
6	200	50
	250	0
9	200	50
	250	0
12	200	0

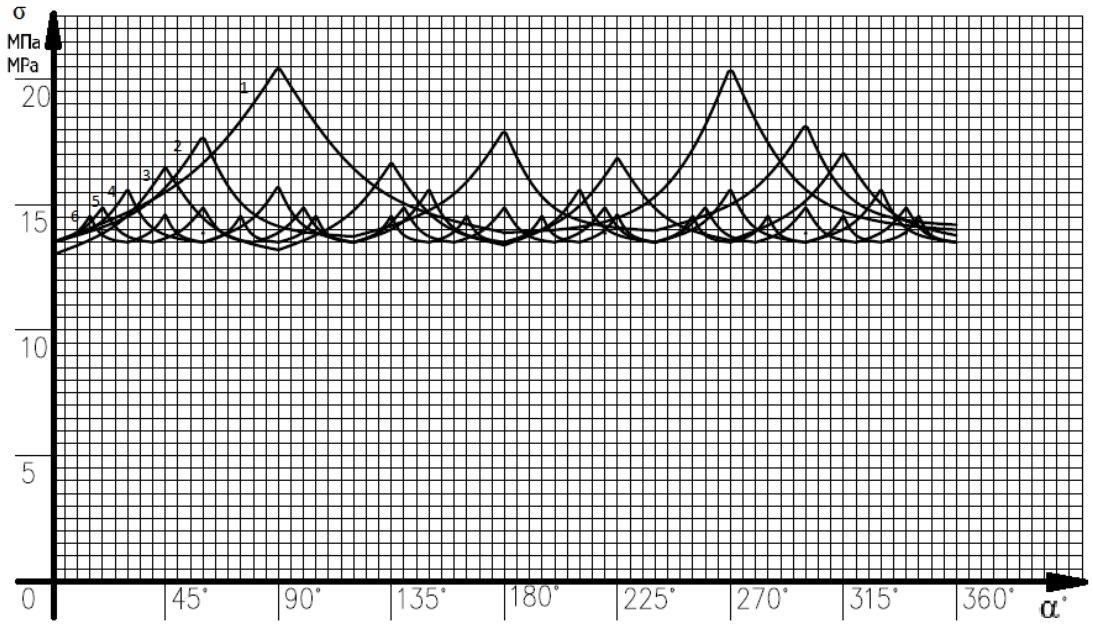


Рисунок 4. Зависимость напряжений в штуцере от угла приложения нагрузок: 1 – с 2 рёбрами жесткости, 2 – с 3 рёбрами жесткости, 3 – с 4 рёбрами жесткости, 4 – с 6 рёбрами жесткости, 5 – с 9 рёбрами жесткости, 6 – с 12 рёбрами жесткости

Figure 4. The dependence of stresses in the fitting on the angle of application of loads: 1 – with 2 stiffeners, 2 – with 3 stiffeners, 3 – with 4 stiffeners, 4 – with 6 stiffeners, 5 – with 9 stiffeners, 6 – with 12 stiffeners

Определение ширины укрепляющего кольца

Для определения наиболее оптимальной ширины укрепляющего кольца, исследуем связь между шириной кольца и количеством ребер, при выполнении условия жесткости фланца по угловой деформации (рисунок 5). Максимальное отклонение от оси аппарата составляет не более $0,05°$. Длина ребра принята постоянной. Зависимость близка к линейной. Характер кривой показывает, что при уменьшении количества ребер требуется меньшая ширина укрепляющего кольца. Так же, при $n=12$ для выполнения заданных условий, оно и вовсе не нужно. При этом не отпадает необходимость расчета укрепления отверстия по ГОСТ 34233.3–2017 от внутреннего давления с учетом действия нагрузок. Если в соответствии с ГОСТ 34233.3–2017 кольцо необходимо, то оно должно быть установлено в обязательном порядке.

Таким образом, анализируя данные, приведенные на графике (рисунок 5), можно сделать вывод о целесообразности применении укрепляющего кольца шириной не менее 45 мм.

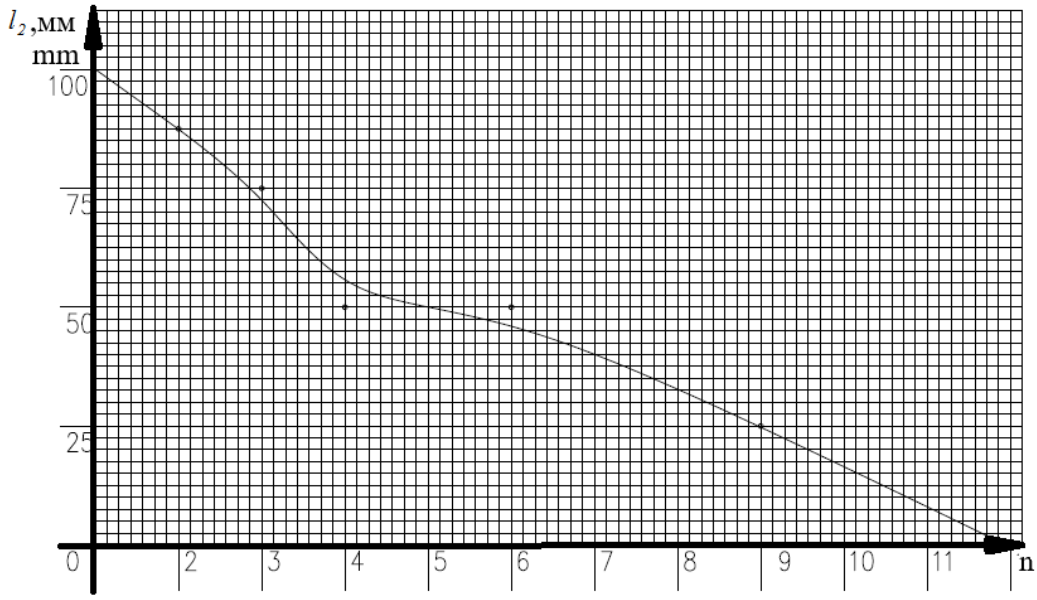


Рисунок 5. Зависимость радиуса укрепляющего кольца от количества ребер
Figure 5. The radius of the reinforcing ring depends on the number of ribs

Определение длины ребра жесткости

С целью определения длины ребра жесткости был построен график зависимости напряжения в штуцере от длины ребра (рисунок 6). Из проведенного результата видно, что наиболее сильно напряжение уменьшается при длине ребра до 275 мм, далее падение напряжений уже незначительно, а при значении L=250 мм, увеличение радиуса не является целесообразным, так как напряжение остается на том же уровне, не изменяя свою величину. При этом, увеличением длины ребер, без изменения других параметров не удалось добиться уменьшения деформации фланца до требуемых значений.

Дополнительно было проведено исследование по укреплению штуцера только укрепляющим кольцом. Результатом является вывод о том, что одним укрепляющим кольцом нельзя добиться требуемой величины деформации.

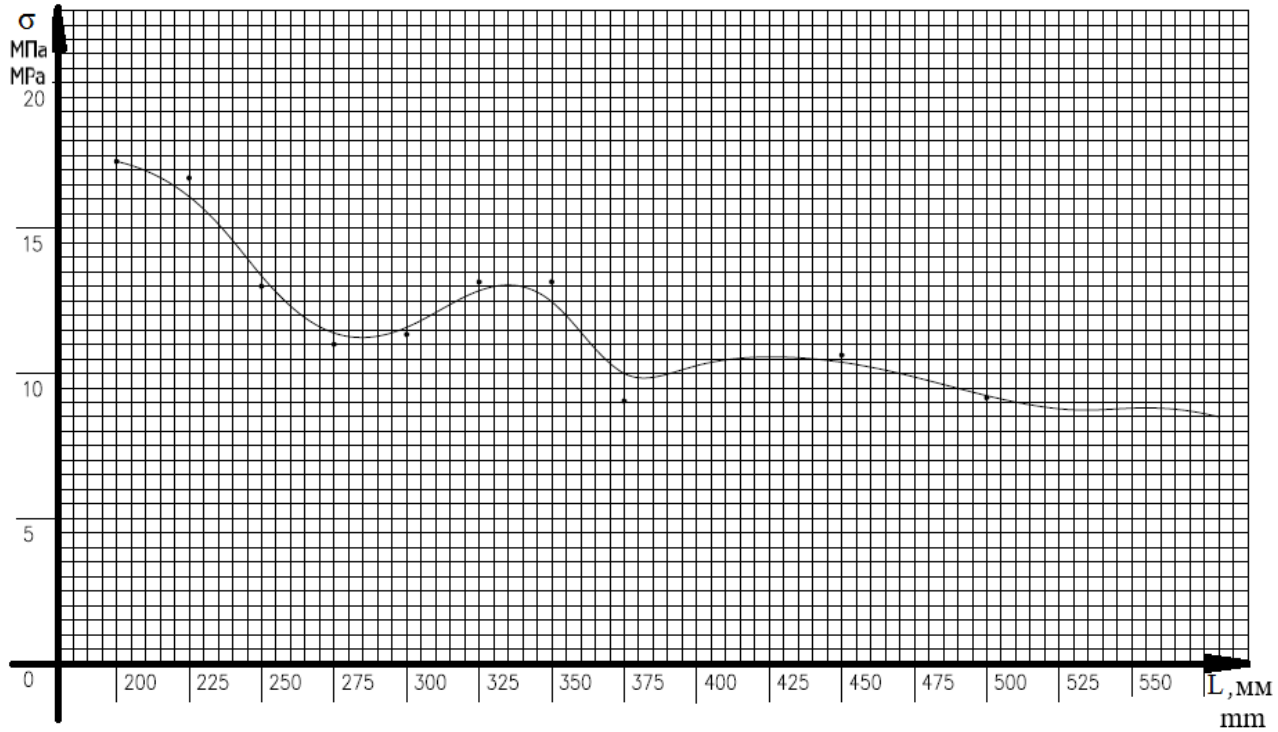


Рисунок 6. График зависимости напряжений в штуцере от длины ребра жесткости
Figure 6. Graph of the dependence of the stresses in the fitting on the length of the stiffener

Заключение

Из анализа результата видно, что наиболее эффективным является использование комбинации кольца и укрепляющих ребер. Рассматривая вопрос количества ребер, можно сделать вывод: чем больше ребер, тем меньше амплитуда колебаний нагрузки, передаваемой от привода аппарата. Но с другой стороны, при этом растет масса узла. Поэтому нашей задачей было проанализировать результаты исследований и подобрать наиболее оптимальное соотношение количества ребер, их длин и ширины укрепляющего кольца, не делая узел крепления излишне массивным.

На основе полученных данных нами выбрана следующая модель: количество ребер 6, длина ребра равна 250 мм и ширина укрепляющего кольца 50 мм. По данным параметрам была построена трехмерная модель (рисунок 7).

Предложен способ укрепления штуцера под перемешивающее устройство, позволяющий увеличить его жесткость и добиться относительно небольшого угла отклонения от оси в заданном допуске. Поэтому данный способ можно рассматривать, как наиболее оптимальный с точки зрения надежности, металлоемкости и простоты изготовления.

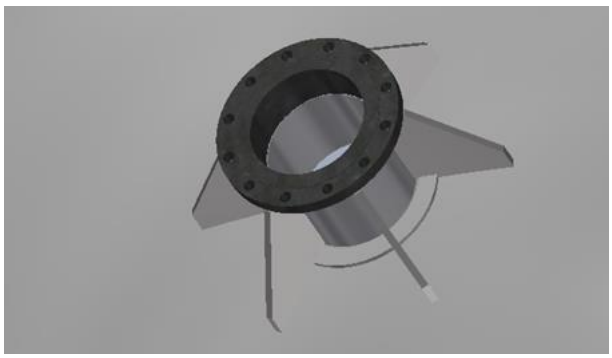


Рисунок 7. Выбранная модель укрепления фланца

Figure 7. Selected flange reinforcement model

Применение данного способа позволит улучшить конструкцию аппаратов с перемешивающим устройством, снизив вибрации на корпус и увеличив тем самым срок эксплуатации аппаратов с механическими перемешивающими устройствами.

Литература

1 Бондаренко Н.А., Гусева Е.В., Сафаров Р.Р. Применение вычислительной гидродинамики для моделирования биореакторов с мешалкой в Ansys Fluent // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 2 (96). С. 123–129. doi: 10.20914/2310-1202-2023-2-123-129

2 Лыткина Л.И., Шенцова Е.С., Коптев Д.В., Ситников Н.Ю. Биореактор с применением импеллерных мешалок для культивирования биомассы микроводорослей // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1 (79). С. 32–35. doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-32-35

3 Ferreira D.B., Tada E.F.R., João C.T. Simulation of static drying and drying with intermittent rotations in a horizontal drum of rice used in the cultivation of Metarhizium anisopliae // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2025. V. 209. doi: 10.1016/j.cep.2025.110169

4 Courtois F. Roller and drum drying for food powder production // Bhandari B., Bansal N., Zhang M., Schuck P. (eds.) Handbook of Food Powders. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2024. P. 57–70. doi: 10.1016/B978-0-323-98820-9.00062-4

5 Приходько А.А., Герасименко Е.О. Исследование эффективности теплообмена в перемешивающем устройстве с неравномерным движением мешалки // Теоретические основы химической технологии. 2023. Т. 57. № 2. С. 228–237. doi: 10.31857/S0040357123020094

6 Лушнов М.А. Математическая модель процесса смешивания полужидких кормов в устройстве с пропеллером // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25. № 4. С. 712–719. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.712-719

7 Михайлов А.Ю., Петровский Э.А. Интенсификация теплообмена перемешиванием // Современные проблемы теории машин. 2024. № 17. С. 17–20. doi: 10.26160/2307-342X-2024-17-17-20

8 Meneghetti G., Campagnolo A. State-of-the-art review of peak stress method for fatigue strength assessment of welded joints // International Journal of Fatigue. 2020. V. 139. P. 105705. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105705

9 Frendo F., Marulo G., Chiocca A., Bertini L. Fatigue life assessment of welded joints under sequences of bending and torsion loading blocks of different lengths // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2020. V. 43. P. 1290–1304. doi: 10.1111/ffe.13233

10 Karaagac C., Evren Toygar M. Fracture and fatigue analysis of an agitator shaft with a circumferential notch // Engineering Fracture Mechanics. 2006. V. 73. № 14. P. 2034–2052. doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.03.014

11 Петреев И.Б., Веткин Ю.А. Укрепление фланца, приваренного к крышке аппарата, с помощью ребер жесткости // 72-я Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов вузов с междунар. участием: сб. мат. конф. Ярославль: ЯГТУ, 2019. Ч. 2. С. 321–324.

12 Тишков Н.Л., Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Белов А.В. Оптимальное усилие предварительного напряжения болтов во фланцевом стыке // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 1 (31). С. 8–11.

13 Kasenov A. Precision of hole processing by reamer-broaching // Science and Technology of Kazakhstan. 2023. № 1. P. 28–36. doi: 10.48081/MSMF5347

14 Ерофеев В.И., Самохвалов И.А. Оценка живучести фланцевого соединения стальной башенной конструкции с учетом экспериментального определения аэродинамических коэффициентов // Проблемы прочности и пластичности. 2020. Т. 82. № 2. С. 215–224. doi: 10.32326/1814-9146-2020-82-2-215-224

15 Braun M., Ahola A., Milaković A.S., Ehlers S. Comparison of local fatigue assessment methods for high-quality butt-welded joints made of high-strength steel // Forces in Mechanics. 2022. V. 6. P. 100056. doi: 10.1016/j.finmec.2021.100056

16 Chen B., Chen W., Li H. et al. Shear capacity of Cold-Formed steel channels with Edge-Stiffened web holes, unstiffened web holes, and plain webs // Journal of Structural Engineering. 2022. V. 148. № 2. P. 04021268. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003250

17 Zhou T., Chen H., Zhang P. et al. Study on seismic performance experimental and theoretical analysis of the bottom flange bolted and top flange welded vertical stiffener joint // Structures. 2025. V. 73. doi: 10.1016/j.istruc.2025.108165

18 Шевцов А.А., Ткач В.В. Вычислительный эксперимент в создании системы виртуального проектирования барабанных сушилок с тепловым насосом // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3 (101). С. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23

19 Ma S., Li H. Experimental and numerical investigation of tensile behavior in prefabricated rigid flange connections: Influence of high-strength bolt hole diameter // Structures. 2025. V. 79. P. 109494. doi: 10.1016/j.istruc.2025.109494

20 Землянухин А.Д., Кашеварова Г.Г., Сон М.П. Экспериментальные и теоретические исследования податливых фланцевых соединений // Строительство и реконструкция. 2024. № 6 (116). С. 4–14. doi: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-4-14

References

1 Bondarenko N.A., Guseva E.V., Safarov R.R. Application of Computational Fluid Dynamics for Modeling Stirred Bioreactors in Ansys Fluent. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 2 (96). pp. 123–129. doi: 10.20914/2310-1202-2023-2-123-129 (in Russian).

2 Lytkina L.I., Shentsova E.S., Koptev D.V., Sitnikov N.Yu. Bioreactor with Impeller Stirrers for Cultivation of Microalgae Biomass. Bulletin of VSUET. 2019. vol. 81. no. 1 (79). pp. 32–35. doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-32-35 (in Russian).

3 Ferreira D.B., Tada E.F.R., João C.T. Simulation of static drying and drying with intermittent rotations in a horizontal drum of rice used in the cultivation of Metarhizium anisopliae. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2025. vol. 209. [Online first]. doi: 10.1016/j.cep.2025.110169.

4 Courtois F. Roller and drum drying for food powder production. In: Bhandari B., Bansal N., Zhang M., Schuck P. (eds.) Handbook of Food Powders. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2024. pp. 57–70. doi: 10.1016/B978-0-323-98820-9.00062-4.

5 Prikhodko A.A., Gerasimenko E.O. Study of Heat Transfer Efficiency in a Stirring Device with Uneven Motion of the Mixer. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2023. vol. 57. no. 2. pp. 228–237. doi: 10.31857/S0040357123020094 (in Russian).

6 Lushnov M.A. Mathematical Model of the Mixing Process of Semi-Liquid Feeds in a Device with a Propeller. Agricultural Science of the Euro-North-East. 2024. vol. 25. no. 4. pp. 712–719. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.4.712-719 (in Russian).

7 Mikhailov A.Yu., Petrovsky E.A. Intensification of Heat Transfer by Stirring. Modern Problems of Machine Theory. 2024. no. 17. pp. 17–20. doi: 10.26160/2307-342X-2024-17-17-20 (in Russian).

8 Meneghetti G., Campagnolo A. State-of-the-art review of peak stress method for fatigue strength assessment of welded joints. International Journal of Fatigue. 2020. vol. 139. article 105705. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105705.

9 Frendo F., Marulo G., Chiocca A., Bertini L. Fatigue life assessment of welded joints under sequences of bending and torsion loading blocks of different lengths. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2020. vol. 43. pp. 1290–1304. doi: 10.1111/ffe.13233.

10 Karaagac C., Evren Toygar M. Fracture and fatigue analysis of an agitator shaft with a circumferential notch. Engineering Fracture Mechanics. 2006. vol. 73. no. 14. pp. 2034–2052. doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.03.014.

11 Petreev I.B., Vetkin Yu.A. Strengthening of a Flange Welded to the Apparatus Cover Using Stiffening Ribs. In: 72nd All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Undergraduates and Postgraduates of Universities with International Participation: Collection of Conference Materials. Yaroslavl: YSTU, 2019. part 2. pp. 321–324. (in Russian).

12 Tishkov N.L., Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Belov A.V. Optimal Pre-Tension Force of Bolts in a Flange Joint. Caspian Engineering and Construction Bulletin. 2020. no. 1 (31). pp. 8–11. (in Russian).

13 Kasenov A. Precision of hole processing by reamer-broaching. Science and Technology of Kazakhstan. 2023. no. 1. pp. 28–36. doi: 10.48081/MSMF5347.

14 Erofeev V.I., Samokhvalov I.A. Assessment of the Survivability of a Flange Joint of a Steel Tower Structure Taking into Account Experimental Determination of Aerodynamic Coefficients. Problems of Strength and Plasticity. 2020. vol. 82. no. 2. pp. 215–224. doi: 10.32326/1814-9146-2020-82-2-215-224 (in Russian).

15 Braun M., Ahola A., Milaković A.S., Ehlers S. Comparison of local fatigue assessment methods for high-quality butt-welded joints made of high-strength steel. Forces in Mechanics. 2022. vol. 6. article 100056. doi: 10.1016/j.finmec.2021.100056.

16 Chen B., Chen W., Li H. et al. Shear capacity of Cold-Formed steel channels with Edge-Stiffened web holes, unstiffened web holes, and plain webs. Journal of Structural Engineering. 2022. vol. 148. no. 2. article 04021268. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003250.

17 Zhou T., Chen H., Zhang P. et al. Study on seismic performance experimental and theoretical analysis of the bottom flange bolted and top flange welded vertical stiffener joint. Structures. 2025. vol. 73. [Online first]. doi: 10.1016/j.istruc.2025.108165.

18 Shevtsov A.A., Tkach V.V. Computational Experiment in the Creation of a Virtual Design System for Drum Dryers with a Heat Pump. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 3 (101). pp. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23 (in Russian).

19 Ma S., Li H. Experimental and numerical investigation of tensile behavior in prefabricated rigid flange connections: Influence of high-strength bolt hole diameter. Structures. 2025. vol. 79. article 109494. doi: 10.1016/j.istruc.2025.109494.

20 Zemlyanukhin A.D., Kashevarova G.G., Son M.P. Experimental and Theoretical Studies of Flexible Flange Joints. Construction and Reconstruction. 2024. no. 6 (116). pp. 4–14. doi: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-4-14 (in Russian).

Сведения об авторах

Дмитрий С. Долгин старший преподаватель, кафедра «Технологические машины и оборудование», Ярославский государственный технический университет, ул. Слепнева, 24, г. Ярославль, 150048, Россия, dim_dol.94@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5179-3854

Юрий А. Веткин к.т.н., доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование», Ярославский государственный технический университет, ул. Златоустинская, 14к2, г. Ярославль, 150001, Россия, vetkinya@ystu.ru

Илья С. Гуданов к.т.н., зав. кафедрой, кафедра «Технологические машины и оборудование», Ярославский государственный технический университет, ул. Титова, 4, г. Ярославль, 150046, Россия, goudanov@ya.ru

Антон Е. Лебедев д.т.н, профессор, кафедра «Технологические машины и оборудование», Ярославский государственный технический университет, пр-т Московский, 131, г. Ярославль, 150023, Россия, lae4444@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0856-3209

Александр А. Ватагин к.т.н., доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование», Ярославский государственный технический университет, ул. Ньютона, 22, г. Ярославль, 150023, Россия, vatagerr@bk.ru

Александра И. Холодкова преподаватель, кафедра «Математика», Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны имени Маршала Советского Союза Л.А. Говорова, ул. Которосольная набережная, 56, holodkovaa@list.ru
https://orcid.org/0009-0001-7373-5265

Information about authors

Dmitry S. Dolgin Senior lecturer, technological machines and equipment department, Yaroslavl State Technical University, Slepneva St., 24, Yaroslavl, 150023, Russia, dim_dol.94@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5179-3854

Yuri A. Vetkin Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, technological machines and equipment department, Yaroslavl State Technical University, Zlatoustinskaya St., 14k2, Yaroslavl, 150001, Russia, vetkinya@ystu.ru

Ilya S. Gudanov Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, Department of "Technological Machines and Equipment", Yaroslavl State Technical University, Titova St., 4 Yaroslavl, 150046, Russia, goudanov@ya.ru

Anton E. Lebedev Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of "Technological Machines and Equipment", Yaroslavl State Technical University, Moskovsky Av., 131 Yaroslavl, 150023, Russia, lae4444@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0856-3209

Alexander A. Vatagin Степень, должность, Department of "Technological Machines and Equipment", Yaroslavl State Technical University, Newton St., 22 Yaroslavl, 150023, Russia, vatagerr@bk.ru

Alexandra I. Holodkova teacher, Math department, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense named after Marshal of the Soviet Union L.A. Govorov, 56 Kotorosolnaya Embankment, Yaroslavl, 150014, Russia, holodkovaa@list.ru
https://orcid.org/0009-0001-7373-5265

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/12/2025	**После редакции** 18/12/2025	**Принята в печать** 20/01/2026

Received 01/12/2025	**Accepted in revised** 18/12/2025	**Accepted** 20/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-281-290 Оригинальная статья/Research article
УДК 544.6.076.32 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка лабораторного кондуктометра на основе аддитивных технологий и исследование характеристик ионоселективных электродов из различных электропроводящих компонентов

Антонина А. Филимонова [1] aachichirova@mail.ru 0000-0001-6238-188X
Алена Ю. Власова [1] vlasovaay@mail.ru 0000-0001-8520-5432
Егор С. Майоров [1] mes.tegatu@gmail.com 0009-0006-3925-1458
Рузина Ф. Камалиева [1] rruzzi@ya.ru 0009-0001-0427-9358
Андрей А. Филимонов [1] vip.jokermigel@mail.ru 0009-0000-8251-5267
Наталия Д. Чичирова [1] ndchichirova@mail.ru 0000-0001-8635-9177

1 Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия

Аннотация. Работа посвящена актуальной проблеме контроля ионного состава водных сред, имеющей значение для энергетики, экологии и биомедицины. В статье рассмотрены современные тенденции развития ионоселективных электродов (ИСЭ) как перспективных инструментов для оперативного анализа. Особое внимание уделено разработке новых ионофоров, экологичных пластификаторов, технологиям миниатюризации и способам увеличения срока службы сенсоров. В экспериментальной части исследования разработан и апробирован лабораторный кондуктометр на основе оригинальной ячейки, изготовленной методом 3D-печати. Проведена сравнительная оценка электродов из различных материалов: меди, графита и композитных полимерных материалов с добавлением графитового порошка. Методика основана на калибровке системы по эталонному раствору с известной проводимостью, что позволяет рассчитывать удельную электропроводность исследуемых растворов. Результаты показали, что медные электроды обеспечивают высокую точность измерений, в то время как графитовые демонстрируют завышенные показания в области низких концентраций из-за особенностей своей поверхности. Работа подтверждает эффективность предложенного подхода и формирует основу для дальнейших исследований в области разработки оптимизированных электродных материалов для ионоселективных электродов.

Ключевые слова: ионоселективный электрод, кондуктометрия, ионный состав, атомная электростанция, аддитивные технологии, экспресс-анализ, ионофора.

Development of a laboratory conductometer based on additive technologies and study of the characteristics of ion-selective electrodes made of various electrically conductive components

Antonina A. Filimonova [1] aachichirova@mail.ru 0000-0001-6238-188X
Alena Yu. Vlasova [1] vlasovaay@mail.ru 0000-0001-8520-5432
Egor S. Mayorov [1] mes.tegatu@gmail.com 0009-0006-3925-1458
Ruzina F. Kamalieva [1] rruzzi@ya.ru 0009-0001-0427-9358
Andrey A. Filimonov [1] vip.jokermigel@mail.ru 0009-0000-8251-5267
Natalia D. Chichirova [1] ndchichirova@mail.ru 0000-0001-8635-9177

1 Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya Str., 51 Kazan, 420066, Russia

Abstract. This study addresses the pressing issue of monitoring the ionic composition of aqueous media, which is of significant importance for the energy sector. Particular attention is paid to the development of new ionophores, environmentally friendly plasticizers, miniaturization technologies, and methods for increasing the service life of sensors. In the experimental portion of the study, a laboratory conductivity meter based on a unique cell manufactured using 3D printing was developed and tested. A comparative evaluation of electrodes made of various materials was conducted: copper, graphite and composite polymers with added graphite powder. The results showed that copper electrodes provide high measurement accuracy, while graphite electrodes exhibit overestimated readings at low concentrations due to their surface properties. This study confirms the effectiveness of the proposed approach and forms the basis for further research into the development of optimized electrode materials for ion-selective elecrodes.

Keywords: ion-selective electrode, conductometry, ion composition, nuclear power plant, additive technologies, express analysis, ionophore.

Для цитирования
Филимонова А.А., Власова А.Ю., Майоров Е.С., Камалиева Р.Ф., Филимонов А.А., Чичирова Н.Д. Разработка лабораторного кондуктометра на основе аддитивных технологий и исследование характеристик ионоселективных электродов из различных электропроводящих компонентов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 281–290. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-281-290

For citation
Filimonova A.A., Vlasova A. Yu., Mayorov E.S., Kamalieva R.F., Filimonov A.A., Chichirova N.D. Development of a laboratory conductometer based on additive technologies and study of the characteristics of ion-selective electrodes made of various electrically conductive components. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 281–290. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-281-290

© 2026, Филимонова А.А., и др. / Filimonova A.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Контроль ионного состава водных сред является критически важной задачей для таких областей, как энергетика, экологический мониторинг и биомедицина. Особое значение оперативный анализ содержания ключевых ионов приобретает на объектах тепловой и атомной энергетики, где он напрямую влияет на безопасность, экономическую эффективность и надежность технологических процессов. Высокотехнологичные лабораторные методы, обладая высокой точностью, не способны обеспечить непрерывный мониторинг в реальном времени, что стимулирует развитие альтернативных, более быстрых и компактных сенсорных систем.

В этом контексте совершенствование методов кондуктометрии – как инструмента интегральной оценки солесодержания – представляет собой актуальное направление. Точность и надежность кондуктометрических измерений в значительной степени определяются свойствами измерительной ячейки и материалом электродов. Современные аддитивные технологии, в частности 3D-печать, открывают новые возможности для быстрого прототипирования и оптимизации геометрии измерительных ячеек. Параллельно, поиск новых, стабильных и эффективных электродных материалов, в том числе на основе композитных полимеров, остается важной научно-технической задачей.

Целью исследования является создание и валидация доступной методики экспресс-кондуктометрического анализа с использованием оригинальной 3D-печатной ячейки, а также установление зависимости точности измерений от природы и микроструктуры электродного материала.

Литературный обзор

Контроль химического состава водных сред, в частности содержания ионов щелочных (Na^+, K^+, Li^+) и щелочноземельных (Ca^{2+}, Mg^{2+}) металлов, является критически важной задачей в современной промышленности, экологическом мониторинге, гидрогеологии и биомедицинских исследованиях [1, 2]. Эти катионы выступают не только базовыми электролитами, регулирующими биохимические процессы в живых организмах, но и ключевыми параметрами, определяющими физико-химические свойства природных и технологических вод: жесткость, минерализацию, буферную емкость, а также служат индикаторами антропогенного воздействия и состояния сложных технологических систем. Особую значимость эта задача приобретает на объектах энергетики – тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанциях, где непрерывный и точный мониторинг ионов переходит из разряда аналитических задач в категорию требований безопасности и экономической эффективности. Повышенные концентрации ионов кальция и магния являются основной причиной образования нерастворимых отложений, накипи на теплообменных поверхностях, что ведет к значительным энергопотерям, перегреву и риску аварийных ситуаций [3]. Контроль натрия и калия является центральным элементом управления водно-химическим режимом (ВХР), предотвращения коррозии и обеспечения чистоты пара в турбинах. В атомной энергетике мониторинг этих ионов в контурах охлаждения критически важен для контроля радиационной обстановки и предотвращения отложений активированных продуктов коррозии [4].

Высокотехнологичные лабораторные методы анализа, например, атомно-эмиссионная спектрометрия, ионная хроматография, масс-спектрометрия, несмотря на высокую точность и чувствительность, обладают существенными недостатками для задач оперативного контроля: требуют дорогостоящего оборудования, квалифицированного персонала, длительной пробоподготовки и, как правило, проводятся в лабораторных условиях, что исключает возможность непрерывного мониторинга в реальном времени [5].

В этом контексте ионоселективные электроды (ИСЭ) представляют собой перспективную альтернативу. Метод потенциометрии, лежащий в их основе, предлагает ряд неоспоримых преимуществ для экспресс-анализа: высокую скорость отклика, простоту конструкции и эксплуатации, низкую стоимость анализа, возможность миниатюризации и создания портативных или проточных анализаторов. Важнейшим достоинством является возможность проведения измерений непосредственно в исследуемой среде без существенной пробоподготовки и без разрушения пробы, что открывает путь к созданию систем непрерывного онлайн-контроля [6].

Исторически первыми ИСЭ стали электроды со стеклянной мембраной, предпосылки для создания которых были заложены в конце XIX века. Фундаментальный вклад в их развитие внесли Ф. Габер и З. Клеменсевич (1909 г.), а также Макс Кремер, открывший в 1930-х годах селективность специального стекла к ионам натрия [7]. Теоретическое обоснование работы ИСЭ дал Б. П. Никольский, предложивший уравнение Никольского-Эйзенмана, которое описывает зависимость потенциала электрода от активности определяемого иона с учетом влияния мешающих ионов и стало основным в теории ионометрии [8].

Ограничения стеклянных электродов, например, хрупкость, высокое сопротивление, неудовлетворительная селективность в сложных средах стимулировали поиск новых типов мембран. Появились твердотельные, кристаллические электроды, такие как фторид-селективный электрод на основе монокристалла LaF_3 (1966 г.) [9], и революционное направление – жидкостные, жидкостно-мембранные электроды. Концепция последних основана на использовании органического растворителя с ионофором – липофильным комплексообразователем, селективно связывающим и переносящим ионы. Прорывом стало применение синтетических макроциклических соединений – краун-эфиров, а также открытие практически идеального ионофора для K+ – природного антибиотика валиномицина (1973 г.) [10]. Для преодоления эксплуатационных проблем классических жидкостных мембран (нестабильность, вымывание компонентов) была предложена ключевая инновация – иммобилизация активной жидкости в твердой полимерной матрице, детально описанная в работах В. Саймона и Д. Аммана [11]. Такой подход, сочетающий высокую селективность жидкостных систем с механической прочностью и воспроизводимостью, лег в основу современных пластифицированных полимерных мембран на основе ПВХ.

Современные исследования в области ИСЭ сконцентрированы на нескольких ключевых направлениях. Во-первых, это молекулярный дизайн и синтез новых высокоселективных ионофоров. Для щелочных металлов активно разрабатываются и оптимизируются макроциклические лиганды: краун-эфиры, дибензо-18-краун-6 для K+ [12], бис(12-краун-4) эфиры и каликс[4]ареновые производные для Na^+ [15], а также их функционализированные аналоги. Для двухзарядных катионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}) применяются такие нейтральные носители, как ETH 1001, ETH 129 [13], а также изучаются редокс-переключаемые лиганды на основе хинонов [14]. Ведутся поиски новых, в том числе биогенных материалов для ионофоров, например, использование хлорофилла для определения Sr^{2+} [15] или ДНК для Ba^{2+} [16].

Во-вторых, критическое внимание уделяется составу мембраны и разработке новых пластификаторов. Пластификатор (например, диоктилфталат, о-нитрофенилоктиловый эфир) не только придает мембране эластичность, но и определяет диэлектрические свойства и полярность фазы, влияя на селективность и срок службы. Актуальным трендом является синтез «зеленых», биоразлагаемых и биосовместимых пластификаторов на основе возобновляемого сырья: эпоксидированного соевого масла [17], производных яблочной кислоты [18], фурановых соединений [19].

В-третьих, технологии массового производства ИСЭ эволюционируют в сторону миниатюризации, интеграции и автоматизации. Наряду с традиционными методами, перспективными являются аддитивные технологии: трафаретная, струйная и 3D-печать, позволяющие создавать планарные, одноразовые и мультипараметрические сенсорные чипы [20]. Развивается направление бумажных электрохимических аналитических устройств (ePAD), сочетающих низкую стоимость, портативность и возможность проведения сложных анализов [21].

Наконец, важнейшей задачей остается увеличение срока функциональной службы мембран. Основные деградационные механизмы – вымывание, выщелачивание активных компонентов, ионофоры, пластификатора в водную фазу и биологическое обрастание поверхности. Для борьбы с этим применяются стратегии химического закрепления компонентов в полимерной сетке, использования супергидрофобных материалов, а также нанесения функциональных защитных покрытий: фотокаталитического слоя TiO_2 для самоочищения [22], наночастиц серебра [23] или гидрофильного слоя полидофамина [24] для предотвращения адсорбции биомолекул.

Таким образом, развитие ИСЭ представляет собой междисциплинарную область на стыке аналитической химии, материаловедения и микротехнологий, направленную на создание надежных, долговечных и экономичных инструментов для экспресс-анализа и непрерывного мониторинга в реальном времени.

Целью исследования является создание и валидация доступной методики экспресс-кондуктометрического анализа, изготовленной с применением медных, графитовых и 3D-печатных электродов, с использованием оригинальной 3D-печатной ячейки, а также установление зависимости точности измерений от природы и микроструктуры электродного материала.

Материалы и методы

Для проведения исследований была разработана и изготовлена специализированная измерительная ячейка. Конструкция ячейки представляла собой цилиндрическую трубу, корпус которой был изготовлен методом послойного наплавления на 3D-принтере (рисунок1). В качестве материала для печати использовалась термопластичная полиэфирная нить PETG (полиэтилентерефталатгликоль), выбранная за счет

своей химической стойкости к водным растворам электролитов, достаточной механической прочности и стабильности геометрии. Конструкция ячейки предусматривала наличие герметичной крышки с системой фиксации электродов, обеспечивающей их строго параллельное расположение и постоянное расстояние между рабочими поверхностями в течение всего цикла измерений. Расстояние между электродами варьировалось в диапазоне от 1 до 3 см в различных сериях экспериментов, что позволяло оценить влияние геометрического фактора на постоянную ячейки.



Рисунок 1. Измерительная ячейка, напечатанная на 3D-принтере

Figure 1. 3D printed measuring cell

В работе проводилась сравнительная оценка характеристик самодельного кондуктометра с использованием нескольких типов электродных материалов. В качестве пробных и базовых вариантов были выбраны металлические и углеродные электроды: медные электроды, изготовленные из медной проволоки электротехнического назначения диаметром 1,19 мм, и графитовые электроды в форме стержней диаметром 5,89 мм. Поверхность электродов перед использованием тщательно механически очищалась абразивной бумагой и обезжиривалась в ацетоне с последующей промывкой деионизованной водой.

Основным перспективным направлением, соответствовавшим цели работы, являлось исследование электродов на основе композитных проводящих полимерных материалов. Для этого были подготовлены образцы пластика, модифицированные графитовым наполнителем с соотношением 1:1, так как они обладают достаточно высокой проводимостью – 1,64 мСм/см [25]. Образцы были отформованы в виде пластин, из которых затем были вырезаны электроды шириной 10 и длиной 15 мм. Для обеспечения надежного электрического контакта с измерительной аппаратурой к каждой полимерной пластине методом контактной пайки с использованием токопроводящего клея на основе эпоксидной смолы, наполненной серебряной пудрой, присоединялись медные выводные провода. Все электроды, независимо от материала, фиксировались внизу ячейки.

Измерения удельной электрической проводимости растворов проводились на собранной лабораторной установке, принципиальная схема которой соответствовала классическому двухэлектродному методу в переменном токе. Установка состояла из следующих основных блоков (рисунок 2, 3): источник стабилизированного постоянного тока Tektronix PWS4721 Programmable DC Power Supply 0-72 V, 1,2 A; функциональный генератор частот XY-LPWM, предназначенный для преобразования постоянного тока в переменный синусоидальный сигнал с регулируемой амплитудой и частотой (диапазон рабочих частот 50 Гц – 100 кГц); цифровой мультиметр с высоким входным импедансом APPA 501, используемый в качестве вольтметра для измерения падения напряжения на измерительной ячейке; и микроамперметр OWON B35 для измерения силы тока в цепи. Использование переменного тока было принципиально важно для минимизации явления поляризации на поверхности электродов, которое искажает результаты измерений в постоянном токе за счет образования двойного электрического слоя и протекания побочных электрохимических реакций. Частота сигнала подбиралась экспериментально для каждого типа электродов с целью достижения стабильных и воспроизводимых показаний приборов.

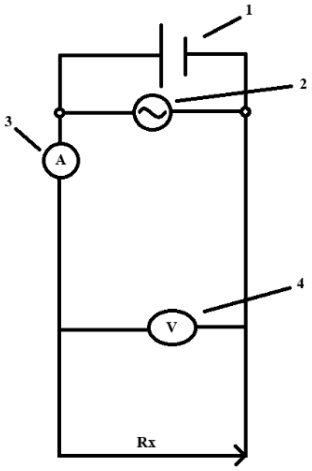


Рисунок 2. Принципиальная схема лабораторного кондуктометра, 1 – источник питания, 2 – функциональный генератор частот, 3 – микроамперметр, 4 – цифровой мультиметр

Figure 2. Schematic diagram of a laboratory conductometer, 1 – power supply, 2 – functional frequency generator, 3 – microammeter, 4 – digital multimeter

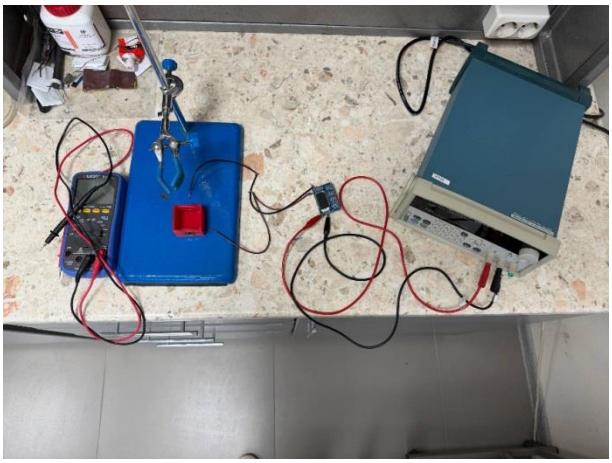


Рисунок 3. Вид цепи лабораторного кондуктометра

Figure 3. Circuit diagram of a laboratory conductometer

Объектом исследования служили водные растворы хлорида калия (KCl) различной концентрации, приготовленные растворением точной навески химически чистого реактива KCl в деионизованной воде. Была подготовлена серия растворов с концентрациями: 0,0005 М (разведение 1:200), 0,001 М (1:100), 0,005 М (1:20), 0,01 М (1:10), 0,02 М (1:5), 0,05 М (1:2) и 0,1 М. Все измерения проводились при стабильной комнатной температуре (23±2°C), так как электропроводность сильно зависит от температуры.

Процедура измерения для каждого раствора включала следующие этапы: тщательное ополаскивание измерительной ячейки и электродов порцией исследуемого раствора; заполнение ячейки свежим раствором; подключение ячейки к измерительной цепи; включение генератора и установление заданной частоты; снятие показаний напряжения (U, В) и силы тока (I, А) после стабилизации показаний (обычно в течение 30-60 секунд). Для каждой концентрации проводилось не менее трех независимых измерений, после чего рассчитывалось среднее арифметическое значение.

Первичная обработка данных заключалась в расчете полного сопротивления измерительной ячейки (R) по закону Ома:

$$R = U / I \quad (1)$$

где U – напряжение (В), I – сила тока (А).

В данной работе постоянная ячейки ($K_{яч}$), связывающая измеренное сопротивление с удельной электропроводностью раствора, определялась не через геометрические параметры, а экспериментальным методом калибровки по эталонному раствору с известной удельной электропроводностью. В качестве первичного эталона использовался раствор KCl концентрацией 0,0005 М (разведение 1:200), удельная электропроводность которого при 25°C составляет $\kappa_{эталон}$ = 0,074 мСм/см. Для этого эталонного раствора снимались показания напряжения ($U_{эталон}$) и силы тока ($I_{эталон}$), рассчитывалось его измеренное сопротивление ($R_{эталон} = U_{эталон} / I_{эталон}$), а затем вычислялась постоянная ячейки по формуле:

$$K_{яч} = \kappa_{эталон} * R_{эталон} \quad (2)$$

Это значение $K_{яч}$, найденное для конкретной пары электродов и их взаимного расположения, характеризует всю измерительную систему в целом.

После определения постоянной ячейки в эталонном растворе, эта же константа использовалась для расчета удельной электропроводности (к) всех последующих исследуемых растворов по следующему алгоритму:

Для каждого измеряемого раствора фиксировались значения напряжения (U) и силы тока (I).

Рассчитывалось сопротивление ячейки (R) для данного раствора:

$$R = U / I \quad (3)$$

Удельная электропроводность раствора (к) рассчитывалась по формуле, объединяющей закон Ома и экспериментально найденную постоянную $K_{яч}$:

$$\kappa = K_{яч} / R \quad (4)$$

или, в развернутом виде, через первично измеренные величины:

$$\kappa = K_{яч} * (I / U) \quad (5)$$

где к – удельная электропроводность раствора (мСм/см), $K_{яч}$ – постоянная ячейки, определенная по эталону ($см^{-1}$), I – сила тока в цепи (А), U – напряжение на ячейке (В).

Таким образом, зная постоянную ячейки, найденную в одном измерении с эталонным раствором, и измеряя всего два электрических параметра (U и I) для любого другого раствора, можно было напрямую вычислять его удельную электропроводность.

Данная процедура калибровки была выполнена отдельно для каждого типа исследуемых электродов, медь, графит, PLA с графитом, так как их поверхностные свойства и импеданс могли существенно различаться, влияя на значение постоянной $K_{яч}$. Для оценки корректности работы всей измерительной установки, рассчитанные значения удельной электропроводности для серии растворов сравнивались с данными, полученными на сертифицированных коммерческих кондуктометрах, а также с теоретическими справочными данными.

Результаты

В рамках экспериментальной работы была проведена серия кондуктометрических измерений, направленных на оценку работоспособности самодельного измерительного комплекса и сравнительный анализ характеристик различных электродных материалов. Ключевым этапом являлась калибровка системы, в ходе которой для каждой пары электродов была определена постоянная ячейки ($K_{яч}$) по эталонному раствору хлорида калия с концентрацией 0,0005 М и известной удельной электропроводностью ($\kappa_{эталон}$ = 0,074 мСм/см). Результаты калибровки выявили существенную разницу в поведении электродных пар: значение постоянной ячейки для системы с медными электродами составило $K_{яч}$ (Cu) = 0,145 $см^{-1}$, в то время как для пары графитовых электродов этот параметр был значительно выше – $K_{яч}$ (графит) = 0,191 $см^{-1}$. Это различие, превышающее 30%, является первым индикатором принципиально различных электрохимических и физических свойств границы раздела электрод-раствор для исследуемых материалов. Последующее использование рассчитанных констант в Формуле 5 для всего концентрационного ряда KCl позволило получить набор данных об удельной электропроводности (УЭП), которые представлены в Таблице 1. Для объективной оценки точности разработанной методики, результаты параллельно сравнивались с теоретически рассчитанными значениями УЭП, а также с показаниями двух сертифицированных коммерческих кондуктометров MW306 MAX и MILWAUKEE C65, выступавших в качестве референсного оборудования.

Таблица 1.

Удельная электропроводность (мСм/см) растворов KCl, измеренная различными методами

Table 1.

Specific conductivity (mS/cm) of KCl solutions measured by different methods

	Конц. KCl, моль/л | Conc. KCl, m/l	Идеальная УЭП, мСм/см | Ideal SEC, mS/cm	УЭП, мСм/см | SEC, mS/cm MW306 MAX	УЭП, мСм/см | SEC, mS/cm MILWAUKEE C65	УЭП, мСм/см Лабораторный кондуктометр (медь) | SEC, mS/cm Laboratory conductometer (copper)	УЭП, мСм/см Лабораторный кондуктометр (графит) | SEC, mS/cm Laboratory conductometer (graphite)	УЭП, мСм/см Лабораторный кондуктометр (1:1 PLA + графит) | SEC, mS/cm Laboratory conductometer (1:1 PLA + graphite)
1:200	0,0005	0,074	0,0425	0,07	0,1451	0,0779	3,6602
1:100	0,0010	0,147	0,0860	0,17	0,1918	0,0976	3,7515
1:20	0,0050	0,720	0,7050	0,92	0,8743	0,5375	3,8476
1:10	0,0100	1,410	1,4420	1,91	1,4711	1,0689	4,1350
1:5	0,0200	2,770	2,7790	3,71	2,6941	2,2682	4,9527
1:2	0,0500	6,700	6,6800	8,87	6,5311	6,6428	5,4677
0,1 моль/л | mol/l	0,1000	12,900	13,0600	16,89	13,0623	13,2857	7,3363

Обсуждение

Разработанная и реализованная методика, основанная на простом принципе калибровки по одному эталону и последующем использовании фундаментального соотношения по Формуле 5, продемонстрировала свою оперативную работоспособность и адекватность для быстрой оценки электропроводности. Кривая зависимости измеренной УЭП от концентрации электролита, построенная по данным для обоих типов электродов, имеет ярко выраженный возрастающий характер, что полностью согласуется с теорией электролитической проводимости и подтверждает корректность общего подхода. Однако детальный анализ данных выявляет значительные различия в качестве работы электродов из разных материалов, что требует отдельного рассмотрения.

Система на основе медных электродов показала исключительно хорошие результаты. В диапазоне концентраций от 0,005 М до 0,1 М наблюдается практически полное совпадение рассчитанных значений УЭП как с теоретическими данными, так и с показаниями коммерческого кондуктометра MW306 MAX. Среднее отклонение в этом рабочем диапазоне не превышает 2-3%, что можно считать отличным результатом для лабораторного макета. Такая высокая точность свидетельствует о низкой поляризуемости гладкой поверхности меди в условиях примененного переменного тока, стабильности омического контакта и эффективном подавлении паразитных электрохимических процессов на границе раздела фаз. Данный факт подтверждает, что медь, несмотря на свою химическую активность, в данной конфигурации и при использовании инертного

электролита (KCl) ведет себя как условно неполяризуемый электрод, пригодный для кондуктометрических измерений.

Напротив, поведение графитовых электродов оказалось менее предсказуемым и точным. В области низких и средних концентраций (0,001–0,01 М) систематически наблюдается значительное завышение измеренных значений УЭП относительно теоретических. Например, для раствора 0,001 М расхождение достигает 30%. Этот эффект может быть объяснен комплексом взаимосвязанных факторов, характерных для материалов с развитой пористой поверхностью. Во-первых, высокая шероховатость и удельная поверхность графита приводят к формированию двойного электрического слоя (ДЭС) с существенно большей емкостью по сравнению с гладкой медью. Даже при использовании переменного тока полная компенсация импеданса ДЭС может не достигаться, что вносит дополнительную погрешность в измерение активной составляющей сопротивления раствора. Во-вторых, на процессы переноса заряда на границе графит-электролит могут влиять специфические адсорбционные явления и кинетические ограничения. В-третьих, собственное объемное и контактное сопротивление графитового стержня и места его соединения с тоководом может быть выше, чем у монолитной медной проволоки, что также искажает результаты, особенно при малых токах. Интересно отметить, что в области высоких концентраций (0,05–0,1 М) расхождение данных для графита с теоретическими и данными по меди резко сокращается. Это можно объяснить тем, что при высокой ионной силе раствора сопротивление самого электролита становится доминирующим в полном импедансе системы, нивелируя влияние паразитных параметров электродов.

Стоит отметить, что электроды с содержанием PLA и графита в массовом соотношении 1:1 показали себя значительно хуже остальных электродов (рисунок 4). Их значения кардинально отличаются от металлических и графитовых аналогов. Как видно из Таблицы 1, рассчитанные для них значения УЭП на несколько порядков завышены и практически не зависят от концентрации раствора KCl в изученном диапазоне. Данное аномальное поведение является прямым следствием выраженной пористой микроструктуры композитного материала.

Высокая пористость электродов PLA, смешанных с графитом, формирует сложную систему микрополостей и каналов, которые резко увеличивают фактическую площадь контакта материала с раствором по сравнению с его геометрической поверхностью. Это приводит к нескольким ключевым эффектам, искажающим результаты кондуктометрии. Во-первых, значительная часть объёма пор заполняется электролитом, создавая дополнительные, плохо контролируемые пути для протекания тока. Во-вторых, развитая внутренняя поверхность способствует интенсивному формированию двойного электрического слоя с большой суммарной ёмкостью, что вносит доминирующую реактивность составляющую в импеданс системы. В результате измеряемое активное сопротивление ячейки, используемое в расчётах, оказывается искусственно заниженным, что и приводит к завышению вычисляемых значений УЭП.

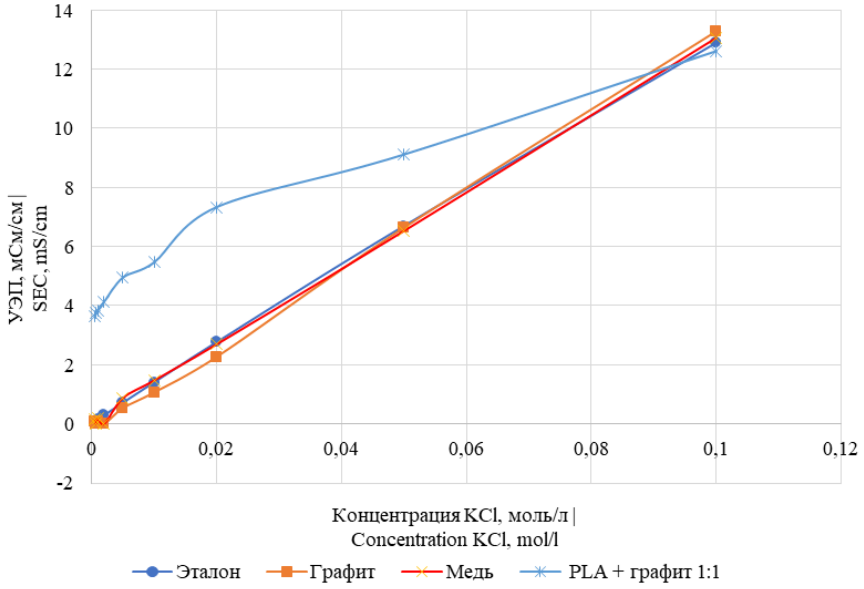


Рисунок 4. Сравнение УЭП лабораторных кондуктометров с эталонным значением
Figure 4. Comparison of the SEC of laboratory conductometers with the standart

Сравнение данных, полученных на самодельном кондуктометре с медными электродами, с показаниями двух коммерческих приборов дает важную информацию для валидации методики. Наблюдается высокая степень согласованности с коммерческим кондуктометром MW306 MAX по всему изученному диапазону концентраций. Незначительные отклонения носят случайный характер и находятся в пределах ожидаемой погрешности для подобных измерений, что является убедительным доказательством корректности примененного подхода к калибровке и измерению.

В то же время, данные с коммерческого кондуктометра MILWAUKEE C65 демонстрируют устойчивое систематическое завышение значений УЭП относительно всех других источников данных (теории, MW306 MAX, лабораторный прибор). Поскольку это наблюдается для всей серии растворов, наиболее вероятной причиной является неверно установленная или изменившаяся в процессе эксплуатации постоянная измерительной ячейки самого прибора MILWAUKEE C65. Этот факт подчеркивает важность регулярной проверки и калибровки даже сертифицированного оборудования и косвенно подтверждает надежность результатов, полученных в данной работе с помощью откалиброванного самодельного макета.

К основным источникам погрешности в проведенных экспериментах можно отнести: 1) Поляризационные эффекты, особенно выраженные для графита, которые не были полностью устранены выбранным режимом переменного тока; 2) Временную нестабильность системы, обусловленную возможным окислением поверхности медных электродов или изменением смачиваемости графита в ходе цикла измерений; 3) Пористость электродов.

Заключение

Проведенная экспериментальная работа позволила сделать ряд существенных заключений. Во-первых, была успешно разработана, реализована и апробирована конструкция лабораторного кондуктометра на базе оригинальной ячейки, изготовленной аддитивным методом, и измерительной цепи с генератором переменного тока. Предложенная методика однократной калибровки по эталонному раствору с последующим расчетом удельной электропроводности по формуле подтвердила свою оперативность, простоту и физическую корректность для анализа водных растворов электролитов.

Во-вторых, сравнительный анализ электродных материалов выявил их принципиально разные характеристики. Медные электроды продемонстрировали высокую точность и надежность, обеспечив отклонение от теоретических значений менее 3% в широком диапазоне концентраций (0,005–0,1 М) и отличную корреляцию с данными прецизионного коммерческого прибора. Это делает их предпочтительным выбором для подобных кондуктометрических измерений благодаря низкой поляризуемости и стабильности поверхности. В то же время графитовые электроды, несмотря на химическую инертность, показали систематическое завышение показаний, особенно при низких концентрациях, что связано с высокой развитостью их поверхности и значительной емкостью двойного электрического слоя. Их эффективное применение требует дополнительной оптимизации условий измерений.

Наконец, полученные результаты имеют важное практическое значение, создавая основу для следующего этапа исследований. Выявленные закономерности влияния материала и микроструктуры электрода на результат измерений будут непосредственно применены для изучения и оптимизации параметров перспективных электродов на основе композитных полимерных материалов, наполненных многостенными углеродными нанотрубками. Выявленные закономерности влияния материала и микроструктуры электрода на результат измерений будут непосредственно применены для изучения и оптимизации параметров перспективных электродов на основе композитных полимерных материалов, наполненных многостенными углеродными нанотрубками (мУНТ). При этом ключевым направлением станет целенаправленное управление морфологией композита для устранения негативного влияния пористости на точность кондуктометрического анализа.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-00306, https://rscf.ru/project/25-29-00306/

Литература

1 Журавская Н.Е., Стефанович П.И., Стефанович И.С. Потенциальные риски при аварии на атомной станции // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2021. № 8. С. 25–32.

2 Бдицких А.В., Петрова А.Н., Дударев В.И. Сравнение изменений физико-химических показателей водоподготовки ТЭЦ // Вестник магистратуры. 2025. № 5-3 (164). С. 13–16.

3 Ефимова Д.Д. Совершенствование методов подготовки воды на ТЭС // Фундаментальные и прикладные научные исследования: инновatika в современном мире. 2021. С. 55–62.

4 Чириков М.Е., Гусаров А.С. К вопросу автоматизации водоподготовки и химводоочистке в энергетике // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 1-2 (76). С. 118–123.

5 Marcinek S., Chmielewska-Śmietanko D., Pawlak M. et al. Revised application of copper ion selective electrode (Cu-ISE) in marine waters: A new meta-calibration approach // Talanta. 2021. V. 226. P. 122–170. doi: 10.1016/j.talanta.2021.122170

6 Belyustin A.A., Ivanovskaya I.S. The Glass Electrode and Electrode Properties of Glasses // Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture. 2021. V. 1. P. 609–617. doi: 10.1002/9781118801017.ch2.1

7 Pirzada M., Altintas Z. Historical development of sensing technology // Fundamentals of Sensor Technology. Woodhead Publishing, 2023. P. 3–16. doi: 10.1016/B978-0-323-88431-0.00001-6

8 Mele L.J., Gajda M., Bednarczyk M. et al. Selectivity, sensitivity and detection range in ion-selective membrane-based electrochemical potentiometric sensors analyzed with poisson-boltzmann equilibrium model // IEEE Sensors Journal. 2022. V. 22. № 15. P. 15010–15021. doi: 10.1109/JSEN.2022.3188432

9 Tatara R., Nishio S., Tsukazaki H. et al. All-Solid-State Ion-Selective Electrode Inspired from All-Solid-State Li-Ion Batteries // Analytical Chemistry. 2025. V. 97. № 9. P. 4819–4823. doi: 10.1021/acs.analchem.4c05810

10 Ross J.W. Calcium-Selective Electrode with Liquid Ion Exchanger // Science. 1967. V. 156. № 3780. P. 1378–1379. doi: 10.1126/science.156.3780.1378

11 Morf W.E., Ammann D., Pretsch E., Simon W. Carrier antibiotics and model compounds as components of selective ion-sensitive electrodes // International Symposium on Selective Ion-Sensitive Electrodes. Butterworth-Heinemann, 1973. P. 421–439. doi: 10.1016/B978-0-408-70331-4.50029-0

12 Shu Y., Li C., Li Y. et al. Dibenzo-18-crown-6/Polyacrylonitrile (PAN) nanofibers for metal ions adsorption: adsorption studies for Na+ and K+ // Polymer Bulletin. 2022. V. 79. № 8. P. 6275–6288. doi: 10.1007/s00289-021-03850-3

13 Bondar A.V., Keresten V.M., Mikhelson K.N. Registration of small (below 1%) changes of calcium ion concentration in aqueous solutions and in serum by the constant potential coulometric method // Sensors and Actuators B: Chemical. 2022. V. 354. P. 131231. doi: 10.1016/j.snb.2021.131231

14 Anchaliya D., Sharma U. Selective bulk liquid membrane carrier facilitated transport of Mg2+ over Li+, Na+, K+ and Ca2+ metal ions using naphthaquinone derived redox-switchable ionophores // Main Group Metal Chemistry. 2017. V. 40. № 1-2. P. 27–33. doi: 10.1515/mgmc-2017-0023

15 Mizani F., Saffari S., Paiehghadr M. Trace amounts determination of barium ions by a new ion-selective electrode based on 4', 4" (5")-Di-Tert-Butyldibenzo-18-Crown-6 // Analytical and Bioanalytical Electrochemistry. 2023. V. 15. № 1. P. 47–56.

16 Zareh M.M., Abdel-Ghani N.T., Al-Sabbagh A.M. et al. DNA as a polyionic ionophore for barium sensor // BMC Chemistry. 2025. V. 19. № 1. P. 172. doi: 10.1186/s13065-025-01452-8

17 He W., Wu H., Chen L. et al. Green plasticizers derived from epoxidized soybean oil for poly (vinyl chloride): Continuous synthesis and evaluation in PVC films // Chemical Engineering Journal. 2020. V. 380. P. 122532. doi: 10.1016/j.cej.2019.122532

18 Park M., Lee D., Lee S. et al. Renewable malic acid-based plasticizers for both PVC and PLA polymers // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2020. V. 88. P. 148–158. doi: 10.1016/j.jiec.2020.03.045

19 Hao Y., Li Y., Zhang H. et al. Synthesis and evaluation of bio-based plasticizers from 5-hydroxymethyl-2-furancarboxylic acid for poly (vinyl chloride) // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020. V. 59. № 40. P. 18290–18297. doi: 10.1021/acs.iecr.0c03571

20 Li L., Wang J., Zhu C. et al. Printing technologies for the fabrication of ion-selective electrodes // Sensing and Bio-Sensing Research. 2024. V. 44. P. 100650. doi: 10.1016/j.sbsr.2024.100650

21 Noviana E., McCord C.P., Clark K.M. et al. Electrochemical paper-based devices: Sensing approaches and progress toward practical applications // Lab on a Chip. 2020. V. 20. № 1. P. 9–34. doi: 10.1039/C9LC00903E

22 Liu T., Liang R., Qin W. Anti-fouling TiO2-Coated polymeric membrane ion-selective electrodes with photocatalytic self-cleaning properties // Analytical Chemistry. 2023. V. 95. № 16. P. 6577–6585. doi: 10.1021/acs.analchem.2c04567

23 Qi L., Cheng Y., Liu Y. et al. Polymeric membrane ion-selective electrodes with anti-biofouling properties by surface modification of silver nanoparticles // Sensors and Actuators B: Chemical. 2021. V. 328. P. 129014. doi: 10.1016/j.snb.2020.129014

24 Jiang X., Wang C., Zhang H. et al. Improving the biocompatibility of polymeric membrane potentiometric ion sensors by using a mussel-inspired polydopamine coating // Analytical Chemistry. 2019. V. 91. № 10. P. 6424–6429. doi: 10.1021/acs.analchem.9b00661

25 Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф. и др. Создание электропроводящего композита с полимерными материалами для 3D-печати на основе поверхностной модификации // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 241–248. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-241-248

References

1 Zhuravskaya N.E., Stefanovich P.I., Stefanovich I.S. Potential Risks in the Event of an Accident at a Nuclear Power Plant. Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences. 2021. no. 8. pp. 25–32. (in Russian).

2 Bditskikh A.V., Petrova A.N., Dudarev V.I. Comparison of Changes in Physicochemical Indicators of CHP Water Treatment. Master's Journal. 2025. no. 5-3 (164). pp. 13–16. (in Russian).

3 Efimova D.D. Improvement of Water Treatment Methods at Thermal Power Plants. In: Fundamental and Applied Scientific Research: Innovation in the Modern World. 2021. pp. 55–62. (in Russian).

4 Chirikov M.E., Gusarov A.S. On the Issue of Automation of Water Treatment and Chemical Water Treatment in the Energy Sector. International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2023. no. 1-2 (76). pp. 118–123. (in Russian).

5 Marcinek S. et al. Revised application of copper ion selective electrode (Cu-ISE) in marine waters: A new meta-calibration approach. Talanta. 2021. vol. 226. article 122170. doi: 10.1016/j.talanta.2021.122170.

6 Belyustin A.A., Ivanovskaya I.S. The Glass Electrode and Electrode Properties of Glasses. In: Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture. 2021. vol. 1. pp. 609–617.

7 Pirzada M., Altintas Z. Historical development of sensing technology. In: Fundamentals of Sensor Technology. Woodhead Publishing, 2023. pp. 3–16.

8 Mele L.J. et al. Selectivity, sensitivity and detection range in ion-selective membrane-based electrochemical potentiometric sensors analyzed with poisson-boltzmann equilibrium model. IEEE Sensors Journal. 2022. vol. 22. no. 15. pp. 15010–15021. doi: 10.1109/JSEN.2022.3184789.

9 Tatara R. et al. All-Solid-State Ion-Selective Electrode Inspired from All-Solid-State Li-Ion Batteries. Analytical Chemistry. 2025. vol. 97. no. 9. pp. 4819–4823. doi: 10.1021/acs.analchem.4c05847.

10 Ross J.W. Calcium-Selective Electrode with Liquid Ion Exchanger. Science. 1967. vol. 156. no. 3780. pp. 1378–1379. doi: 10.1126/science.156.3780.1378.

11 Morf W.E. et al. Carrier antibiotics and model compounds as components of selective ion-sensitive electrodes. In: International Symposium on Selective Ion-Sensitive Electrodes. Butterworth-Heinemann, 1973. pp. 421–439.

12 Shu Y. et al. Dibenzo-18-crown-6/Polyacrylonitrile (PAN) nanofibers for metal ions adsorption: adsorption studies for Na+ and K+. Polymer Bulletin. 2022. vol. 79. no. 8. pp. 6275–6288. doi: 10.1007/s00289-021-03805-8.

13 Bondar A.V., Keresten V.M., Mikhelson K.N. Registration of small (below 1%) changes of calcium ion concentration in aqueous solutions and in serum by the constant potential coulometric method. Sensors and Actuators B: Chemical. 2022. vol. 354. article 131231. doi: 10.1016/j.snb.2021.131231.

14 Anchaliya D., Sharma U. Selective bulk liquid membrane carrier facilitated transport of Mg2+ over Li+, Na+, K+ and Ca2+ metal ions using naphthaquinone derived redox-switchable ionophores. Main Group Metal Chemistry. 2017. vol. 40. no. 1-2. pp. 27–33. doi: 10.1515/mgmc-2017-0012.

15 Mizani F., Saffari S., Paiehghadr M. Trace amounts determination of barium ions by a new ion-selective electrode based on 4′, 4″ (5″)-Di-Tert-Butyldibenzo-18-Crown-6. Analytical and Bioanalytical Electrochemistry. 2023. vol. 15. no. 1. pp. 47–56.

16 Zareh M.M. et al. DNA as a polyionic ionophore for barium sensor. BMC Chemistry. 2025. vol. 19. no. 1. article 172. doi: 10.1186/s13065-025-01418-6.

17 He W. et al. Green plasticizers derived from epoxidized soybean oil for poly (vinyl chloride): Continuous synthesis and evaluation in PVC films. Chemical Engineering Journal. 2020. vol. 380. article 122532. doi: 10.1016/j.cej.2019.122532.

18 Park M. et al. Renewable malic acid-based plasticizers for both PVC and PLA polymers. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2020. vol. 88. pp. 148–158. doi: 10.1016/j.jiec.2020.04.011.

19 Hao Y. et al. Synthesis and evaluation of bio-based plasticizers from 5-hydroxymethyl-2-furancarboxylic acid for poly (vinyl chloride). Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020. vol. 59. no. 40. pp. 18290–18297. doi: 10.1021/acs.iecr.0c02718.

20 Li L. et al. Printing technologies for the fabrication of ion-selective electrodes. Sensing and Bio-Sensing Research. 2024. vol. 44. article 100650. doi: 10.1016/j.sbsr.2024.100650.

21 Noviana E. et al. Electrochemical paper-based devices: Sensing approaches and progress toward practical applications. Lab on a Chip. 2020. vol. 20. no. 1. pp. 9–34. doi: 10.1039/C9LC00903E.

22 Liu T., Liang R., Qin W. Anti-fouling TiO2-Coated polymeric membrane ion-selective electrodes with photocatalytic self-cleaning properties. Analytical Chemistry. 2023. vol. 95. no. 16. pp. 6577–6585. doi: 10.1021/acs.analchem.2c05531.

23 Qi L. et al. Polymeric membrane ion-selective electrodes with anti-biofouling properties by surface modification of silver nanoparticles. Sensors and Actuators B: Chemical. 2021. vol. 328. article 129014. doi: 10.1016/j.snb.2020.129014.

24 Jiang X. et al. Improving the biocompatibility of polymeric membrane potentiometric ion sensors by using a mussel-inspired polydopamine coating. Analytical Chemistry. 2019. vol. 91. no. 10. pp. 6424–6429. doi: 10.1021/acs.analchem.8b05370.

25 Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Kamalieva R.F., Mayorov E.S., Filimonov A.A. Creation of an Electrically Conductive Composite with Polymer Materials for 3D Printing Based on Surface Modification. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 241–248. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-241-248 (in Russian).

Сведения об авторах

Антонина А. Филимонова д.т.н., доцент, зав. кафедрой, кафедра автономная распределённая энергетика, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, aachichirova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6238-188X

Алена Ю. Власова к.т.н., доцент, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, vlasovaay@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8520-5432

Егор С. Майоров студент, инженер, лаборатория «Лаборатория спецводоочистки и контроля качества теплоносителя на атомных электрических станциях», Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, mes.tegatu@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-3925-1458

Рузина Ф. Камалиева студент, инженер, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, rruzzi@ya.ru
https://orcid.org/0009-0001-0427-9358

Андрей А. Филимонов студент, лаборант-исследователь, лаборатория «Лаборатория спецводоочистки и контроля качества теплоносителя на атомных электрических станциях», Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, vip.jokermigel@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-8251-5267

Наталия Д. Чичирова д.х.н., профессор, зав. кафедрой, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, ndchichirova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8635-9177

Information about authors

Antonina A. Filimonova Dr. Sci. (Engin.), assistant professor, Head of Department of Autonomous Distributed Energy, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya Str., 51 Kazan, 420066, Russia, aachichirova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6238-188X

Alena Yu. Vlasova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of nuclear and thermal power plants, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya Str., 51 Kazan, 420066, Russia, vlasovaay@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8520-5432

Egor S. Mayorov student, research engineer, Laboratory for Specialized Water Purification and Coolant Quality Control at Nuclear Power Plants, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya Str., 51 Kazan, 420066, Russia, mes.tegatu@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-3925-1458

Ruzina F. Kamalieva student, research engineer, Department of nuclear and thermal power plants, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya Str., 51 Kazan, 420066, Russia, rruzzi@ya.ru
https://orcid.org/0009-0001-0427-9358

Andrey A. Filimonov student, laboratory researcher, Laboratory for Specialized Water Purification and Coolant Quality Control at Nuclear Power Plants, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya Str., 51 Kazan, 420066, Russia, vip.jokermigel@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-8251-5267

Natalia D. Chichirova Dr. Sci. (Chem.), professor, head of department, atomic and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya Str., 51 Kazan, 420066, Russia, ndchichirova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8635-9177

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 10/01/2025	**После редакции** 18/01/2025	**Принята в печать** 20/02/2026
Received 10/01/2025	**Accepted in revised** 18/01/2025	**Accepted** 20/02/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-291-298 Оригинальная статья/Research article
УДК 678.07:577(075) Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Масло семян каучукового дерева и натуральный каучук в качестве биодеградирующих добавок для полипропиленовых композиций с укороченным циклом жизни

Владислав В. Янов [1] vladyanoff@ya.ru 0009-0003-1424-5754
Лина И. Гатауллина [1] raudeeva@mail.ru 0009-0003-5488-4905
Ладимира В. Носова [1] ladimira.nosova@mail.ru 0009-0006-9503-4730
Любовь А. Зенитова [1] liubov_zenitova@mail.ru 0009-0009-0651-695X

1 Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д.68, Казань, 420015, Россия

Аннотация. Работа касается исследований по использованию продуктов растительного происхождения в качестве биодеградирующих добавок в композициях на основе полипропилена. Полипропилен является синтетическим материалом не подвергающимся процессам биодеградации. Натуральный каучук - продукт, получаемый из млечного сока дерева «Hevea Brasiliensis», в природе не накапливается из-за присутствия в его составе белков и фосфолипидов, которые способствуют его деградации. В исследовании для получения биодеградируемых композиций в полипропилен добавлялись неочищенный натуральный каучук (НК-Н) и масло семян каучукового дерева (МСКД). Определена склонность к биодеградации исследуемых композиций методами оценки шероховатости поверхности, краевого угла смачивания и водопоглощения. Выявлено, что использование неочищенного натурального каучука в количествах до 15% масс., масла семян каучукового дерева до 5% масс. и их смесей в суммарном количестве до 10% масс. приводит к существенному увеличению шероховатости поверхности. Масло семян каучукового дерева, выполняя функцию пластификатора, распределяется в полипропилене более равномерно, чем натуральный каучук, что снижает выраженность шероховатости образцов. Методом лежащей капли оценивали гидрофильность композиций с биодеградирующими добавками. С увеличением количества введенного неочищенного натурального каучука краевой угол смачивания падает и при содержании неочищенного натурального каучука 15% масс. составляет 66° против 85° для чистого полипропилена. Совместное введение НК-Н и МСКД закономерно увеличивает гидрофильность композита, но в меньшей степени, по сравнению с введением одного НК-Н в том же количестве. Было оценено поведение полипропилена и его композиций с неочищенным натуральным каучуком и маслом семян каучукового дерева после 25 месяцев экспозиции в водной среде. С увеличением количества введенного каучука происходит существенная потеря массы композита. Введение в полипропилен смеси 5% масс. неочищенного натурального каучука и 5% масс. масла семян каучукового дерева через 13 месяцев экспозиции в водной среде привело к уменьшению его массы на 71%.

Ключевые слова: масло семян каучукового дерева, неочищенный натуральный каучук, полипропилен, биодеградация, шероховатость, краевой угол смачивания, водопоглощение.

Rubber tree seed oil and natural rubber as biodegradable additives in polypropylene-base compositions with a shortened life cycle

Vladislav V. Yanov [1] vladyanoff@ya.ru 0009-0003-1424-5754
Lina I. Gataullina [1] raudeeva@mail.ru 0009-0003-5488-4905
Ladimira V. Nosova [1] ladimira.nosova@mail.ru 0009-0006-9503-4730
Liubov A. Zenitova [1] liubov_zenitova@mail.ru 0009-0009-0651-695X

1 Kazan National Research Technological University, Karl Marx St., 68, Kazan, 420015, Russia

Abstract. The work focuses on the use of plant-based products as biodegradable additives in polypropylene-based compositions. Polypropylene is a synthetic material that does not undergo biodegradation. Natural rubber, a product obtained from the milky sap of the «Hevea Brasiliensis» tree, does not accumulate in the environment due to the presence of proteins and phospholipids that promote its biodegradation. In the study, unpurified natural rubber (UNR) and rubber tree seed oil (RSO) were added to polypropylene to obtain biodegradable compositions. The biodegradability of the investigated compositions was evaluated using methods for assessing surface roughness, contact angle and water absorption. It was found that the use of unpurified natural rubber in amounts of up to 15% by weight, rubber tree seed oil up to 5% by weight and their mixtures in a total amount of up to 10% by weight leads to a significant increase in surface roughness. The rubber tree seed oil, acting as a plasticizer, is distributed within polypropylene more uniformly than natural rubber, which reduces the pronounced surface roughness of the samples. The hydrophilicity of the compositions containing biodegradable additives was evaluated using the sessile drop method. With increasing content of unpurified natural rubber, the contact angle decreases, reaching 66° at a content of 15% by weight UNR compared to 85° for neat polypropylene. The combined incorporation of UNR and RSO increases the hydrophilicity of the composite, however, this effect is less pronounced than that observed when UNR is introduced alone in the same amount. The behavior of polypropylene and its compositions containing unpurified natural rubber and rubber tree seed oil after 25 months of exposure in an aqueous environment was also evaluated. With an increase in the amount of introduced unpurified natural rubber, there is a significant mass loss of the composite. The introduction of a mixture of 5% by weight unpurified natural rubber and 5% by weight of rubber tree seed oil into polypropylene resulted in a 71% mass reduction after 13 months of exposure in an aqueous environment.

Keywords: rubber tree seed oil, unpurified natural rubber, polypropylene, biodegradation, surface roughness, contact angle, water absorption.

Для цитирования
Янов В.В., Гатауллина Л.И., Носова Л.В., Зенитова Л.А. Масло семян каучукового дерева и натуральный каучук в качестве биодеградирующих добавок для полипропиленовых композиций с укороченным циклом жизни // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 291–298. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-291-298

For citation
Yanov V.V., Gataullina L.I., Nosova L.V., Zenitova L.A. Rubber tree seed oil and natural rubber as biodegradable additives in polypropylene-base compositions with a shortened life cycle. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 291–298. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-291-298

© 2026, Янов В.В. и др. / Yanov V.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Современная экологическая ситуация в части накопления отходов изделий из полимеров обусловила развитие исследований и разработок, направленных на создание биоразлагаемых материалов.

В результате возникают, казалось бы, разнонаправленные, но фактически связанные между собой задачи для производителей: получить высокопрочные и долговечные материалы, исключив их деструкцию в процессе эксплуатации, но при этом ускорить биоразложение после завершения срока службы изделий во избежание загрязнения окружающей среды [1].

В качестве методов оценки предрасположенности материалов к биокоррозии применяют измерение молекулярной массы, потери массы, прочностных показателей, степени кристалличности, изменения степени гидрофобности, водопоглощения, шероховатости и др. [2].

Известно, что шероховатость поверхности материала влияет на его склонность к биодеградации. Шероховатость увеличивает площадь поверхности материала и, как следствие, повышается возможность воздействия различных сред и их фиксацию в зоне впадин. Также повышенная шероховатость увеличивает потенциальную возможность микробов и грибов, способствующих биоразложению, закрепляться на такой поверхности. Оценка склонности к биодеградации по состоянию поверхности материала проводилась многими исследователями [3].

В работе [4] разработаны деградируемые композиции на основе поливинилхлорида (ПВХ), наполненные до 15% масс. бентонитом, пектином и крахмалом, предназначенные для применения в качестве упаковки. Используемые наполнители увеличивают шероховатость поверхности, что позволило создать деградируемые ПВХ материалы с укороченным жизненным циклом.

Кроме того, склонность к биодеградации можно оценить по способности материала смачиваться жидкостью. Отмечено, что материалы с гидрофильной поверхностью в большей степени склонны к биоразложению. Угол, образованный между твёрдой поверхностью и касательной к поверхности капли, характеризует способность тела смачиваться. Увеличение его значения приводит к потере смачивающей способности, уменьшение – к восстановлению способности смачивать поверхность. В работе [5] при исследовании биоразлагаемых соединений яблочной кислоты и ее эфиров установлено, что увеличение числа фрагментов яблочной кислоты в структуре полиэфира на стадии синтеза повышает гидрофильность сополимера, что увеличивает скорость деградации.

Авторы [6] исследовали смеси сополиамида в водной среде. Отмечено, что при наполнении этих сополимеров полисахаридами увеличивается способность смачиваться водой и набухать в ней. То есть материалы становятся гидрофильными. Последнее способствует их биодеградации.

При этом отмечено, что [7] выделение углекислого газа, оцененное методом хроматографии, и потеря массы пленок при помещении их в стандартную почву согласуется с оценкой их гидрофильности и стойкости к водопоглощению.

Кроме вышеперечисленных методов ценную информацию по склонности к биодеградации дает определение водопоглощения материала, так как проникновение воды обеспечивает доступ микроорганизмов к наполнителю и инициирует процессы биодеградации.

Водопоглощение также может служить маркером способности материалов к биоразложению. Материалы с высокими показателями водопоглощения более биодоступны для микроорганизмов.

В работе [8] приводятся исследования водопоглощения двойных композиционных пленок на основе полилактида и крахмала, полилактида и микроцеллюлозы. Выявлено, что полученные композиции являются биоразлагаемыми системами, что подтверждается их неустойчивостью к воздействию воды, плесневых грибов, потерей массы при экспонировании в почве, а также данными СЭМ и ИК-Фурье-спектроскопии.

В статье [9] методом водопоглощения оценивались биоразложение пленок на основе природных полисахаридов. В работе [10] исследовано влияние содержания термически модифицированного рисового крахмала (5–55% масс.) на водопоглощающие свойства биоразлагаемых композитов на основе полиэтилена низкой плотности / крахмал / моностеарат глицерина. Высокое водопоглощение обусловлено формированием непрерывной гидрофильной фазы, что обеспечивает потенциальную биоразлагаемость материала и возможность его применения в экологически безопасных упаковочных технологиях.

Исследование [11] приводит анализ свойств биоразлагаемых и синтетических полимерных материалов. Сравнение физико-механических и других показателей, в том числе водопоглощения, для рассмотрения возможности упрочнения материалов выявило преимущества и недостатки изучаемых материалов.

В статье [12] исследователи показали возможность и целесообразность получения и применения древеснонаполненного полилактида.

Значительное увеличение показателей водопоглощения за 24 часа и 30 суток, может оказывать положительное влияние на степень биоразложения древеснонаполненного полилактида.

В работе [13] исследовались кинетика водопоглощения композиционных пленок на основе полиэтилена низкой плотности с термопластичным крахмалом. Степень биоразложения для исследуемых смесевых составов при нахождении в биогумусе увеличивается в среднем на 20–30%.

Таким образом, совокупность методов: водопоглощение, определение гидрофильности по краевому углу смачивания и шероховатости поверхности дает возможность оценить склонность материала к биоразложению.

Ранее на примере различных небиоразлагаемых полимеров (стеклонаполненный полиамид, полиэтилен и полипропилен) было показано, что использование неочищенного натурального каучука (НК-Н) в качестве биодеградирующей добавки в количествах до 15% масс. приводит к существенной деградации композитов [14]. Оценка поведения данных полимерных композиций по отношению к плесневым грибам выявила их склонность к биокоррозии из-за присутствия НК-Н.

При нахождении исследуемых композиций в биогумусе за полгода наибольшей деградации подверглись композиции ПЭВД + 10% масс. НК, что свидетельствует о способности натурального каучука ускорять биодеградацию полимерных композиций с его использованием [15–18]. Также показано, что НК-Н, содержащий значительное количество фосфолипидов и белков в отличии от очищенного аналога, является более активным биодеградирующим компонентом [19].

В продолжение ранее начатых работ целью настоящего исследования было использовать в качестве биодеградирующего компонента не только натуральный каучук-продукт, полученный из дерева «Hevea Brasiliensis», но и масло семян каучукового дерева (МСКД) [20]. Потенциально оба эти продукта, содержащие фосфолипиды и белки, могут существенно снизить жизненный цикл полипропиленовых композиций с их использованием.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовался полипропилен (ПП) производства ООО «Омский завод полипропилена» марки PP H 030GP 38/01–17 C30B. В качестве биодеградирующих добавок – неочищенный от некаучуковых компонентов натуральный каучук (НК-Н) марки SMR-10 (Вьетнам) и масло семян каучукового дерева (МСКД) (Вьетнам). Оценка шероховатости проводилась по ГОСТ 2789–73 с помощью лазерного сканирующего 3D-микроскопа Olympus LEXT OLS5100.

В таблице 1 приведено количество введенных в полипропилен неочищенного натурального каучука и масла семян каучукового дерева. ПКМ готовились путем смешения полипропилена с добавками в смесителе Брабенбери EN 60204–1620061 A 1:2009 при температуре 190 °C. Пленки изготавливали на прессе GT-7014-H10C по ГОСТ 12019–66 при температуре 190 °C, давление 20 МПа: нагревание 10 мин., выдержка под давлением 10 мин., охлаждение 5 мин.

Таблица 1.

Рецептура композиций на основе ПП с биодеградирующими добавками

Table 1.

Formulation of polypropylene (PP) compositions containing biodegradable additives

Образец Sample	Содержание, %масс. | Content, % mass		
	ПП	НК-Н	МСКД
0	100,0	0	0
1	99,0	1,0	0
2	95,0	5,0	0
3	92,5	7,5	0
4	90,0	10,0	0
5	85,0	15,0	0
6	99,0	0	1,0
7	97,0	0	3,0
8	95,0	0	5,0
9	99,0	0,5	0,5
10	95,0	2,5	2,5
11	90,0	5,0	5,0

Шероховатость поверхности – сумма микронеровностей, отличающаяся от идеальной поверхности в мкм(рис. 1)

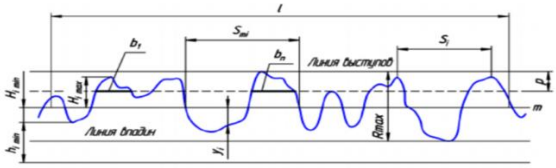


Рисунок 1. Шероховатая поверхность

Figure 1. Rough surface

Базовая линия l – длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности.

Средняя линия профиля m – базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, чтобы в пределах базовой длины среднеквадратическое отклонение профиля до этой линии было минимальным.

Линия выступов профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины.

Линия впадин профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины.

В таблице 2 приведены условные обозначения параметров шероховатости с их описанием.

Таблица 2.

Условные обозначения параметра шероховатости и их описание

Table 2.

Surface roughness parameter and their descriptions

Параметр Index	Наименование | Name	Группа параметра Group	Определение Description
Ra	Среднее арифметическое отклонение профиля	Высотная	Среднее арифметическое абсолютных значений (значений по модулю) отклонений профиля в пределах базовой длины
Rz	Высота неровностей профиля по 10 точкам		Сумма средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов профиля в пределах базовой длины
R_{max}	Наибольшая высота поверхностей профиля		Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины
S_m	Средний шаг неровностей профиля	Шаговая	Среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины
S	Средний шаг неровностей профиля по вершинам		Среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины
t_p	Относительная опорная длина профиля	Параметр формы	Отношение опорной длины профиля к базовой длине, где "p" – значение уровня сечения профиля

Параметры шероховатости определяли тремя параллельными опытами и подсчитывали среднее значение из трех.

Оценка краевого угла смачивания проводилась на приборе Kruss DSA100 по ГОСТ 7934.2–74 Масла часовые. Метод определения краевого угла смачивания. Проводили три параллельных опыта. Конечным результатом являлось среднее значение.

Склонность материалов к водопоглощению проводилась по ГОСТ 4650–2014 ISO 62:2008.

Результаты и обсуждение

В таблице 3 приводятся результаты измерений шероховатости поверхности композиций по площади.

Таблица 3.

Результаты измерений шероховатости поверхности композиций по базовой линии

Table 3.

The results of surface roughness measurements of the compositions along the baseline

Образец | Sample	$Sz_{ср}$, мкм	$Sa_{ср}$, мкм
0	0,969	0,229
1	0,781	0,232
2	1,070	0,378
3	1,295	0,310
4	0,382	0,103
5	0,914	0,192
6	0,911	0,190
7	0,675	0,159
8	0,749	0,228
9	0,734	0,158
10	0,634	0,139
11	2,372	0,495

Видно, что Sacp и Szcp, меняются в зависимости от количества и качества введенных добавок. Так для образцов 0–5 с ростом количества введенного НК-Н в ПП Sacp и Szcp, меняются по закону случая. А введение МСКД в ПП (образцы 6–8) незначительно снижает Szcp.

Совместное введение МСКД и НК-Н (образцы 9–11) однозначно увеличивает оба параметра с ростом количества введенных добавок в большей степени, чем каждая по отдельности.

В таблице 4 приведены результаты измерений шероховатости поверхности композиций по линии выступов и впадин.

Таблица 4.

Результаты измерений шероховатости поверхности композиций по базовой линии

Table 4.

Results of surface roughness measurements of the compositions along the baseline

Образец Sample	$Rz_{ср}$, мкм	$Ra_{ср}$, мкм	Rz_{max}, мкм	Rz_{min}, мкм	Ra_{max}, мкм	Ra_{min}, мкм
0	0,512	0,061	0,719	0,356	0,072	0,051
1	0,687	0,093	0,959	0,574	0,113	0,073
2	0,648	0,083	1,030	0,503	0,110	0,062
3	1,899	0,228	1,077	1,009	0,127	0,137
4	0,869	0,106	2,355	1,100	0,123	0,130
5	1,876	0,334	3,378	1,184	0,436	0,234
6	0,600	0,061	0,763	0,101	0,101	0,068
7	0,738	0,097	0,922	0,498	0,115	0,078
8	0,843	0,108	0,938	0,655	0,146	0,089
9	0,762	0,099	0,962	0,590	0,111	0,084
10	1,011	0,156	1,176	0,770	0,187	0,136
11	0,787	0,105	1,133	0,093	0,129	0,093

Тут изменение шероховатости значительно ощутимее. Введение НК-Н в ПП приводит к росту $Rz_{ср}$ и $Ra_{ср}$ с его увеличением (образцы 0–5). Также в пределах повышения дозировки НК-Н до 7,5–10,0% масс. увеличиваются параметры Rz_{max}, Rz_{min}, Ra_{max} и Ra_{min}.

Однозначно растут параметры шероховатости при введении в ПП МСКД (образцы 6–8). Совместное использование НК-Н и МСКД в образцах 9 и 10 также увеличивают шероховатость, а в количествах 5% масс. НК-Н и 5% МСКД это изменение не так заметно.

Изменение структуры поверхности образцов приведено на рисунке 2.

Увеличение количества НК-Н в композиции с ПП приводит к неоднородности материала (Образцы 0, 3, 5). Однако сплошности каучуковой фазы не достигается. МСКД (образцы 7 и 8) распределяется в ПП более равномерно и, основываясь на данных таблиц 3 и 4, шероховатость этих образцов менее выражена. Возможно МСКД, действуя как пластификатор, распределяется в композиции более равномерно, несколько нивелируя шероховатость. Интересно влияние совместного введения МСКД и НК-Н. Композиция кажется более однородной, вероятно, из-за действия МСКД, выполняющего роль пластификатора, облегчая равномерное распределение НК-Н в композиции. Таким образом, введение НК-Н и МСКД в общем случае увеличивает шероховатость композиций на основе ПП, что создает благоприятную ситуацию для биодеградации композиций с их использованием.

Далее методом лежащей капли оценивали гидрофильность композиций с биодеградирующими добавками.

Выявлено, что ПП (образец 0) имеет краевой угол смачивания (θ) 85°, что находится на нижней границе для данного материала, смачиваемость которого может колебаться в пределах 85–105° [21]. С увеличением количества введенного НК-Н θ падает и при НК-Н 15% масс. (образец 5) составляет 66° (рисунок 3, а). Также снижается θ композиции ПП с МСКД. Однако, так как МСКД представляет собой масло с выраженными водоотталкивающими свойствами, то краевой угол смачивания меняется незначительно, а при содержании МСКД 5% масс. краевой угол смачивания становится выше, чем чистого полипропилена 88° против 85° соответственно (рисунок 3, б). ПП со смесью МСКД + НК-Н также гидрофилен (рисунокис. 3, в). При этом существенное изменение θ в сторону увеличения гидрофильности наблюдается у композита, содержащего смесь МСКД и НК-Н в суммарном количестве 10% масс. И величина краевого угла смачивания, то есть гидрофильность композиции, соизмерима с гидрофильностью композита, содержащего НК-Н 10% масс. (образец 4 и 11). Однако, как показали дальнейшие исследования, это приводит к существенному снижению прочностных показателей и гидролитической стабильности. Совместное введение НК-Н и МСКД закономерно увеличивает гидрофильность композита, но в меньшей степени, нежели введение одного НК-Н в том же количестве (образец 11 и 4).

Эти данные также, как и определение шероховатости указывают на то, что исследуемые биодеградирующие добавки способствуют увеличению гидрофильности композиции и, как следствие, потенциально увеличивают их предрасположенность к биодеградации.

Ранее оценивалась склонность к водопоглощению композиций на основе ПП, НК-Н и МСКД [20,22], а также их органолептические показатели. Было установлено, что введение в полипропилен деструктирующих добавок в концентрациях выше 15% масс. для неочищенного натурального каучука и выше 3% масс. для масла семян каучукового дерева, а также для смесей неочищенного натурального каучука с маслом семян каучукового дерева в исследуемых концентрационных пределах незначительно – на один балл ухудшает гигиенические показатели композиций с их использованием. При этом водопоглощение композитов, оцененное в течение 7 суток с использованием исследуемых добавок, незначительно, не более 0,8% масс.

В данной работе было оценено поведение самого полипропилена и его композиций с НК-Н и МСКД после 25 месяцев экспозиции в воде (таблица 5).

Из данных таблицы 5 видно, что с увеличением количества введенного НК-Н (образцы 0–5) происходит существенная потеря массы композита. Кроме того, на внутренней поверхности крышки контейнера для образцов появляется налет от желтого до коричневого цвета, а сами образцы белеют и становятся хрупкими. Введение в ПП МСКД также приводит к потере массы композитов тем больше, чем значительнее количество введенного МСКД. Наибольшая потеря массы наблюдается у композита при совместном введении НК-Н и МСКД и составляет за период экспозиции 71% масс.

Таблица 5.

Потеря массы композитов за 25 месяцев экспозиции в воде

Table 5.

Mass loss of the composites after 25 months of water exposure

Образец Sample	Содержание, % масс. Content, % mass			Потеря массы, % Mass loss	Вид образца и среды View
	ПП	НК-Н	МСКД		
0	100,0	0	0	0	Вода слегка помутнела | The water has become slightly cloudy.
1	99,0	1,0	0	26	Вода мутная с зеленью, образец побелел The water is cloudy with green tint, the sample has turned white.
2	95,0	5,0	0	35	Вода мутная с зеленью, образец побелел The water is cloudy with green tint, the sample has turned white.
3	92,5	7,5	0	38	Вода мутная с зеленью, на крышке коричневый налет The water is cloudy with green tint, the sample has turned white.
4	90,0	10,0	0	52	Вода мутная с зеленью, образец побелел, на крышке коричневый налет The water is cloudy with green tint, the sample has turned white.
5	85,0	15,0	0	58	Вода мутная, образец побелел с желтым налетом, хрупкий The water is cloudy, the sample has turned white with a yellow tint, and is brittle.
6	99,0	0	1,0	8	Вода чистая, крышка с коричневым налётом, образец без изменений The water is clear, the lid has a brown tint, the sample is unchanged.
7	97,0	0	3,0	19	Вода чистая, запах крайне резкий, крышка с коричневым налётом без изменений The water is clear, the odor is extremely strong, the lid has a brown tint, is unchanged.
8	95,0	0	5,0	52	Вода мутная с зеленью, образец побелел The water is cloudy with green tint, the sample has turned white.
9	99,0	0,5	0,5	18	Вода мутная с зеленью, образец без изменений The water is cloudy with green tint, the sample has turned white.
10	95,0	2,5	2,5	41	Вода мутная с зеленью, образец побелел, хрупкий The water is cloudy with green tint, the sample has turned white.
11	90,0	5,0	5,0	71	Вода мутная с наибольшим количеством зелени, образец побелел, хрупкий, сломался, крышка с почти черным налётом The water is cloudy with the most green tint, the sample has turned white, is brittle, and has broken. The lid has a nearly black tint.

Наличие на внутренней поверхности контейнера налета от желтого до черного цвета указывает либо на возникновение продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, либо на выделение в виде налета продуктов разложения компонентов, а помутнение композитов и появление белого налета указывает на выделение нерастворимых фрагментов. При значительном введении биодеструктирующих добавок в ПП появляется зеленый оттенок воды, что также может объясняться ростом количества микроорганизмов. Биодеструкция приводит к снижению прочности композитов (крошатся) и увеличению хрупкости.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение качественного состава воды, в которой экспонировались образцы, налета на внутренней поверхности контейнеров и на самих композитах, а также оценке причин, вызывающих изменение цвета воды.

Заключение

Исследована склонность к биодеградации композитов на основе полипропилена, масла семян каучукового дерева и неочищенного натурального каучука – продукта, выделенного из млечного сока каучуконоса – дерева "Hevea Brasiliensis". Склонность к биодеградации оценивалась по показателям шероховатости поверхности композитов, краевому углу смачивания и водопоглощению.

Выявлено, что неочищенный натуральный каучук и масло семян каучукового дерева индивидуально и в смеси увеличивают шероховатость поверхности композита, гидрофильность и водопоглощение, что характеризует их как биодеградирующие агенты, способные регулировать жизненный цикл композитов на основе полипропилена.

Литература

1 Зенитова Л.А., Янов В.В., Гатауллина Л.И. Биоразлагаемые полимеры // Бутлеровские сообщения. 2024. Т. 9. № 4. С. 120–132. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/24-80-11-120

2 Янов В.В., Зенитова Л.А. Биоразлагаемые полимеры и полимерные композиции. Казань: КНИТУ, 2022. 144 с.

3 Сафаева Д.Р., Ташмухамедова Ш.Б. Влияние шероховатости на качество печати на полимерных пленках // Universum: технические науки. 2024. № 7 (124). doi: 10.32743/UniTech.2024.124.7.17897

4 Волкова К.В., Ситникова В.Е., Сибирцев В.С. и др. Деградируемые композиции на основе поливинилхлорида и бентонита // Химическая промышленность сегодня. 2018. № 1. С. 12–16.

5 Кузьмина Н.С., Прохорова А.А., Портнова С.В., Красных Е.Л. Исследование структуры модифицированного полибутиленсукцината яблочной кислотой и её сложным эфиром // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2022. Т. 64. № 5. С. 343–351. doi: 10.1134/S156009042270052X

6 Суворова А.И., Тюкова И.С., Смирнова Е.А., Тымчишина Н.М. Реологические свойства смесей тройного сополиамида 6/66/610 с хитозаном // Журнал прикладной химии. 2005. Т. 78. № 6. С. 989–992. doi: 10.1007/s11167-005-0429-2

7 Смирнова Е.А., Суворова А.И., Тюкова И.С. Взаимодействие компонентов и гидрофильность смесей сополимера этилена и винилацетата с крахмалом // Физико-химия полимеров: синтез, свойства и применение. 2004. № 10. С. 59–64.

8 Роговина С.З., Алексанян К.В., Владимиров Л.В., Берлин А.А. Биоразлагаемые полимерные материалы на основе полилактида // Химическая физика. 2019. Т. 38. № 9. С. 39–46. doi: 10.1134/S0207401X19090097

9 Дышлюк Л.С., Просеков А.Ю. Исследование кинетики биоразложения, деформационно-прочностных и экотоксикологических свойств, газопроницаемости и водопоглощения антимикробных упаковочных биоразлагаемых пленок на основе природных полисахаридов // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2019. № 2. С. 40–47.

10 Мухиддинов Б.Ф., Истамов Х.Й., Оликулов Ф.Ж. Влияние содержания модифицированного крахмала на водопоглощение биоразлагаемых композитов на основе полиэтилена // Universum: химия и биология. 2025. № 6 (132). doi: 10.32743/UniChem.2025.132.6.20254

11 Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А. и др. Сравнительный анализ физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 4. С. 56–63. doi: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63

12 Мичуров Д.М., Шаркова А.С., Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Исследование смачиваемости и водопоглощения композитов с полимерной фазой полилактида и опилками бука // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 3. С. 121–127.

13 Vasil'ev I.Y., Anan'ev V.V., Sultanova Y.M., Kolpakova V.V. The Influence of the Composition of Polyethylene, Starch, and Monoglyceride Biodegradable Compositions on Their Physicomechanical Properties and Structure // Polymer Science, Series D. 2022. V. 15. № 1. P. 122–127. doi: 10.1134/S1995421222010261

14 Даутова А.Н., Янов В.В., Алексеев Е.И., Зенитова Л.А. Биодеградирующие полимерные композиционные материалы с использованием натурального каучука // Бутлеровские сообщения. 2017. Т. 52. № 10. С. 56. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/17-52-10-56

15 Алексеев Е.И., Янов В.В., Зенитова Л.А., Хайруллин Р.З. Влияние добавок натурального каучука на свойства полиэтилена высокого давления // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 8. С. 20–22.

16 Alekseev E.I., Yanov V.V., Zenitova L.A. Fungal resistance of compositions based on high-pressure polyethylene and natural rubber // Processes of Petrochemistry and Oil Refining. 2021. V. 22. № 3. P. 345–355.

17 Dautova A., Yanov V., Mingaleev N., Zenitova L. Feasibility Study of Biodegradation of Polyamide 6 and Natural Rubber Composite Materials // International Journal of Environmental & Science Education. 2016. V. 11. № 18. P. 12121–12130.

18 Dautova A.N., Yanov V.V., Akhmedyanova R.A. et al. Nature rubber - a biodegradable additive for polymer composites based on glass-fiber-filled polyamide // Processes of Petrochemistry and Oil Refining. 2018. V. 19. № 1. P. 83–93.

19 Алексеев Е.И., Зенитова Л.А. Исследование оценки влияния грибов на композиции на основе полиэтилена высокого давления и натурального каучука // Жить в XXI веке – 2021: сб. тр. конф. Казань, 2021. С. 120–122. doi: 10.12731/978-5-7882-3027-6

20 Янов В.В., Гатауллина Л.И., Зенитова Л.А. Продукты гевеи и полипропилен // Вестник технологического университета. 2024. Т. 27. № 11. С. 56–62. doi: 10.55421/1998-7072_2024_27_11_56

21 Primc G. Hydrophilization of polypropylene by gaseous plasma treatments and hydrophobic recovery // Polymers. 2025. V. 17. № 19. P. 2644. doi: 10.3390/polym17192644

22 Yanov V.V., Gataullina L.I., Zenitova L.A. Polypropylene-based Compositions with Natural Rubber and Rubber Tree Seed Oil // Doklady Chemistry. 2025. V. 520. Part 2. P. 45–49. doi: 10.1134/S0012500825600993

References

1 Zenitova L.A., Yanov V.V., Gataullina L.I. Biodegradable Polymers. Butlerov Communications. 2024. vol. 9. no. 4. pp. 120–132. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/24-80-11-120 (in Russian).

2 Yanov V.V., Zenitova L.A. Biodegradable Polymers and Polymer Compositions. Kazan: KNRTU, 2022. 144 p. (in Russian).

3 Safaeva D.R., Tashmukhamedova Sh.B. Influence of Roughness on Printing Quality on Polymer Films. Universum: Technical Sciences. 2024. no. 7 (124). doi: 10.32743/UniTech.2024.124.7.17897 (in Russian).

4 Volkova K.V., Sitnikova V.E., Sibirtsev V.S. et al. Degradable Compositions Based on Polyvinyl Chloride and Bentonite. Chemical Industry Today. 2018. no. 1. pp. 12–16. (in Russian).

5 Kuzmina N.S., Prokhorova A.A., Portnova S.V., Krasnykh E.L. Study of the Structure of Polybutylene Succinate Modified with Malic Acid and Its Ester. Polymer Science, Series B. 2022. vol. 64. no. 5. pp. 343–351. doi: 10.1134/S156009042270052X (in Russian).

6 Suvorova A.I., Tyukova I.S., Smirnova E.A., Tymchishina N.M. Rheological Properties of Blends of Terpolyamide 6/66/610 with Chitosan. Russian Journal of Applied Chemistry. 2005. vol. 78. no. 6. pp. 989–992. doi: 10.1007/s11167-005-0429-2 (in Russian).

7 Smirnova E.A., Suvorova A.I., Tyukova I.S. Interaction of Components and Hydrophilicity of Blends of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer with Starch. Physical Chemistry of Polymers: Synthesis, Properties and Application. 2004. no. 10. pp. 59–64. (in Russian).

8 Rogovina S.Z., Aleksanyan K.V., Vladimirov L.V., Berlin A.A. Biodegradable Polymer Materials Based on Polylactide. Russian Journal of Physical Chemistry B. 2019. vol. 38. no. 9. pp. 39–46. doi: 10.1134/S0207401X19090097 (in Russian).

9 Dyshlyuk L.S., Prosekov A.Yu. Study of the Kinetics of Biodegradation, Deformation-Strength and Ecotoxicological Properties, Gas Permeability and Water Absorption of Antimicrobial Packaging Biodegradable Films Based on Natural Polysaccharides. Bulletin of VSU. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy. 2019. no. 2. pp. 40–47. (in Russian).

10 Mukhiddinov B.F., Istamov Kh.Y., Olikulov F.Zh. Influence of Modified Starch Content on Water Absorption of Biodegradable Composites Based on Polyethylene. Universum: Chemistry and Biology. 2025. no. 6 (132). doi: 10.32743/UniChem.2025.132.6.20254 (in Russian).

11 Ershova O.V., Medyanik N.L., Mishurina O.A. et al. Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Biodegradable and Synthetic Polymers. Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2021. vol. 19. no. 4. pp. 56–63. doi: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63 (in Russian).

12 Michurov D.M., Sharkova A.S., Shkuro A.E., Krivonogov P.S. Study of Wettability and Water Absorption of Composites with Polylactide Polymer Phase and Beech Sawdust. Woodworking Industry. 2023. no. 3. pp. 121–127. (in Russian).

13 Vasil'ev I.Y., Anan'ev V.V., Sultanova Y.M., Kolpakova V.V. The Influence of the Composition of Polyethylene, Starch, and Monoglyceride Biodegradable Compositions on Their Physicomechanical Properties and Structure. Polymer Science, Series D. 2022. vol. 15. no. 1. pp. 122–127. doi: 10.1134/S1995421222010261.

14 Dautova A.N., Yanov V.V., Alekseev E.I., Zenitova L.A. Biodegradable Polymer Composite Materials Using Natural Rubber. Butlerov Communications. 2017. vol. 52. no. 10. p. 56. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/17-52-10-56 (in Russian).

15 Alekseev E.I., Yanov V.V., Zenitova L.A., Khairullin R.Z. Influence of Natural Rubber Additives on the Properties of High-Pressure Polyethylene. Bulletin of Technological University. 2017. vol. 20. no. 8. pp. 20–22. (in Russian).

16 Alekseev E.I., Yanov V.V., Zenitova L.A. Fungal resistance of compositions based on high-pressure polyethylene and natural rubber. Processes of Petrochemistry and Oil Refining. 2021. vol. 22. no. 3. pp. 345–355.

17 Dautova A., Yanov V., Mingaleev N., Zenitova L. Feasibility Study of Biodegradation of Polyamide 6 and Natural Rubber Composite Materials. International Journal of Environmental & Science Education. 2016. vol. 11. no. 18. pp. 12121–12130.

18 Dautova A.N., Yanov V.V., Akhmedyanova R.A. et al. Nature rubber - a biodegradable additive for polymer composites based on glass-fiber-filled polyamide. Processes of Petrochemistry and Oil Refining. 2018. vol. 19. no. 1. pp. 83–93.

19 Alekseev E.I., Zenitova L.A. Study of the Assessment of the Influence of Fungi on Compositions Based on High-Pressure Polyethylene and Natural Rubber. In: Live in the 21st Century – 2021: Collection of Conference Proceedings. Kazan, 2021. pp. 120–122. doi: 10.12731/978-5-7882-3027-6 (in Russian).

20 Yanov V.V., Gataullina L.I., Zenitova L.A. Hevea Products and Polypropylene. Bulletin of Technological University. 2024. vol. 27. no. 11. pp. 56–62. doi: 10.55421/1998-7072_2024_27_11_56 (in Russian).

21 Primc G. Hydrophilization of polypropylene by gaseous plasma treatments and hydrophobic recovery. Polymers. 2025. vol. 17. no. 19. article 2644. doi: 10.3390/polym17192644.

22 Yanov V.V., Gataullina L.I., Zenitova L.A. Polypropylene-based Compositions with Natural Rubber and Rubber Tree Seed Oil. Doklady Chemistry. 2025. vol. 520. part 2. pp. 45–49. doi: 10.1134/S0012500825600993.

Сведения об авторах

Владислав В. Янов к.т.н., доцент, кафедра технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д.68, Казань, 420015, Россия, vladyanoff@ya.ru
https://orcid.org/0009-0003-1424-5754

Лина И. Гатауллина студент, кафедра технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д.68, Казань, 420015, Россия, raudeeva@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-5488-4905

Ладимира В. Носова студент, кафедра технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д.68, Казань, 420015, Россия, ladimira.nosova@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-9503-4730

Любовь А. Зенитова д.т.н., профессор, кафедра технологии синтетического каучука, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, д.68, Казань, 420015, Россия, liubov_zenitova@mail.ru
https://orcid.org/0009-0009-0651-695X

Information about authors

Vladislav V. Yanov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, department of synthetic rubber technology, Kazan National Research Technological University, Karl Marx St., 68, Kazan, 420015, Russia, vladyanoff@ya.ru
https://orcid.org/0009-0003-1424-5754

Lina I. Gataullina student, department of synthetic rubber technology, Kazan National Research Technological University, Karl Marx St., 68, Kazan, 420015, Russia, raudeeva@mail.ru
https://orcid.org/0009-0003-5488-4905

Ladimira V. Nosova student, department of synthetic rubber technology, Kazan National Research Technological University, Karl Marx St., 68, Kazan, 420015, Russia, ladimira.nosova@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-9503-4730

Liubov A. Zenitova Dr. Sci. (Engin.), professor, department of synthetic rubber technology, Kazan National Research Technological University, Karl Marx St., 68, Kazan, 420015, Russia, liubov_zenitova@mail.ru
https://orcid.org/0009-0009-0651-695X

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/12/2025 **После редакции** 28/12/2025 **Принята в печать** 18/01/2026

Received 21/12/2025 **Accepted in revised** 28/12/2025 **Accepted** 18/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-299-305 Оригинальная статья/Research article
УДК 678.742.2 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Методика синтеза люминофора – оксикарбида кремния

Иван Энрике Гарсия Балдерас [1] ivan.garciabal@alumno.buap.mx 0000-0003-1004-9054
Вячеслав Ю. Долгоносов [1] dolgonosov@inbox.ru 0009-0000-9962-6211
Анастасия Ю. Жалыбина [1] nastya.zhalybina@ya.ru 0009-0004-3667-8275
Виктор А. Род [1] vikdor.andreevich@mail.ru 0009-0008-8333-4749
Александр Н. Утехин [1] alutekhin@ya.ru 0009-0003-1681-8579
Валерий Ю. Конюхов [2] volkon_1@mail.ru 0000-0002-6128-9413

1 Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия
2 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31 г. Москва, 115409, Россия

Аннотация. Настоящее исследование посвящено разработке лабораторной методике синтеза люминофора - оксикарбида кремния путем химического осаждения из газовой фазы с использованием горячей нити и изучению свойств люминофора в форме тонких пленок и дисперсий. Пленки оксикарбида кремния в настоящем исследовании охарактеризованы с использованием передовых аналитических методов. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) проводилась на микроскопе Auriga 3916-FESEM, работающем при напряжении 1 кВ, что обеспечивало высокое разрешение для получения изображений морфологии поверхности и структурных особенностей. Систематическое варьирование количества мезопористых гранул кремнезема MCM-41 (масса гранул 5, 10 и 15 г) позволяет провести детальный анализ влияния соотношения прекурсоров на свойства тонких пленок. Энергодисперсионный рентгеновский анализ пленок, полученных из разных количеств тетраэтоксисилана (TEOS) и мезопористых гранул кремнезема MCM-41 подтверждает наличие углерода, кислорода и кремния, что соответствует использованию дозированных количеств тетраэтоксисилан (TEOS) и кремнезема (MCM-41). Сканирующий электронный микроскопический анализ выявляет различные морфологии в тонких пленках оксикарбида кремния: при использовании только тетраэтоксисилана наблюдается поверхность с компактными агрегатами, гетерогенно распределенными, в то время как введение как мезопористых гранул кремнезема TEOS, так и мезопористых гранул кремнезема MCM-41 приводит к формированию пористых кластеров. Установлена усиленная фотолюминесценция в пленках, содержащих кремнезем MCM-41. Исследование раскрывает синергетическое взаимодействие между TEOS и мезопористыми гранулами кремнезема MCM-41, предоставляя ценные сведения для оптимизации тонких пленок оксикарбида кремния для множества применений – от микроэлектроники до оптоэлектроники.

Ключевые слова: оксикарбид кремния, пористые кластеры, тетраэтоксисилан, кремнезем, фотолюминесценция, сканирующая электронная микроскопия.

Method for synthesizing phosphor – silicon oxycarbide

Ivan Enrique Garcia Balderas [1] ivan.garciabal@alumno.buap.mx 0000-0003-1004-9054
Vyacheslav K. Dolgonosov [1] dolgonosov@inbox.ru 0009-0000-9962-6211
Anastasia Yu. Zhalybina [1] nastya.zhalybina@ya.ru 0009-0004-3667-8275
Viktor A. Rod [1] vikdor.andreevich@mail.ru 0009-0008-8333-4749
Aleksandr N. Utekhin [1] alutekhin@ya.ru 0009-0003-1681-8579
Valery Yu. Konyukhov [2] volkon_1@mail.ru 0000-0002-6128-9413

1 Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russia
2 National Research Nuclear University MEPHI, Kashirskoe shosse, 31 Moscow, 115409, Russia

Abstract. This research is development of a laboratory-scale method for synthesizing silicon oxycarbide phosphor via hot-filament chemical vapor deposition and the characterization of the phosphor's properties in the form of thin films and dispersions. Silicon oxycarbide films in this study were characterized using advanced analytical techniques. Scanning electron microscopy (SEM) was performed on an Auriga 3916-FESEM microscope operating at 1 kV, providing high resolution for imaging surface morphology and structural features. Systematic variation in the amount of MCM-41 mesoporous silica granules (granule weights of 5, 10, and 15 g) allows for a detailed analysis of the effect of precursor ratios on the properties of thin films. Energy-dispersive X-ray diffraction analysis of films prepared from varying amounts of tetraethoxysilane (TEOS) and mesoporous silica MCM-41 granules confirms the presence of carbon, oxygen, and silicon, consistent with the use of controlled amounts of tetraethoxysilane (TEOS) and silica (MCM-41). Scanning electron microscopy reveals distinct morphologies in thin silicon oxycarbide films: using only tetraethoxysilane, a surface with compact, heterogeneously distributed aggregates is observed, while the introduction of both mesoporous TEOS and mesoporous silica MCM-41 granules leads to the formation of porous clusters. Enhanced photoluminescence was observed in films containing MCM-41 silica. The study reveals the synergistic interaction between TEOS and mesoporous silica beads MCM-41, providing valuable insights for the optimization of silicon oxycarbide thin films for a variety of applications ranging from microelectronics to optoelectronics.

Keywords: silicon oxycarbide, porous clusters, tetraethoxysilane, silica, photoluminescence, scanning electron microscopy.

Для цитирования
Гарсия Балдерас И., Долгоносов В.Ю., Жалыбина А.Ю., Род В.А., Утехин А.Н., Конюхов В.Ю. Методика синтеза люминофора – оксикарбида кремния // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 299–305. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-299-305

For citation
Garcia Balderas I., Dolgonosov V.Yu., Zhalybina A.Yu., Rod V.A., Utehin A.N., Konyukhov V.Yu. Method for synthesizing phosphor – silicon oxycarbide. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 299–305. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-299-305

© 2026, Гарсия Балдерас И. и др. / Garcia Balderas I. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Оксикарбид кремния (SiOC) включающий кремний, кислород и углерод является неорганическим люминофором, с универсальными свойствами и многочисленными применениями в электронике, оптике и сенсорике [1–3]. Его отличает сочетание механической прочности, термической стабильности и оптических свойств [4–6]. Тонкие пленки оксикарбида кремния, синтезированные методом химического осаждения из газовой фазы с использованием т. н. горячей нити, представляют собой перспективный материал для последующего измельчения и использования в производстве полимерных композитов светотехнического назначения [10–12]. В синтезе пленок оксикарбида кремния применяется тетраэтоксисилан (TEOS) в сочетании с мезопористыми гранулами кремнезема (MCM-41) [15, 16]. Цель экспериментального исследования – изучение синергетического взоимодействия MCM-41 и TEOS в процессе синтеза тонких пленок оксикарбида кремния [7]. Поставленая цель достигнута путем систематического исследования соотношения этих прекурсоров: MCM-41 и TEOS с оценкой их сочетанного влияния на свойства получаемых тонких пленок SiOC [9].

Настоящее исследование предоставляет описание взаимодействия между TEOS и MCM-41 при осаждении тонких пленок оксикарбида кремния. Полученные результаты имеют значение для оптимизации процесса осаждения, улучшения свойств тонких пленок и открытия новых возможностей для различных применений в технологиях передовых материалов и устройств. Эти выводы способствуют оптимизации тонких пленок оксикарбида кремния для разнообразных технологических применений – от микроэлектроники до оптоэлектроники.

Материалы и методы

Тонкие пленки оксикарбида кремния были синтезированы методом химического осаждения из газовой фазы с использованием горячей нити (HFCVD) с применением двух различных конфигураций реагентов: a) исключительно тетраэтоксисилан (TEOS) и b) комбинация TEOS и мезопористых гранул кремнезема MCM-41. Количество MCM-41, введенное в процесс осаждения, варьировалось в трех различных концентрациях. Процесс осаждения проводился в вакуумной камере при базовом давлении 14 кПа. Тонкие пленки осаждались на подложки из p-типа кремния толщиной 279 ± 20 мкм и удельным сопротивлением от 1 до 10 Ом×см [13,14].

Для осаждения в трехгорлую колбу, один патрубок которой соединен с баллоном водорода высокой чистоты помещали 25 мл TEOS. Газообразный водород проходил через колбу, барбатируясь сквозь жидкий TEOS. Полученная смесь паров TEOS и водорода – поступала в реакционную камеру с нагретой вольфрамовой нитью (катализатор). Температура нити накаливания – 1800 °C. Схема реакционной камеры представлена на рис. 1. В газовой фазе молекулы TEOS подвергались термодеструкции на вольфрамовой нити, что в присутствии водорода приводило к образованию частиц оксида кремния. Размещённые на расстоянии 4 мм от нити гранулы MCM-41 подвергались воздействию свободных атомов водорода и способствовали повышеннию содержания SiOx в химическом составе полученных пленок оксикарбида кремния (SiOC).

Пленки измельчались в шаровой мельнице с получением неоднородной дисперсии (рисунок 2).

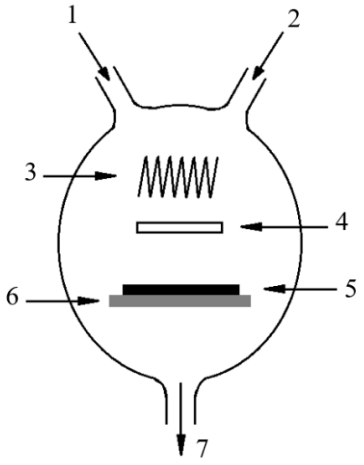


Рисунок 1. Схема компонентов внутри реакционной камеры системы HFCVD: 1 – подача водорода, 2 – подача тетраэтоксисилана, 3 – вольфрамовая нить, 4 – гранулы мезопористого кремнезема (MCM-41), 5 – подложка, 6 – основание подложки, 7 – выход газа

Figure 1. Diagram of the components inside the reaction chamber of the HFCVD system: 1 – hydrogen input, 2 – tetraethyl orthosilicate (TEOS) input, 3 – filament, 4 – mesoporous silica (MCM-41) granules, 5 – substrate, 6 – substrate holder, 7 – gases output

Материалы и методы

Исследования пленок и дисперсий оксикарбида кремния проводили с помощью следующих методов. Морфологию полученных поверхностей и их структурные особенности изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Auriga 3916-FESEM, работающем при напряжении 1 кВ. Это обеспечивало высокое разрешение полученных изображений. Спектры энергодисперсионного рентгеновского анализа (ЭДР) для элементного

анализа получали на том же микроскопе Auriga 3916-FESEM, но с ускоряющим напряжением в интервале 1–3 кэВ. Оптические свойства поверхностей изучали на флуоресцентном спектрофотометре Fluoromax-3, оснащенном ксеноновой лампой мощностью 150 Вт и фотоумножителем R928P в качестве детектора сигнала. Анализ проводился при 20 °C на волне возбуждения 330 нм с фильтром 370 нм.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 представлены энергодисперсионные рентгеновские спектры (EDX) тонких пленок оксикарбида кремния, синтезированных из чистого TEOS (1) и его комбинации с 15 г. MCM-41. Установленный элементный состав пленок: углерод (C), кислород (O) и кремний (Si) подтверждает образование искомого оксикарбида кремния из приведенных прекурсоров.

Наличие углерода в пленках обусловлено его содержанием в кремнийорганическом TEOS. В ходе реакции этоксигруппы (OC_2H_5) [17], входящие в состав TEOS, разлагаются и формируют Si-O-C – цепи в пленках SiOC [10].

Наличие кислорода в пленках обусловлено его содержанием как в молекулах TEOS, так и в мезопористых гранулах кремнезема. Химические взаимодействия, происходящие в процессе HFCVD, приводят к образованию в пленках цепочек Si-O-Si и Si-O-C и вхождению кислорода в состав SiOC. Существование указанных связей отражает ключевую роль кислорода в формировании химической структуры тонких пленок оксикарбида кремния.

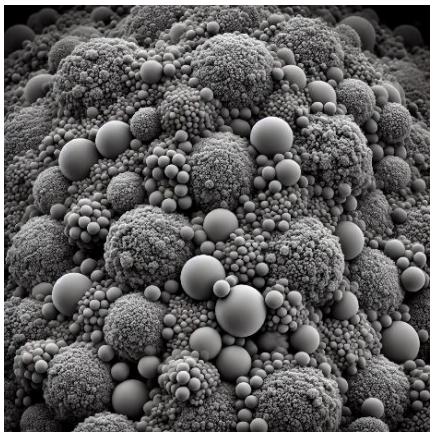


Рисунок 2. СЭМ изображение дисперсии оксикарбида кремния (SiOC)

Figure 2. Silicon oxycarbide dispersion (SiOC)

На рисунке 2 представлены растровые электронные микрофотографии описанных выше пленок SiOC, полученные с помощью полевого эмиссионного электронного микроскопа (ПЭ-СЭМ).

Из фотографий видно, что пленки сформированы из компактных агломератов оксикарбида кремния, неравномерно распределенных по поверхности. Образование агломератов

является следствием взаимодействия TEOS с горячей нитью вольфрама при температуре 1800 °C. В ходе этого взаимодействия возникают реакционноспособные частицы, которые конденсируются на поверхности подложки, образуя агломераты оксикарбида кремния

Компактность и гетерогенное распределение агрегатов обусловлены вариациями скоростей зародышеобразования и роста в процессе осаждения. Локальная концентрация молекул TEOS на поверхности подложки, зависящая от таких факторов, как температура, давление и скорости газового потока, приводит к неоднородному зародышеобразованию и последующему росту агрегатов оксикарбида кремния.

Кроме того, взаимодействие между молекулами TEOS и поверхностью подложки, а также газофазные реакции в процессе химического осаждения из паров, способствуют наблюдаемой морфологии поверхности. Вариации в адсорбции прекурсоров, поверхностной диффузии и кинетике реакций приводят к образованию агломератов различного размера и распределения по подложке.

Рисунок 4(a1) представляет увеличенное изображение рисунка 4(a) с увеличением 50,00 KX, подчеркивающее детали. Этот усиленный вид позволяет наблюдать микроструктуры, неровности поверхности и возможные вариации толщины тонких пленок. Кроме того, он обеспечивает более детальное изучение морфологии поверхности и расположения кластеров в тонкой пленке оксикарбида кремния. Неравномерное распределение компактных агрегатов, происходящее из продуктов разложения TEOS, способствует формированию наблюдаемой поверхности.

На рисунке 4(b) показано появление характерных кластеров в матрице тонкой пленки оксикарбида кремния, обусловленное совместным использованием тетраэтоксисилана и MCM-41 в качестве реагентов в процессе химического осаждения из газовой фазы с использованием горячей нити. Кластеры обладают пористой структурой – характерной особенностью, обусловленной присутствием MCM-41 в процессе осаждения. Включение мезопористых гранул кремнезема приводит к образованию изолированных групп на поверхности пленки, что и определяет наблюдаемую морфологию пористых кластеров [11].

Пористые кластеры возникают из-за пространственного расположения мезопористых гранул кремнезема, вызывающего

неравномерное распределение на подложке. В результате тонкая пленка оксикарбида кремния демонстрирует уникальную морфологию кластеров
с пористой структурой, увеличивающую общую площадь поверхности. Эта структурная вариация способна влиять на механические, оптические и электронные свойства пленки [7,8].

Рисунок 4(b1) представляет усиленное изображение рисунка 4(b) с увеличением 50,00 KX, фокусируясь на деталях кластеров в тонкой пленке SiOC. Эта микрофотография подчеркивает наличие пористых агрегатов, прикрепленных к поверхности более крупных кластеров.

Наблюдение пористых агрегатов на рисунке 3(b1) побуждает рассмотреть их потенциальное влияние на оптические свойства тонких пленок SiOC. Пористая природа этих агрегатов способствует увеличению площади поверхности, потенциально облегчая более интенсивное взаимодействие с падающим светом. Сеть пор внутри агрегатов служит местами локализации заряда, вводя вариации в электронную структуру, которые могут влиять на характеристики излучения тонкой пленки SiOC [19,20].

Наличие пор в агрегатах вводит дополнительную сложность в электронную среду, потенциально приводя к эффектам локального квантового ограничения. Эти эффекты, возникающие из пространственного ограничения носителей заряда в наноразмерных структурах, могут существенно влиять на зонную структуру и, следовательно, на длины волн излучения.

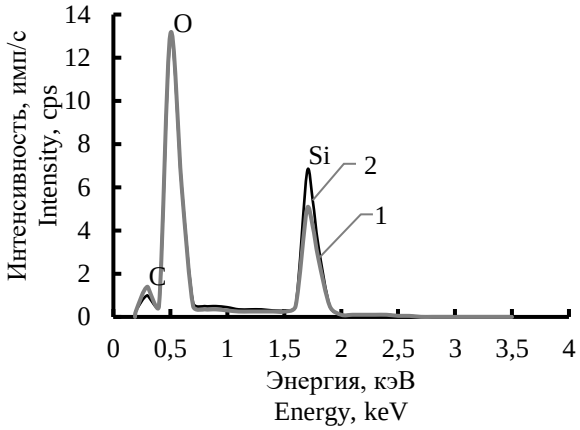


Рисунок 3. ЭДС-спектры тонких пленок оксикарбида кремния, полученных с использованием: 1 – только TEOS, 2 – TEOS и MCM-41 в качестве реагентов

Figure 3. EDS spectra of silicon oxaycarbide thin films using: 1 – only TEOS, 2 – TEOS and MCM-41 as reactants

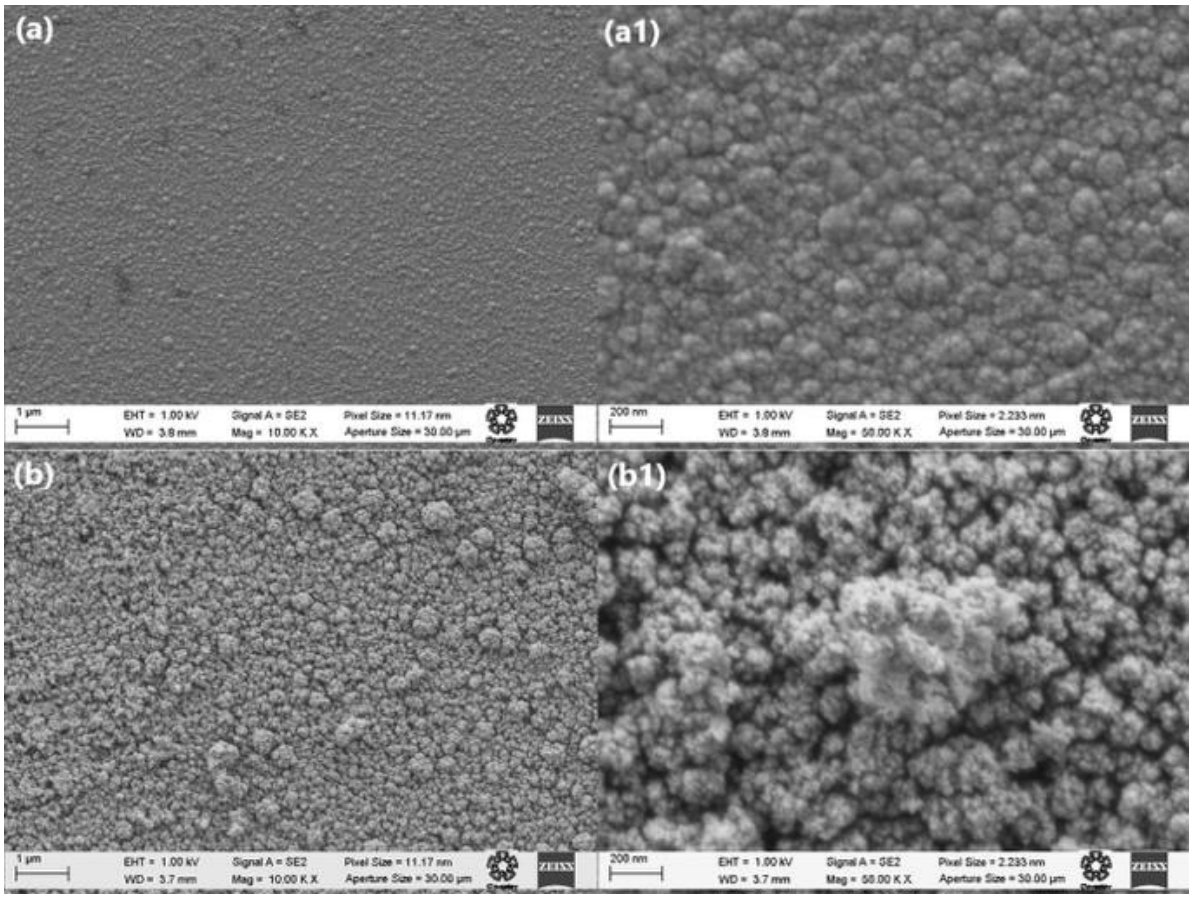


Рисунок 4. ПЭ-СЭМ микрофотографии тонких пленок оксикарбида кремния, полученных методом HFCVD с использованием a) только TEOS и b) TEOS и MCM-41 в качестве реагентов

Figure 4. FE-SEM micrographs of silicon oxycarbide thin films prepared by HFCVD suing a) only TEOS and b) TEOS and MCM-41 as reactants

На рисунке 5 представлены спектры фотолюминесценции тонких пленок SiOC, синтезированных методом химического осаждения из газовой фазы с использованием горячей нити. Были использованы два различных подхода к синтезу: (1) применение только тетраэтоксисилана (TEOS) и (2–4) использование TEOS в комбинации с различным количеством MCM-41 – 5, 10 и 15 г. – в качестве прекурсоров. Для устранения влияния толщины пленки на анализ интенсивность каждого спектра фотолюминесценции была нормирована путем деления абсолютной интенсивности PL на соответствующую толщину пленки.

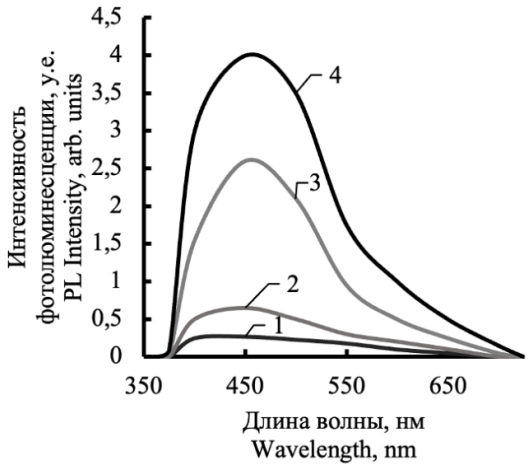


Рисунок 5. Спектры фотолюминесценции тонких пленок оксикарбида кремния, полученных методом HFCVD с использованием ТЭОС и MCM-41 в качестве реагентов: 1 – только ТОЭС, 2 – ТЭОС и 5 г MCM-41, 3 – ТЭОС и 10 г. MCM-41, 4 – ТЭОС и 15 г. MCM-41

Figure 5. Photoluminescence spectra of silicon oxycarbide thin films prepared by HFCVD using TEOS and MCM-41 as reactants: 1 – only TEOS, 2 – TEOS and 5 g MCM-41, 3 – TEOS and 10 g MCM-41, 4 – TEOS and 15 g MCM-41

Основная особенность спектров – широкая полоса фотолюминесценции в диапазоне от 375 до 725 нм. Примечательно, что образец, приготовленный с наибольшим содержанием MCM-41, продемонстрировал наивысшую интенсивность фотолюминесценции среди исследованных условий. Этот пик в диапазоне 375–725 нм обусловлен эффектами квантового ограничения, возникающими при радиационной рекомбинации фото возбужденных носителей в состояниях запрещенной зоны, связанных с группами связей C-Si/Si-O-C [21,22].

В соответствии с полученными результатами наблюдается прямая корреляция между интегрированной интенсивностью флуоресценции и плотностью связей Si-O. Увеличение интенсивности флуоресценции тонких пленок SiOC можно объяснить наличием более высокой плотности частиц SiOx [23]. Это явление обусловлено использованием мезопористых гранул кремнезема и TEOS в качестве реагентов в процессе HFCVD [18]. По сути, включение MCM-41 в смесь прекурсоров повышает плотность связей Si-O, что приводит к более выраженным эффектам квантового ограничения и, следовательно, к усилению фотолюминесценции в синтезированных тонких пленках SiOC.

Заключение

Согласно результатам ПЭ-СЭМ, контролируемое осаждение TEOS в газовой фазе привело к образованию поверхности с компактными агрегатами, неравномерно распределенными. Совместное использование TEOS и MCM-41 привело к формированию пористых кластеров, увеличивающих общую площадь поверхности и вносящих потенциальные вариации в оптические свойства.

Установленный с помощью энергодисперсионного рентгеновского спектра элементный состав полученных пленок: углерод (C), кислород (O) и кремний (Si) подтвердил образование искомого оксикарбида кремния из приведенных прекурсоров.

Спектры фотолюминесценции продемонстрировали широкую полосу излучения от 375 до 725 нм, причем образец с наибольшим содержанием MCM-41 показал наивысшую интенсивность фотолюминесценции.

Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию взаимодействия между TEOS и MCM-41 при синтезе тонких пленок оксикарбида кремния. Итоги исследования имеют значение для оптимизации процесса осаждения, настройки свойств тонких пленок и исследования новых возможностей применения в технологиях передовых материалов и устройств. Данное исследование открывает новые перспективы для дальнейших разработок в разнообразных технологических приложениях – от микроэлектроники до оптоэлектроники.

Литература

1 Colombo P., Hellmann J.R., Shelleman D.L. Mechanical Properties of Silicon Oxycarbide Ceramic Foams // Journal of the American Ceramic Society. 2001. V. 84. № 10. P. 2245–2251. doi: 10.1111/j.1151-2916.2001.tb00996.x

2 Ivanova Y.Y., Vueva Y.E. Silicon Oxycarbide Glasses from Gel Hybrid Structures // Advanced Materials Research. 2008. V. 39–40. P. 77–80. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.39-40.77

3 Renlund G.M., Prochazka S., Doremus R.H. Silicon oxycarbide glasses: Part II. Structure and properties // Journal of Materials Research. 1991. V. 6. № 12. P. 2723–2734. doi: 10.1557/jmr.1991.2723

4 Liao N., Zheng B., Zhou H., Xue W. Effect of carbon content on the structure and electronic properties of silicon oxycarbide anodes for lithium-ion batteries: a first-principles study // Journal of Materials Chemistry A. 2015. V. 3. № 9. P. 5067–5071. doi: 10.1039/C4TA06932C

5 Liao N., Zhou H., Zheng B., Xue W. Silicon Oxycarbide-Derived Carbon as Potential NO2 Gas Sensor: A First Principles' Study // IEEE Electron Device Letters. 2018. V. 39. № 11. P. 1760–1763. doi: 10.1109/LED.2018.2869158

6 Sorarù G.D., Dallapiccola E., D'Andrea G. Mechanical Characterization of Sol–Gel-Derived Silicon Oxycarbide Glasses // Journal of the American Ceramic Society. 1996. V. 79. № 8. P. 2074–2080. doi: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb08939.x

7 Yu X., Yin L., Lu H. et al. Third-order optical nonlinearity in silicon oxycarbide films // Optical Materials. 2020. V. 104. P. 109945. doi: 10.1016/j.optmat.2020.109945

8 Bois L., Maquet J., Babonneau F., Bahloul D. Structural Characterization of Sol-Gel Derived Oxycarbide Glasses. 2. Study of the Thermal Stability of the Silicon Oxycarbide Phase // Chemistry of Materials. 1995. V. 7. № 5. P. 975–981. doi: 10.1021/cm00053a025

9 Miyazaki H. Structure and Optical Properties of Silicon Oxycarbide Films Deposited by Reactive RF Magnetron Sputtering Using a SiC Target // Japanese Journal of Applied Physics. 2008. V. 47. № 11R. P. 8287. doi: 10.1143/JJAP.47.8287

10 Mazo M.A., Nistal A., Caballero A.C. et al. Influence of processing conditions in TEOS/PDMS derived silicon oxycarbide materials. Part 1: Microstructure and properties // Journal of the European Ceramic Society. 2013. V. 33. № 6. P. 1195–1205. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.11.022

11 Qin J., Li B. Synthesis, Characterization and Catalytic Performance of Well-ordered Crystalline Heteroatom Mesoporous MCM-41. Preprints. 2016. doi: 10.20944/preprints201612.0094.v1

12 Deshpande S.V., Dupuie J.L., Gulari E. Hot filament assisted deposition of silicon nitride thin films // Applied Physics Letters. 1992. V. 61. № 12. P. 1420–1422. doi: 10.1063/1.107557

13 Itano M., Kezuka T. Particle Adhesion and Removal on Wafer Surfaces in RCA Cleaning // Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers. 1998. P. 115–136. doi: 10.1007/978-3-662-03535-1_10

14 Hattori T. Trends in Wafer Cleaning Technology // Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers. 1998. P. 437–450. doi: 10.1007/978-3-662-03535-1_32

15 Bruhanova Y.A., Menshakov A.I., Skorynina P.A. Synthesis of SiAlCO Coatings by Thermal Anodic Evaporation of Al and Decomposition of Tetraethoxysilane in an Arc Discharge with a Sectional Anode // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2024. V. 18. Suppl. 1. P. S100–S105. doi: 10.1134/S1027451024701500

16 Zhao X.S., Lu G.Q., Hu X. Characterization of the structural and surface properties of chemically modified MCM-41 material // Microporous and Mesoporous Materials. 2000. V. 41. № 1–3. P. 37–47. doi: 10.1016/S1387-1811(00)00262-6

17 Kusuda Y., Asai Y., Miyashita T., Nishinaka H. Plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiO2 films at 400 kHz and 100°C using tetraethyl orthosilicate with oxygen and SiH4 with nitrous oxide // Japanese Journal of Applied Physics. 2025. V. 64. № 4. P. 04SP48. doi: 10.35848/1347-4065/adb989

18 Wang Z., Zhao Q., Wang D., Cui C. Synthesis and characterization of ordered mesoporous MCM-41 from natural chlorite and its application in methylene blue adsorption // Clays and Clay Minerals. 2021. V. 69. № 2. P. 217–231. doi: 10.1007/s42860-021-00123-5

19 Marchewka J., Jeleń P., Rutkowska I. et al. Chemical structure and microstructure characterization of ladder-like silsesquioxanes derived porous silicon oxycarbide materials // Materials. 2021. V. 14. № 6. P. 1340. doi: 10.3390/ma14061340

20 Gongalsky M.B., Tsurikova U.Y.A., Gonchar K.A. et al. Quantum-confinement effect in silicon nanocrystals during their dissolution in model biological fluids // Semiconductors. 2021. V. 55. № 1. P. 61–65. doi: 10.1134/S1063782621010067

21 Lu Z.H., Lockwood D.J., Baribeau J.M. Quantum confinement and light emission in SiO2/Si superlattices // Nature. 1995. V. 378. № 6554. P. 258–260. doi: 10.1038/378258a0

22 Hansda S., Sarkar D., Kundu S. et al. Structural and optical properties of silicon oxycarbide thin films using silane based precursors via sol-gel process // Thin Solid Films. 2024. V. 791. P. 140226. doi: 10.1016/j.tsf.2024.140226

23 Ramazanov M.A., Shirinova H.A., Nuriyeva S.G. et al. Structure and optic properties of the nanocomposites based on polypropylene and amorphous silica nanoparticles // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2023. V. 36. № 4. P. 1762–1774. doi: 10.1177/08927057211064222

References

1 Colombo P., Hellmann J.R., Shelleman D.L. Mechanical Properties of Silicon Oxycarbide Ceramic Foams. Journal of the American Ceramic Society. 2001. vol. 84. no. 10. pp. 2245–2251. doi: 10.1111/j.1151-2916.2001.tb00996.x.

2 Ivanova Y.Y., Vueva Y.E. Silicon Oxycarbide Glasses from Gel Hybrid Structures. Advanced Materials Research. 2008. vol. 39–40. pp. 77–80. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.39-40.77.

3 Renlund G.M., Prochazka S., Doremus R.H. Silicon oxycarbide glasses: Part II. Structure and properties. Journal of Materials Research. 1991. vol. 6. no. 12. pp. 2723–2734. doi: 10.1557/jmr.1991.2723.

4 Liao N., Zheng B., Zhou H., Xue W. Effect of carbon content on the structure and electronic properties of silicon oxycarbide anodes for lithium-ion batteries: a first-principles study. Journal of Materials Chemistry A. 2015. vol. 3. no. 9. pp. 5067–5071. doi: 10.1039/C4TA06932C.

5 Liao N., Zhou H., Zheng B., Xue W. Silicon Oxycarbide-Derived Carbon as Potential NO2 Gas Sensor: A First Principles' Study. IEEE Electron Device Letters. 2018. vol. 39. no. 11. pp. 1760–1763. doi: 10.1109/LED.2018.2869158.

6 Sorarù G.D., Dallapiccola E., D'Andrea G. Mechanical Characterization of Sol–Gel-Derived Silicon Oxycarbide Glasses. Journal of the American Ceramic Society. 1996. vol. 79. no. 8. pp. 2074–2080. doi: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb08939.x.

7 Yu X., Yin L., Lu H. et al. Third-order optical nonlinearity in silicon oxycarbide films. Optical Materials. 2020. vol. 104. article 109945. doi: 10.1016/j.optmat.2020.109945.

8 Bois L., Maquet J., Babonneau F., Bahloul D. Structural Characterization of Sol-Gel Derived Oxycarbide Glasses. 2. Study of the Thermal Stability of the Silicon Oxycarbide Phase. Chemistry of Materials. 1995. vol. 7. no. 5. pp. 975–981. doi: 10.1021/cm00053a025.

9 Miyazaki H. Structure and Optical Properties of Silicon Oxycarbide Films Deposited by Reactive RF Magnetron Sputtering Using a SiC Target. Japanese Journal of Applied Physics. 2008. vol. 47. no. 11R. pp. 8287–8290. doi: 10.1143/JJAP.47.8287.

10 Mazo M.A., Nistal A., Caballero A.C. et al. Influence of processing conditions in TEOS/PDMS derived silicon oxycarbide materials. Part 1: Microstructure and properties. Journal of the European Ceramic Society. 2013. vol. 33. no. 6. pp. 1195–1205. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.11.022.

11 Qin J., Li B. Synthesis, Characterization and Catalytic Performance of Well-ordered Crystalline Heteroatom Mesoporous MCM-41. Preprints. 2016. [Online first]. doi: 10.20944/preprints201612.0094.v1.

12 Deshpande S.V., Dupuie J.L., Gulari E. Hot filament assisted deposition of silicon nitride thin films. Applied Physics Letters. 1992. vol. 61. no. 12. pp. 1420–1422. doi: 10.1063/1.107557.

13 Itano M., Kezuka T. Particle Adhesion and Removal on Wafer Surfaces in RCA Cleaning. In: Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers. 1998. pp. 115–136. doi: 10.1007/978-3-662-03535-1_10.

14 Hattori T. Trends in Wafer Cleaning Technology. In: Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers. 1998. pp. 437–450. doi: 10.1007/978-3-662-03535-1_32.

15 Bruhanova Y.A., Menshakov A.I., Skorynina P.A. Synthesis of SiAlCO Coatings by Thermal Anodic Evaporation of Al and Decomposition of Tetraethoxysilane in an Arc Discharge with a Sectional Anode. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2024. vol. 18. suppl. 1. pp. S100–S105. doi: 10.1134/S1027451024701500.

16 Zhao X.S., Lu G.Q., Hu X. Characterization of the structural and surface properties of chemically modified MCM-41 material. Microporous and Mesoporous Materials. 2000. vol. 41. no. 1–3. pp. 37–47. doi: 10.1016/S1387-1811(00)00262-6.

17 Kusuda Y., Asai Y., Miyashita T., Nishinaka H. Plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiO2 films at 400 kHz and 100°C using tetraethyl orthosilicate with oxygen and SiH4 with nitrous oxide. Japanese Journal of Applied Physics. 2025. vol. 64. no. 4. article 04SP48. doi: 10.35848/1347-4065/adb989.

18 Wang Z., Zhao Q., Wang D., Cui C. Synthesis and characterization of ordered mesoporous MCM-41 from natural chlorite and its application in methylene blue adsorption. Clays and Clay Minerals. 2021. vol. 69. no. 2. pp. 217–231. doi: 10.1007/s42860-021-00123-5.

19 Marchewka J., Jeleń P., Rutkowska I. et al. Chemical structure and microstructure characterization of ladder-like silsesquioxanes derived porous silicon oxycarbide materials. Materials. 2021. vol. 14. no. 6. article 1340. doi: 10.3390/ma14061340.

20 Gongalsky M.B., Tsurikova U.Y.A., Gonchar K.A. et al. Quantum-confinement effect in silicon nanocrystals during their dissolution in model biological fluids. Semiconductors. 2021. vol. 55. no. 1. pp. 61–65. doi: 10.1134/S1063782621010067.

21 Lu Z.H., Lockwood D.J., Baribeau J.M. Quantum confinement and light emission in SiO2/Si superlattices. Nature. 1995. vol. 378. no. 6554. pp. 258–260. doi: 10.1038/378258a0.

22 Hansda S., Sarkar D., Kundu S. et al. Structural and optical properties of silicon oxycarbide thin films using silane based precursors via sol-gel process. Thin Solid Films. 2024. vol. 791. article 140226. doi: 10.1016/j.tsf.2024.140226.

23 Ramazanov M.A., Shirinova H.A., Nuriyeva S.G. et al. Structure and optic properties of the nanocomposites based on polypropylene and amorphous silica nanoparticles. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2023. vol. 36. no. 4. pp. 1762–1774. doi: 10.1177/08927057211064222.

Сведения об авторах

Иван Энрике Гарсия Балдерас аспирант, полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, ivan.garciabal@alumno.buap.mx
https://orcid.org/0000-0003-1004-9054

Вячеслав Ю. Долгоносов аспирант, полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, dolgonosov@inbox.ru
https://orcid.org/0009-0000-9962-6211

Анастасия Ю. Жалыбина студент, полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, nastya.zhalybina@ya.ru
https://orcid.org/0009-0004-3667-8275

Виктор А. Род заведующий лабораторией материаловедения, полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, vikdor.andreevich@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-8333-4749

Александр Н. Утехин д.х.н., полиграфический факультет, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, alutekhin@ya.ru
https://orcid.org/0009-0003-1681-8579

Валерий Ю. Конюхов д.х.н., профессор, кафедра общей химии (№19) института общей профессиональной подготовки, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31, г. Москва, 115409, Россия, volkon_1@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6128-9413

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Ivan Enrique Garcia Balderas graduate student, polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, ivan.garciabal@alumno.buap.mx
https://orcid.org/0000-0003-1004-9054

Vyacheslav K. Dolgonosov graduate student, polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, dolgonosov@inbox.ru
https://orcid.org/0009-0000-9962-6211

Anastasia Yu. Zhalybina student, polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, nastya.zhalybina@ya.ru
https://orcid.org/0009-0004-3667-8275

Viktor A. Rod head of the materials science laboratory, polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, vikdor.andreevich@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-8333-4749

Aleksandr N. Utekhin Dr. Sci. (Chem.), polygraphic faculty, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38, Moscow, 107023, Russia, alutekhin@ya.ru
https://orcid.org/0009-0003-1681-8579

Valery Yu. Konyukhov Dr. Sci. (Chem.), professor, department of General Chemistry (No. 19) of the Institute of General Professional Training), National Research Nuclear University MEPHI, Kashirskoe shosse, 31 Moscow, 115409, Russia, volkon_1@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6128-9413

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/12/2025	**После редакции** 08/01/2026	**Принята в печать** 20/01/2026
Received 11/12/2025	**Accepted in revised** 08/01/2026	**Accepted** 20/01/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-306-315 Research article
УДК 547.995.15 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Obtaining and Properties of Bi-layer Polyelectrolyte Films Based on Chitosan and Sodium Hyaluronate

Snezhana A. Glebskaia [1] glebskaia@itmo.ru 0009-0000-3691-2544
Tatiana N. Gribinichenko [1] tngribinichenko@itmo.ru 0009-0004-1170-8036
Maria S. Davletshina [1] 2006vfienrf2006 0009-0002-4906-0787
Anna D. Doronina [1] annadoronina1218 0009-0007-1169-0405
Mayya V. Uspenskaya [2,3] mv_uspenskaya@mail.ru 0000-0003-2510-2639
Roman O. Olekhnovich [1,2] r.o.olekhnovich@mail.ru 0000-0002-6894-1224

1 ITMO University (National Research University ITMO), 49 Kronverksky Avenue, Saint Petersburg, 197101, Russia
2 Saint Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Embankment, Saint Petersburg, 199034, Russia
3 Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Polytechnicheskaya Street, Saint Petersburg, 195251, Russia

Abstract. In this study, a method for preparing bilayer films based on a polyelectrolyte complex of sodium hyaluronate and chitosan is presented, with a view toward biomedical applications. The effects of the component mass ratio, layer deposition sequence, and film thickness on the structure, morphology, and mechanical properties of the resulting films were investigated. Formation of the polyelectrolyte complex was confirmed by FTIR spectroscopy, which revealed characteristic changes in the absorption bands of the polymers' functional groups. The morphological features of the polymer films were evaluated by optical microscopy, and tensile testing was used to determine their mechanical performance. The optimal film properties were achieved at a hyaluronic acid (HA-Na) to chitosan (CH) mass ratio of 1:7 and a layer deposition sequence of HA-Na → CH. Increasing film thickness by increasing the volume of the deposited layers resulted in a pronounced improvement in tensile strength and elongation at break. Overall, the findings demonstrate that the properties of sodium hyaluronate/chitosan bilayer films can be purposefully tuned by varying processing parameters, making these materials promising biomedical film matrices for the treatment of injuries and tissue damage.

Keywords: polyelectrolyte complex, sodium hyaluronate, chitosan, bilayer films, layer-by-layer casting, FTIR spectroscopy, film morphology, mechanical properties, biopolymer materials, wound dressings.

Introduction

The development of biocompatible and biodegradable polymer materials with controlled physicochemical and mechanical properties represents a critical frontier in modern biomedicine [1]. This is particularly evident in the fields of tissue engineering [2] and drug delivery systems [3], where the demand for advanced functional interfaces between synthetic materials and biological tissues is observed. The engineering of hydrophilic films and coatings capable of modulating the healing environment, for example by maintaining a moist wound bed, facilitating gas exchange, and serving as a barrier against infection, plays a crucial role in regenerative medicine [4].

Chitosan (CH), a natural linear polysaccharide, is derived from the deacetylation of chitin, a polymer found in crustacean shells, insect exoskeletons, and fungal cell walls [5]. It has been widely applied in medicine, pharmacology, and biotechnology [6,7]. As a cationic polyelectrolyte, its positive charge stems from the protonation of free amino groups in acidic conditions [8]. This unique structure confers a broad spectrum of biological activities, including inherent film-forming ability and broad-spectrum antimicrobial properties, which are attributed to its capacity to disrupt microbial membranes and bind toxins [9]. Its biodegradability by human enzymes like lysozyme and its ability to stimulate macrophage activity further enhance its profile for medical use [10]. Chitosan forms viscous solutions in weak organic acids, which can be cast into robust, transparent films upon drying [7]. Application films of pure chitosan are often limited by the brittle nature, necessitating the formation of composites for durable applications [11].

Hyaluronic acid (HA) is a naturally occurring anionic glycosaminoglycan, playing a crucial structural and regulatory role in the extracellular matrix of connective tissues [12]. It is integral to processes such as cell proliferation, migration, and signaling, which are fundamental to wound repair [13]. Its primary biological function is associated with exceptional hydrophilicity and water-binding capacity, making it a key moisturizing agent in numerous biomedical and cosmetic applications [14]. A notable limitation of high-molecular-weight HA is its large hydrodynamic size, which restricts deep tissue penetration, often causing it to remain on the surface [15]. To overcome

Для цитирования
Глебская С.А., Грибиниченко Т.Н., Давлетшина М.С., Доронина А.Д., Успенская М.В., Олехнович Р.О. Получение и свойства двухслойных полиэлектролитных пленок на основе хитозана и гиалуроната натрия. // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 306–315. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-306-315

For citation
Glebskaya S.A., Gribinichenko T.N., Davletshina M.S., Doronina A.D., Uspenskaya M.V., Olekhnovich R.O. Obtaining and Properties of Bi-layer Polyelectrolyte Films Based on Chitosan and Sodium Hyaluronate. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 306–315. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-306-315

© 2026, Глебская С.А. и др. / Glebskaya S.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

this, its sodium salt, sodium hyaluronate (HA-Na), is frequently used. HA-Na offers improved stability and, due to its typically lower molecular weight or altered conformation, demonstrates enhanced ability to penetrate tissues. Furthermore, the molecular weight of hyaluronic acid (HA) and its sodium salt (HA-Na) is a critical parameter, since low-molecular-weight fragments are known to elicit pro-angiogenic and pro-inflammatory signaling responses, whereas high-molecular-weight species predominantly exhibit anti-angiogenic and structural space-filling functions [16].

The electrostatic interaction between the cationic amino groups of chitosan ($–NH_3^+$) and the anionic carboxylate groups of hyaluronate ($–COO^–$) causes the spontaneous formation of a polyelectrolyte complex (PEC) [17]. This self-assembly mechanism, based on charge neutralization, has advantages over chemical crosslinking, since it does not require the use of potentially cytotoxic reagents and therefore maintains the biocompatibility of the components. [18]. The resulting PEC exhibits enhanced mechanical stability in aqueous environments and reduced solubility compared to the individual polymers, making it highly suitable for obtaining biomedical films. The structure and properties of such complexes are highly sensitive to the polymer ratio, pH, ionic strength and the order of component assembly, which dictates the final stoichiometry and spatial organization of the network [19].

The layer-by-layer (LbL) deposition technique is particularly applicable for fabricating such complex-based materials. This method, based on the alternate adsorption of oppositely charged polyelectrolytes, enables the construction of thin films with nanometer-scale control over thickness and composition. A key advantage is the ability to regulate the final material's structure and properties by altering the sequence of layer deposition, which directly influences interdiffusion and complexation kinetics. The study of such two-layer systems is highly relevant, as they represent a fundamental and tunable model for more sophisticated multicomponent coatings. While the LbL technique is well-established for obtaining multilayered nano-assemblies, its application to fabricate macroscopic, free-standing bilayer films with a defined polyelectrolyte complex interface offers a simplified model for understanding structure-property relationships [20].

Systematic investigation of influence of the layer deposition subsequence on the morphology, intermolecular interaction and resulting functional properties of two-layer PECs is not well-study. Most studies focus on blended composites or multilayered systems, leaving a gap in understanding the asymmetric properties of a bilayer. Secondly, there is a notable scarcity of comprehensive data on the properties of bilayer PEC films from this pair, as opposed to blended composites or multilayered assemblies. Finally, there is a clear need for a detailed optimization of critical process parameters – such as polymer solution concentrations, volumes, and post-processing conditions – to achieve reproducible films with controlled characteristics for specific biomedical applications, such as wound dressings capable of stimulating regeneration and providing hemostatic and antibacterial functions [21, 22].

The purpose of this study is to develop, optimize, and comprehensively characterize two-layer films based on a PEC of sodium hyaluronate and chitosan fabricated by sequential LbL application, with a focused investigation into the effects of layer sequence, polymer concentrations on their mechanical properties.

Materials and Methods

The following reagents were used in this research: sodium hyaluronate (HA-Na, molecular weight 1.29 MDa) and chitosan (CH, molecular weight 0.2 MDa) were supplied by Bioprogress LLC (Russia), acetic acid (2% v/v aqueous solution) was purchased from Formula (Russia), sodium hydroxide (NaOH) and hydrochloric acid (HCl) solutions were obtained from LenReactiv JSC (Russia).

Sodium hyaluronate solutions were prepared by dissolving the polymer in distilled water at room temperature to achieve final concentrations of 0.25% and 0.5% (w/w). The mixtures were stirred on a magnetic stirrer at 400–600 rpm for 2–3 hours until homogenous gels were formed.

Chitosan solutions were obtained by dispersing the polymer in a 2% (v/v) aqueous acetic acid solution to reach final concentrations of 1.75% and 3.5% (w/w). The dispersions were stirred on a magnetic stirrer at room temperature (400–600 rpm) for 2–3 hours until complete dissolution.

The films were fabricated using a sequential layer-by-layer casting technique onto a plastic Petri dish. Initially, a layer of either Na-HA or CH solution at a specific concentration was applied and dried in an oven at 37 °C for 24 hours. Subsequently, a solution of the other polymer was applied onto the first dried layer and dried under identical conditions (37 °C, 24 hours).

After the drying process, all film samples underwent a short-term heat treatment in an oven at 100 °C for 5 minutes to stabilize the structure and enhance its strength via recrystallization of the polymer matrix.

The dried and heat-treated films were stored in dessicators over saturated aqueous potassium chloride (KCl) solutions to maintain a constant relative humidity of 70%, which prevented overdrying and ensured the stability of their characteristics.

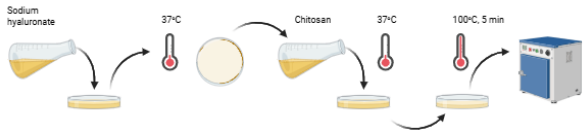


Figure 1. The process of forming a film of a polyelectrolyte complex based on sodium hyaluronate and chitosan

Mechanical properties of the samples were evaluated using a universal testing machine Instron 5966 (Instron, USA). The maximum static load of the testing system was 10 kN. The machine provided a crosshead travel of up to 1140 mm and a test speed range from 0.001 to 1500 mm • min^{-1}. The width of the test space was 418 mm, and the vertical test space was 1256 mm. Load measurements were performed with an accuracy of ± 0.5%.

Morphological characterization was carried out by optical microscopy using an Olympus STM6 microscope (Olympus, Tokyo, Japan). The microscope was equipped with a three-axis (XYZ) positioning system, providing a measurement range of up to 127 mm and a positioning accuracy of 0.1 μm.

Sample thickness was measured using a standard digital micrometer MKTs-25 (Tekhrim, Russia) with a measurement range of 0.001–25 mm.

Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy was employed to analyze the chemical structure of the samples. FTIR spectra were recorded using a Tensor 37 spectrometer (Bruker, Germany) at a spectral resolution of 2 cm^{-1} with 32 scans per measurement. The spectral range covered 7500–375 cm^{-1}, corresponding to wavelengths of 1.33–26.7 μm. Measurements in the near-infrared (NIR) region were performed using the instrument extension in the range of 15,000–4000 cm^{-1}. The maximum achievable spectral resolution of the spectrometer was 0.5 cm^{-1}.

Results

The results demonstrate that the sequence of polymer layer deposition has a significant influence on film morphology and mechanical properties, as evidenced by optical microscopy (Fig. 2) and tensile testing (Fig. 3). At the optimal hyaluronic acid to chitosan mass ratio of 1:7, films were prepared by sequential deposition of a 0.5 wt.% sodium hyaluronate (HA-Na) solution as the first layer followed by a 3.5 wt.% chitosan (CH) solution (sequence: HA-Na → CH). This deposition sequence resulted in the formation of relatively homogeneous films with a smooth surface and a low aggregation degree. This material exhibited high tensile properties, characterized by a tensile strength of 28.59 MPa, a strength at break of 28.60 MPa, and a maximum strain of 27.37%. In contrast, the inverse deposition sequence, where a 3.5% (w/w) CH solution was the first layer and a 0.5% (w/w) HA-Na solution was the second (sequence: CH → HA-Na), led to films with significant heterogeneity, the presence of aggregates, and microdefects on the surface (Fig. 3). This morphology corresponded to substantially lower mechanical characteristics: tensile strength of 10.62 MPa, strength at break of 10.62 MPa, and maximum strain of 18.33%. Thus, the sequence HA-Na → CH provides superior mechanical properties and film integrity.

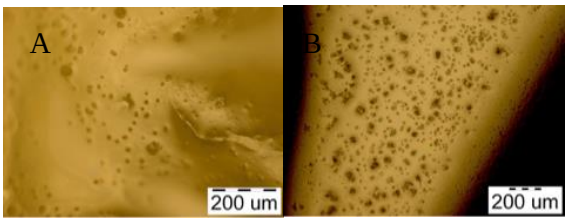


Figure 2. Surface morphology of bilayer films formed by different deposition sequences: A – sequential deposition of sodium hyaluronate followed by chitosan (HA-Na → CH); B – inverse deposition sequence, chitosan followed by sodium hyaluronate (CH → HA-Na)

Mechanical testing showed that the properties of the bilayer films strongly depend on the component ratio, layer deposition sequence, and film thickness. The use of a sodium hyaluronate solution with a concentration of 0.25% (w/w) resulted in the formation of a thin base layer with a thickness of 0.06 mm. Such films were characterized by a tensile strength of 15.25 MPa and a tensile strength a break of 15.35 MPa with a low maximum relative elongation of 1.81%. Increasing the volume of applied solutions led to an increase in the film thickness to 0.07 mm and a slight decrease in mechanical properties (to 13.98 and 14.01 MPa, respectively), accompanied by a moderate increase in the maximum relative elongation to 2.38%. At the same time, a sodium hyaluronate concentration of 0.5% (w/w) was found to be optimal for the formation of a uniform base layer. However, at a HA-Na to CH concentration ratio of 1:7 and a film thickness of 0.1 mm, the resulting films exhibited low mechanical properties, with a tensile strength of 0.81 MPa and a strength at break of 0.82 MPa. Film thickness was found to be directly dependent on the volume of the applied solutions. Thus, at a film thickness of 1.3 mm, the best mechanical performance was achieved, characterized by a high tensile strength of 16.20 MPa, a strength at break of 16.20 MPa, and a significantly increased maximum strain of 17.74%.

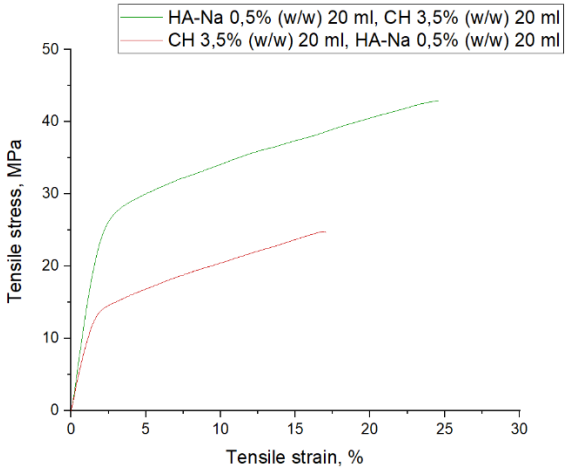


Figure 3. Mechanical testing of films with the sequence of layers CH → HA-Na and HA-Na → CH (1:7 и 7:1)

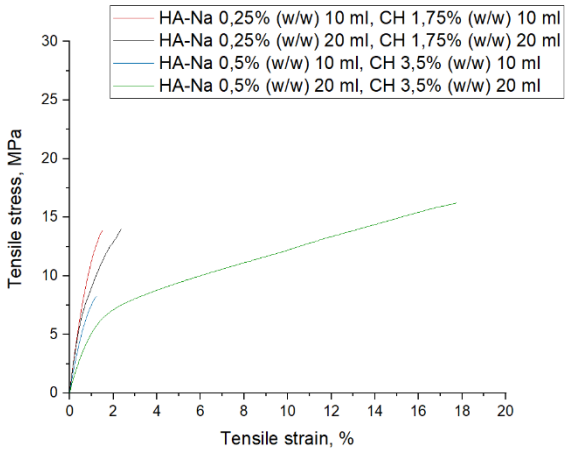


Figure 4. Tensile testing of films with various concentrations

The IR spectrum of pure sodium hyaluronate (HA-Na) is characterized by an intense absorbtion band at approximately 1410 cm^{-1}, corresponding to the symmetric stretching vibrations of carboxylate groups ($–COO^-$), as well as bands in the 1000–1100 cm^{-1} region associated with vibrations of the C–O–C and C–O bonds of the polysaccharide chain. The spectrum of pure chitosan (CH) exhibits a prominent distribution band at 1650 cm^{-1}, associated with the stretching vibrations of amino groups ($–NH_2$), as well as a band at approximately 1590 cm^{-1}, corresponding to the deformation vibrations of N–H bonds.

When examining bilayer films based on sodium hyaluronate and chitosan, the characteristic bands of both polymers undergo noticeable changes. The spectra of the samples show a shift in the chitosan amino group band around 1650 cm^{-1}, as well as a decrease in intensity of the sodium hyaluronate carboxylate band at approximately 1410 cm^{-1}, compared to the spectra of the individual polymers. These changes indicate the involvement of functional groups in intermolecular interactions.

In the FTIR spectra of bilayer films with a hyaluronic acid to chitosan mass ratio of 1:1, changes in the characteristic absorption bands of both polymers are also observed compared to the spectra of the pure components. A moderate shift of the chitosan amino group band in the region of 1650 cm^{-1} is detected, along with a partial decrease in the intensity of the carboxylate band of sodium hyaluronate at approximately 1410 cm^{-1}. These spectral features indicate the onset of electrostatic interactions between – NH_2 groups of chitosan and – COO^- groups of sodium hyaluronate.

However, in contrast to the bilayer film with a hyaluronic acid to chitosan ratio of 1:7, the spectral changes observed for the 1:1 composition are less pronounced. The shifts of the characteristic bands are smaller, and the reduction in carboxylate band intensity is limited, suggesting incomplete charge compensation and a lower degree of ionic interaction between the oppositely charged functional groups. This indicates that, at a 1:1 mass ratio, the formation of the polyelectrolyte complex occurs to a lesser extent and is not optimal in terms of maximizing electrostatic interactions between the polymer components.

The most pronounced changes were recorded for the bilayer film with a 1:7 hyaluronic acid to chitosan mass ratio. For this example, the maximum band shift corresponding to the stretching vibrations of the amino groups are observed, as well as the widest distribution boundary for the carboxylate groups. Compared to the spectra of pure HA-Na and CH, this indicates more complete charge shielding and a greater degree of electrostatic bonding between oppositely charged functional units of the resulting polymers, indicating the most effective polyelectrolyte complex structures for these components.

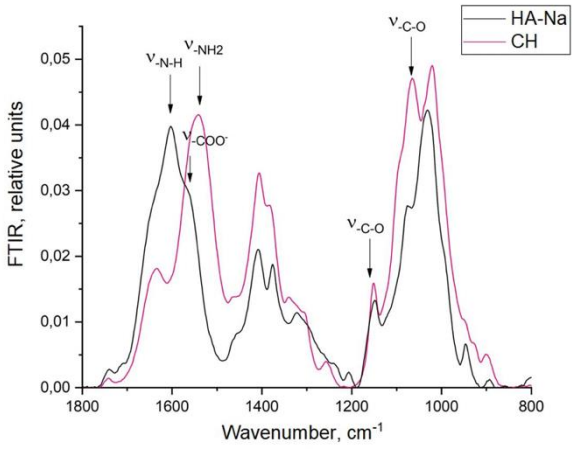


Figure 5. FTIR spectra of pure sodium hyaluronate (HA-Na) and chitosan (CH)

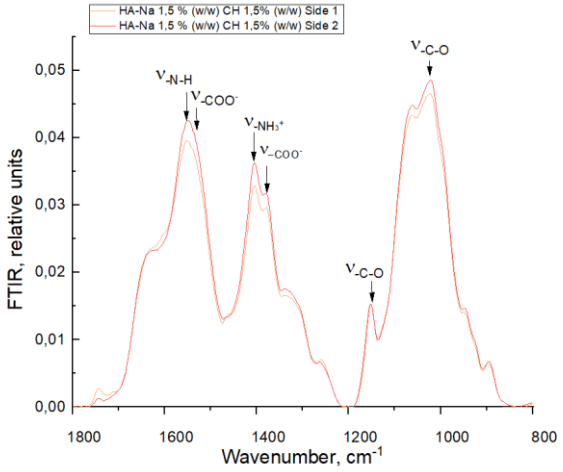


Figure 6. FTIR spectroscopy: sodium hyaluronate to chitosan ratio of 1:1

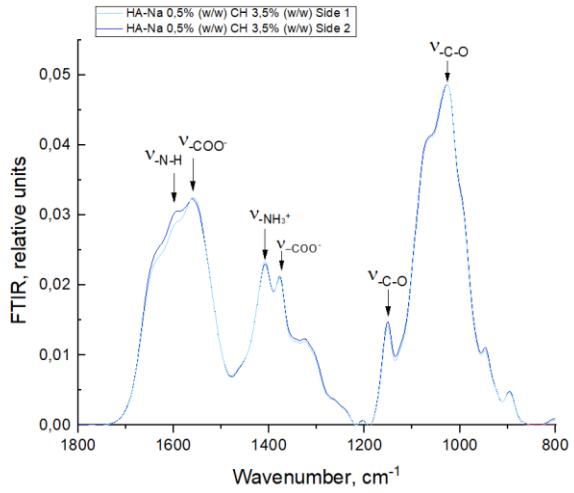


Figure 7. FTIR spectroscopy: sodium hyaluronate to chitosan ratio of 1:7

Discussion

The obtained results indicate that the formation of a sodium hyaluronate–chitosan polyelectrolyte complex, as well as the morphology and mechanical properties of the bilayer films, are largely governed by the component ratio, the sequence of layer deposition, and the film thickness.

The foundation for obtaining stable film structures is the complexation process between oppositely charged macromolecules. From a thermodynamic perspective, PEC formation is a spontaneous process driven by an increase in the system's entropy due to the electrostatic interaction of ionic polymer groups [7]. However, the kinetics of this process and the morphology of the resulting complex critically depend on parameters such as the polymer ratio, the pH of the medium, and the order of layers [23]. The spectroscopic confirmation of PEC formation, characterized by the most pronounced shifts in the FTIR bands for the 1:7 HA-Na: CH ratio, underscores the importance of achieving an optimal stoichiometric balance. This observation can be discussed in the context of charge density and the cooperative nature of polyelectrolyte interactions, where an excess of one component can drive the reaction to completion and stabilize the complex network [24].

The selection of the HA-Na: CH mass ratio of 1:7 is based on the principle of charge compensation in the forming complex [25]. This ratio ensures a stoichiometric balance between the carboxylate anions of HA-Na and the protonated amino groups of chitosan [6]. The excess of chitosan serves several important functions: firstly, it ensures the complete binding of carboxyl groups of HA-Na, preventing hydration and premature dissolution of the complex under physiological conditions; secondly, it obtains a dense structural framework due to the ability of chitosan molecules to form extensive hydrogen bonds and crystalline domains [26]; thirdly, it provides antimicrobial activity of the materials due to the high concentration of free amino groups not involved in complexation [27]. This structural advantage is directly reflected in the superior mechanical performance of films with a CH-rich composition.

The pH value of 5.5, selected for the preparation of solutions, is a parameter determining the degree of ionization of the functional groups of both polymers. For chitosan, with pKa = 6.3 – 6.5, at pH = 5.5, almost complete protonation of amino groups is ensured, which is necessary both for its dissolution and for subsequent electrostatic interaction with the anionic groups of HA-Na [7]. For hyaluronic acid (pKa = 2.5 – 3), this pH achieves an optimal balance between the degree of ionization of the carboxyl groups (ensuring reactivity) and the conformational stability of the polymer chain [28]. It should be noted that deviation from the optimal value in either direction disrupts the complexation process. At pH < 4, excessive protonation of the carboxyl groups of HA-Na is observed, reducing their capacity for electrostatic interaction. At pH > 6, deprotonation of chitosan amino groups begins, leading to its precipitation and disruption of the homogeneity of the formed film [27]. Thus, the pH value of 5.5 represents a compromise that ensures maximum PEC formation efficiency while maintaining the stability of individual polymer solutions, directly impacting the reproducibility and quality of the final films.

The method of sequential layer-by-layer polymer deposition with intermediate drying has proven crucial for determining final film properties. This approach allows for the formation of anisotropic structures with a controlled property gradient across the film thickness. From a physicochemical viewpoint, this approach separates the processes of primary polymer matrix formation and subsequent interphase complexation. Upon application and

drying of the first HA-Na layer, a porous hydrophilic matrix is formed, characterized by a relatively low packing density of polymer chains due to steric hindrances associated with the hydrated hyaluronate macromolecules [29]. The subsequent application of the chitosan solution leads to its capillary diffusion into the pores of the first layer and volumetric complexation, which is confirmed by microscopy data showing the homogeneous structure and superior mechanical strength (tensile strength 28.6 MPa, strain 27.4%) of such films (HA-Na → CH sequence). The formation of PEC throughout the volume of the first layer obtains a unique biphasic structure combining mechanical strength (provided by dense complex domains) and elasticity (retained by regions with a predominance of HA-Na).

The inverse application sequence (chitosan as the first layer) leads to a fundamentally different morphology. The rapid gelation of chitosan during drying forms a dense, low-porosity matrix with a limited capacity for subsequent diffusion of HA-Na macromolecules [30]. Consequently, complexation occurs predominantly at the phase interface, obtaining a sharp property gradient and leading to structural heterogeneity, as observed in microscopy. This explains the observed defects and the significantly lower mechanical characteristics (tensile strength 10.6 MPa, strain 18.3%) of such samples. This finding aligns with principles of diffusion-limited reactions in polymer matrices [31].

The investigation into solution concentration and volume revealed another critical layer of control. While a 0.5% HA-Na base layer was optimal for uniformity, the applied volume was determinative for mechanical performance. The very low strength observed with 10 ml volumes of 0.5% HA-Na and 3.5% CH suggests the formation of an incomplete or discontinuous layer, perhaps too thin to form a coherent matrix. Crucially, increasing the volume to 20 ml of each solution yielded films with an optimal balance of high strength (16.2 MPa) and flexibility (17.7% strain), outperforming films made from lower-concentration solutions. This indicates that sufficient polymer mass per unit area is required to build an interpenetrated network during the sequential casting process. The data suggests that mechanical properties are not solely a function of concentration but of the absolute amount of polymer deposited, influencing layer thickness and the depth of inter-diffusion and complexation. For the PEC, thermal exposure stabilizes the complex by enhancing not only electrostatic but also hydrophobic interactions between polymer chains [32]. This could contribute to increased complex stability in aqueous environments and modulate biodegradation kinetics, which is particularly important for biomedical applications such as wound dressings that function in moist environments [33].

The obtained mechanical characteristics of the optimal films (e.g., HA-Na 0.5% (w/w) → CH 3.5% (w/w), 20 ml, tensile strength > 16 MPa, strain > 17%) demonstrate their promising suitability for use in regenerative medicine, particularly as wound dressings or scaffold materials. Comparable mechanical performance ranges have been reported for hyaluronic acid-based biomedical films intended for transdermal and wound-healing applications, where a balance between strength and elasticity is critical [34]. These values indicate a material that is strong enough to provide structural support and handle mechanical stress during application, yet sufficiently flexible. The retained elasticity is crucial for ensuring patient comfort and for withstanding dynamic movements in the application area. Furthermore, the inherent properties of the components – chitosan's antimicrobial and hemostatic activity combined with HA-Na's biocompatibility and hydrating capacity – obtain a multifunctional material whose physical properties are tailored through controlled fabrication.

Thus, a comprehensive analysis confirms the profound interdependence of stoichiometry, deposition sequence, solution parameters (concentration and volume), and post-processing conditions on the structure and function of HA-Na/CH PEC films. The systematic optimization described here provides a framework for designing materials with precisely controlled functional characteristics, from highly elastic to more rigid films, by adjusting these key variables. This opens significant prospects for tailoring such bilayer systems for specific clinical applications, ranging from elastic skin substitutes to more rigid guided tissue regeneration membranes. Future work should focus on correlating these in vitro properties with in vivo performance, including degradation profiles, bioactivity, and tissue integration.

Conclusion

This study developed and characterized two-layer polyelectrolyte complex (PEC) films based on sodium hyaluronate (HA-Na) and chitosan (CH) fabricated by a sequential layer-by-layer casting technique. The comprehensive investigation of key technological parameters – layer deposition sequence, polymer solution concentrations, and applied volumes – has elucidated fundamental structure-property relationships and established a reproducible framework for engineering films with tailored characteristics for biomedical applications.

Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy provided evidence of electrostatic interaction between the cationic amino groups of chitosan and the anionic carboxylate groups of hyaluronate.

The most pronounced spectral shifts were observed for the HA-Na: CH mass ratio of 1:7, indicating this to be the optimal stoichiometry for effective and complete complex formation. The excess chitosan secures complete binding of HA-Na and also contributes a robust structural framework and reserves free amino groups beneficial for antimicrobial functionality.

The sequence of polymer application is a decisive factor governing the internal structure and macroscopic properties of the bilayer films. Depositing HA-Na as the foundational layer followed by CH (HA-Na → CH sequence) resulted in homogeneous films with superior mechanical integrity (tensile strength 28.6 MPa, strain 27.4%). This is attributed to the formation of a porous, hydrophilic HA-Na matrix that facilitates the subsequent capillary diffusion and volumetric interpenetration of chitosan, leading to a deeply interdiffused PEC throughout the film thickness. Conversely, the inverse sequence (CH → HA-Na) produced heterogeneous films with surface defects and inferior mechanical properties (tensile strength 10.6 MPa), as the initially formed dense chitosan layer limits HA-Na diffusion, confining complexation primarily to a sharp interface and obtaining structural weaknesses.

The study demonstrates that film properties are governed not by concentration alone but by the synergistic effect of concentration and the absolute volume (mass) of polymer deposited per unit area. While a 0.5% (w/w) HA-Na solution was optimal for forming a uniform base layer, sufficient applied volume (20 ml in this setup) was crucial to achieve adequate layer thickness and polymer mass. The combination of 20 ml of 0.5% HA-Na and 20 ml of 3.5% CH produced films with an optimal balance of strength (16.2 MPa) and flexibility (17.7% strain). Lower volumes or concentrations resulted in films that were either too brittle or mechanically weak, highlighting the necessity of depositing enough material to form a coherent, fully developed interpenetrating network.

The optimized protocol proved essential for achieving reproducible films with enhanced stability. The selected pH ensures optimal ionization of both polymers for effective complexation. The thermal treatment likely enhances structural stability via hydrophobic interactions and recrystallization. Storage at 70% RH maintains an optimal water content, acting as a plasticizer to prevent embrittlement without causing over-hydration and dissolution of the PEC.

The mechanical properties of the optimal films (tensile strength > 16 MPa, elongation at break > 17%) align with the requirements for durable yet flexible biomaterials. The inherent bioactivity of the components makes this bilayer PEC system highly promising. It offers a versatile platform for obtaining functional materials, such as wound dressings that can provide moist wound healing, antimicrobial protection (from CH), enhanced tissue regeneration (from HA-Na), and appropriate mechanical support.

Thus, a comprehensive analysis confirms the profound interdependence of stoichiometry, deposition sequence, solution parameters (concentration and volume), and post-processing conditions on the structure and function of HA-Na/CH PEC films. The systematic optimization described here provides a framework for designing materials with precisely controlled functional characteristics, from highly elastic to more rigid films, by adjusting these key variables. This opens significant prospects for tailoring such bilayer systems for specific clinical applications, ranging from elastic skin substitutes to more rigid guided tissue regeneration membranes. Future work should focus on correlating these in vitro properties with in vivo performance, including degradation profiles, bioactivity, and tissue integration.

References

1 Abdulsalam L., Abubakar S., Permatasari I., Lawal A.A., Uddin S., Ullah S., Ahmad I. Advanced Biocompatible and Biodegradable Polymers: A Review of Functionalization, Smart Systems, and Sustainable Applications. Polymers. 2025. vol. 17. no. 21. doi: 10.3390/polym17213001.

2 Socci M.C., Rodríguez G., Oliva E., Fushimi S., Takabatake K., Nagatsuka H., Felice C.J., Rodríguez A.P. Polymeric Materials, Advances and Applications in Tissue Engineering: A Review. Bioengineering. 2023. vol. 10. no. 2. article 218. doi: 10.3390/bioengineering10020218.

3 Song R., Murphy M., Li C., Ting K., Soo C., Zheng Z. Current development of biodegradable polymeric materials for biomedical applications. Drug Design, Development and Therapy. 2018. vol. 12. pp. 3117–3145. doi: 10.2147/DDDT.S165440.

4 Sutradhar S.C., Shin H., Kim W., Jang H. Hydrogel Films in Biomedical Applications: Fabrication, Properties and Therapeutic Potential. Gels. 2025. vol. 11. no. 11. [Online first]. doi: 10.3390/gels11110875.

5 Bykova V.M., Nemtsev V.S. Raw Materials Sources and Methods for Obtaining Chitin and Chitosan. In: Skryabin K.G., Vikhreva G.A., Varlamov V.P. (eds.) Chitin and Chitosan. Production, Properties and Application. Moscow: Nauka, 2006. pp. 7–23. (in Russian).

6 Jiménez-Gómez C.P., Cecilia J.A. Chitosan: A Natural Biopolymer with a Wide and Varied Range of Applications. Molecules. 2020. vol. 25. no. 17. article 3981. doi: 10.3390/molecules25173981.

7 Aranaz I., Alcántara A.R., Civera M.C., Arias C., Elorza B., Heras Caballero A., Acosta N. Chitosan: An Overview of Its Properties and Applications. Polymers. 2021. vol. 13. no. 19. article 3256. doi: 10.3390/polym13193256.

8 Lingait D., Rahagude R., Gaharwar S.S., Das R.S., Verma M.G., Srivastava N., Kumar A., Mandavgane S. A review on versatile applications of biomaterial/polycationic chitosan: An insight into the structure-property relationship. International Journal of Biological Macromolecules. 2024. vol. 257. part 2. article 128676. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.128676.

9 Harugade A., Sherje A.P., Pethe A. Chitosan: A review on properties, biological activities and recent progress in biomedical applications. Reactive and Functional Polymers. 2024. vol. 191. article 105634. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105634.

10 Wang X., An Z., Zheng X., Jin Z. A thermally sensitive and antibacterial multifunctional chitosan-based hydrogel that accelerates wound healing by recruiting macrophages and regulating cytokines and cytokeratin. European Polymer Journal. 2025. vol. 241. article 113089. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2025.113089.

11 Taylor M., Jenkins J., Rodriguez C., Adcock A., Yang L., Mohiuddin M., Riaz U. Poly(1 naphthylamine) – Reinforced Chitosan Films for Smart Packaging: Enhanced Mechanical, Morphological, and Antibacterial Properties. Langmuir. 2025. vol. 41. no. 46. pp. 31608–31622. doi: 10.1021/acs.langmuir.5c03256.

12 Abatangelo G., Vindigni V., Avruscio G., Pandis L., Brun P. Hyaluronic Acid: Redefining Its Role. Cells. 2020. vol. 9. no. 7. article 1743. doi: 10.3390/cells9071743.

13 Dovedytis M., Liu Z.J., Bartlett S. Hyaluronic acid and its biomedical applications: A review. Engineered Regeneration. 2020. vol. 1. pp. 102–113. doi: 10.1016/j.engreg.2020.10.001.

14 Juncan A.M., Moisă D.G., Santini A., Morgovan C., Rus L.L., Vonica-Țincu A.L., Loghin F. Advantages of Hyaluronic Acid and Its Combination with Other Bioactive Ingredients in Cosmeceuticals. Molecules. 2021. vol. 26. no. 15. article 4429. doi: 10.3390/molecules26154429.

15 Wang H., Jin Z., Xia L., Wang L., Sheng X., Wang S., Xu T., He P., Li C. Transdermal and moisturizing effects of novel supramolecular hyaluronic acid. Research Square [preprint]. 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-2654321/v1.

16 Kareva E.N., Donskov S.V. Pharmacological aspects of hyaluronic acid metabolism: A review. Gynecology. 2025. vol. 27. no. 2. pp. 157–171. doi: 10.26442/20795696.2025.2.203218 (in Russian).

17 Tsuchida E. Formation of polyelectrolyte complexes and their structures. Journal of Macromolecular Science – Pure and Applied Chemistry. 1994. vol. 31. no. 1. pp. 1–15. doi: 10.1080/10601329408545870.

18 Lankalapalli S., Kolapalli V.R. Polyelectrolyte Complexes: A Review of their Applicability in Drug Delivery Technology. Indian Journal of Pharmaceutical Sciences. 2009. vol. 71. no. 5. pp. 481–487. doi: 10.4103/0250-474X.58165.

19 Auepattana-Aumrung K., Bishop L.M., Stevens K.C., Stewart K.A., Crespy D., Sumerlin B.S. Photoinduced polyelectrolyte complexation for the formation of stable films with reversible crosslinking. Chemical Science. 2025. vol. 16. no. 14. pp. 5976–5985. doi: 10.1039/D5SC00002E.

20 Campbell J., Vikulina A.S. Layer-By-Layer Assemblies of Biopolymers: Build-Up, Mechanical Stability and Molecular Dynamics. Polymers. 2020. vol. 12. no. 9. article 1949. doi: 10.3390/polym12091949.

21 Su L., Jia Y., Fu L., Guo K., Xie S. The emerging progress on wound dressings and their application in clinic wound management. Heliyon. 2023. vol. 9. no. 12. article e22520. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22520.

22 Xu H., Ma L., Shi H., Gao C., Han C. Chitosan–hyaluronic acid hybrid film as a novel wound dressing: in vitro and in vivo studies. Polymers for Advanced Technologies. 2007. vol. 18. no. 10. pp. 869–875. doi: 10.1002/pat.953.

23 Kulkarni A.D., Vanjari Y.H., Sancheti K.H., Patel H.M., Belgamwar V.S., Surana S.J., Pardeshi C.V. Polyelectrolyte complexes: mechanisms, critical experimental aspects, and applications. Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology. 2016. vol. 44. no. 7. pp. 1615–1625. doi: 10.3109/21691401.2015.1129623.

24 Jagtap P., Patil K., Dhatrak P. Polyelectrolyte Complex for Drug Delivery in Biomedical Applications: A Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. vol. 1183. no. 1. article 012007. doi: 10.1088/1757-899X/1183/1/012007.

25 Polexe R.C., Delair T. Elaboration of stable and antibody functionalized positively charged colloids by polyelectrolyte complexation between chitosan and hyaluronic acid. Molecules. 2013. vol. 18. no. 7. pp. 8563–8578. doi: 10.3390/molecules18078563.

26 Gonciarz W., Balcerczak E., Brzeziński M., Jeleń A., Pietrzyk-Brzezińska A.J., Narayanan V.H.B., Chmiela M. Chitosan-based formulations for therapeutic applications. A recent overview. Journal of Biomedical Science. 2025. vol. 32. article 62. doi: 10.1186/s12929-025-01167-5.

27 Ke C.L., Deng F.S., Chuang C.Y. et al. Antimicrobial Actions and Applications of Chitosan. Polymers. 2021. vol. 13. no. 6. article 904. doi: 10.3390/polym13060904.

28 Di Mola A., Landi M.R., Massa A., D'Amora U., Guarino V. Hyaluronic Acid in Biomedical Fields: New Trends from Chemistry to Biomaterial Applications. International Journal of Molecular Sciences. 2022. vol. 23. no. 22. article 14372. doi: 10.3390/ijms232214372.

29 Foster A., DeRosa M.C. Development of a Biocompatible Layer-by-Layer Film System Using Aptamer Technology for Smart Material Applications. Polymers. 2014. vol. 6. pp. 1631–1654. doi: 10.3390/polym6061631.

30 Sainsbury E., Amaral R., Blayney A.W. et al. Tissue engineering and regenerative medicine strategies for the repair of tympanic membrane perforations. Biomaterials and Biosystems. 2022. vol. 8. article 100046. doi: 10.1016/j.bbiosy.2022.100046.

31 Lavrentev F.V., Shilovskikh V.V., Alabusheva V.S., Yurova V.Y., Nikitina A.A., Ulasevich S.A., Skorb E.V. Diffusion-Limited Processes in Hydrogels with Chosen Applications from Drug Delivery to Electronic Components. Molecules. 2023. vol. 28. no. 15. article 5931. doi: 10.3390/molecules28155931.

32 Tegopoulos S.N., Ektirici S., Harmandaris V., Kyritsis A., Rissanou A.N., Papagiannopoulos A. Complexation and Thermal Stabilization of Protein–Polyelectrolyte Systems via Experiments and Molecular Simulations: The Poly(acrylic acid)/Lysozyme Case. Polymers. 2025. vol. 17. article 2125. doi: 10.3390/polym17152125.

33 Aleemardani M., Bagher Z., Farhadi M., Chahsetareh H., Najafi R., Eftekhari B., Seifalian A. Can Tissue Engineering Bring Hope to the Development of Human Tympanic Membrane? Tissue Engineering Part B: Reviews. 2021. vol. 27. no. 6. pp. 572–589. doi: 10.1089/ten.teb.2020.0288.

34 Kolawole S. Dada, Uspenskaya M.V., Collins N. Elangwe, Nosova A.O., Olekhnovich R.O. Exploring the influence of mechanical and physical characteristics on transdermal patches: A study on polymeric films composed of hyaluronic acid and zinc oxide nanoparticles. Proceedings of VSUET. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 282–288. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-282-288.

Information about authors	Contribution
Snezhana A. Glebskaia Student, Center for Chemical Engineering, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia, glebskaia@itmo.ru https://orcid.org/0009-0000-3691-2544	review of the literature on an investigated problem
Tatiana N. Gribinichenko PhD Student, Center for Chemical Engineering, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia, tngribinichenko@itmo.ru https://orcid.org/0009-0004-1170-8036	conducted an experiment
Maria S. Davletshina Student, Center for Chemical Engineering, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia, 2006vfienrf2006 https://orcid.org/0009-0002-4906-0787	wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism
Anna D. Doronina Student, Center for Chemical Engineering, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia, annadoronina1218 https://orcid.org/0009-0007-1169-0405	performed computations
Mayya V. Uspenskaya Dr. Sci. (Engin.), Institute of Chemistry, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russia, mv_uspenskaya@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-2510-2639	consultation during the study
Roman O. Olekhnovich Cand. Sci. (Engin.), Institute of Chemistry, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034, Russia, r.o.olekhnovich@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-6894-1224	wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 10/01/2026 **Accepted in revised** 12/01/2026 **Accepted** 22/02/2026

Получение и свойства двухслойных полиэлектролитных пленок на основе хитозана и гиалуроната натрия.

Аннотация. В работе представлена методика получения двухслойных плёнок на основе полиэлектролитного комплекса гиалуроната натрия и хитозана, ориентированных на применение в биомедицинских целях. Изучено влияние массового соотношения компонентов, последовательности нанесения слоёв и толщины плёночного материала на структуру, морфологию и механические свойства получаемых плёнок. Формирование полиэлектролитного комплекса подтверждено методом ИК-Фурье спектроскопии, выявившим характерные изменения полос поглощения функциональных групп полимеров. В ходе работы определены морфологические характеристики полученных полимерных плёнок методом оптической микроскопии и физико-механические характеристики при растяжении. Показано, что оптимальные свойства плёночного материала достигаются при массовом соотношении гиалуроновой кислоты и хитозана 1:7 и последовательности нанесения слоёв HA-Na → CH. Установлено, что увеличение толщины плёнки за счёт повышения объёма наносимых слоев приводит к существенному росту прочностных характеристик и относительного удлинения. Полученные результаты свидетельствуют о возможности целенаправленного регулирования свойств двухслойных плёнок на основе гиалуроната натрия и хитозана путём варьирования технологических параметров, что делает разработанные материалы перспективными для использования в качестве биомедицинских плёночных матриксов при травмах и повреждениях.

Ключевые слова: полиэлектролитный комплекс, гиалуронат натрия, хитозан, двухслойные плёнки, морфология поверхности, раневые покрытия.

Снежана А. Глебская студент, центр химической инженерии, Национальный исследовательский университет ИТМО, пр-т Кронверкский, 49, г. Сакнт-Петербург, 19710, Россия, glebskaia@itmo.ru

https://orcid.org/0009-0000-3691-2544

Мария С. Давлетшина студент, центр химической инженерии, Национальный исследовательский университет ИТМО, пр-т Кронверкский, 49, г. Сакнт-Петербург, 19710, Россия, 2006vfienrf2006

https://orcid.org/0009-0002-4906-0787

Майя В. Успенская д.т.н., профессор, институт химии, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7-9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия, mv_uspenskaya@mail.ru

https://orcid.org/0000-0003-2510-2639

Татьяна Н. Грибиниченко аспирант, центр химической инженерии, Национальный исследовательский университет ИТМО, пр-т Кронверкский, 49, г. Сакнт-Петербург, 19710, Россия, tngribinichenko@itmo.ru

https://orcid.org/0009-0004-1170-8036

Анна Д. Доронина студент, центр химической инженерии, Национальный исследовательский университет ИТМО, пр-т Кронверкский, 49, г. Сакнт-Петербург, 19710, Россия, annadoronina1218

https://orcid.org/0009-0007-1169-0405

Роман О. Олехнович к.т.н., доцент, институт химии, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7-9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия, r.o.olekhnovich@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-6894-1224

Приветствуется подача статей онлайн! Адрес: http://vestnik.vsuet.ru/

Требования к оформлению материалов для журнала «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий»

Редакция просит авторов в подготовке рукописей руководствоваться изложенными ниже правилами. Рукописи, оформленные без соблюдения данных правил, редакцией рассматриваться не будут.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РУКОПИСЕЙ И ЗАЯВЛЕНИЕ НА РАССМОТРЕНИЕ

Представление рукописи в журнал *«ВЕСТНИК ВГУИТ»* для печати предполагает, что:
1) описанная в ней работа ранее не была опубликована;

2) она не рассматривается для публикации в ином издательстве;

3) ее публикация была одобрена всеми авторами и так или иначе взаимосвязанными организациями, в которых эта работа проводилась;

4) в случае принятия к публикации эта статья не будет опубликована где-либо еще в той же форме, на английском или на любом другом языке, в том числе и в электронном виде.

Представление статьи проводят через официальный сайт издания путем прохождения регистрации (http://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/user/register).

В состав электронной версии статьи должны входить:

1. Рукопись статьи оформленная строго в шаблоне редакции в формате Word 2007–2016. Word 2003 – **НЕ Принимается**
2. табличный материал в виде отдельного файла (**только при условии** когда объем одной таблицы превышает полную страницу журнальной статьи)
3. иллюстрации **в исходном формате данных с возможностью редактирования (программах для черчения/рисования/создания диаграмм и прочее, ТО ЕСТЬ НЕ сохранен в формате с потерей качества)** предпочтение, при этом отдается векторным форматам: **eps, svg, ai, pdf,** растровый формат изображений (с сжатием): форматы **png, jpeg и пр.** не прикреплять**.** Минимальное разрешение рисунков и графиков **600 dpi. Это требование необходимо для повышения типографского качества печатной версии издания.**

Если авторов несколько, то необходимо указать автора, которому будет адресована корреспонденция, и его контактные данные: адрес, номер телефона/факса, а также адреса электронной почты всех авторов.

ВНИМАНИЕ: Авторы несут полную ответственность за достоверность и оригинальность информации, предоставленной в рукописи. Все рукописи проходят проверку на наличие заимствований в системе «Антиплагиат». Оригинальность рукописи должна быть не менее 80%, в противном **случае рукопись будет возвращена без права опубликования. При обнаружении нарушения авторских прав или плагиата будет проведена ретракция опубликованных статей в соответствии с правилами COPE.**

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

Статьи в журнале *«ВЕСТНИК ВГУИТ»* издаются на русском языке с реферат на английском языке. По согласованию с редакцией допускается публикация статьи и на английском языке.

Вся статья (текст, таблицы, примечания, заголовки, иностранные вставки, список литературы, подрисуночные подписи и др.) набирается на компьютере в соответствии со стилями форматирования **шаблона журнала** для MS Word **2007-2016**.

Версия статьи выполненная средствами MS Word 2003 **НЕ принимаются**.

Объем статьи, включая список литературы и подрисуночные подписи, не должен превышать: для работ, имеющих общее значение 5–20 страниц текста, для кратких сообщений до 3 стр.

Приветствуется подача статей онлайн! Адрес: http://vestnik.vsuet.ru/

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ СТАТЬИ

I. *ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ*

Рукописи оригинальных исследований представляются по общепринятой международной схеме (IMRAD format - Introduction, Methods, Results and Discussion) и в статье должны найти отражение следующие рубрики:

Введение - кратко излагается современное состояние вопроса и обосновывается актуальность исследования. Дается критическая оценка литературы, имеющей отношение к рассматриваемой проблеме. Данная оценка разграничивает нерешенные вопросы. Ставятся четко сформулированные цели и задачи, поясняющие дальнейшее исследование в конкретной области;

Материалы и методы - дается достаточно подробное описание работы, для ее возможного воспроизведения. Методы, опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками: автором описываются только относящиеся к теме изменения.

Результаты - описываются в логической последовательности в виде отдельных фрагментов, разделенных подзаголовками, без элементов обсуждения, без повторения методических подробностей, без дублирования цифровых данных, приведен-ных в таблицах и рисунках.

Обсуждение - в разделе проводится детальный анализ полу-ченных данных в сопоставлении с данными ли-тературы, что служит обоснованием выводов и заключений авторов.

Заключение - подводятся основные итоги работы, приводятся рекомендации и указание на дальнейшие возможные направления исследований.

Для обзорных статей должны быть указаны *Введение* и в соответствии со стандартом PRISMA указать **стратегию поиска литературы** (http://www.prisma-statement.org).

Таблицы объема больше одной страницы указывать как **Приложение в виде отдельного файла**, так как они не будут опубликованы в печатной версии, а будут прикладываться в виде отдельного файла к электронной версии.

Названия и содержание рисунков (все подписи внутри) и таблиц (столбцов и строк) должны быть приведены как на русском, так и на английском языках.

Графический материал представляется в исходном формате данных с возможностью редактирования (программах для черчения/рисования/создания диаграмм и прочее, ТО ЕСТЬ НЕ сохранен **в формате с потерей качества) предпочтение, при этом отдается векторным форматам: eps, svg, ai, pdf, исключение фотографии в растровом формате (с сжатием): png, jpeg и пр.** Минимальное разрешение рисунков и графиков **600 dpi.**

Файлы Excel -- внедрены в текст статьи, с возможностью редактирования.

II. *БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES*

Список литературы оформляется согласно Приложению 1, 2.

Цитируемая литература должна содержать **не менее 20** источников, и **не менее 5** ссылок на иностранные источники. В списке литературы должны быть опубликованы **работы за последние пять лет,** в том числе в журналах, индексируемых в базах данных ***ScienceDirect, Web of Science, Scopus, Science Index***. Лишь в случае необходимости допустимы ссылки на более ранние труды. Справочная литература не старше 10 лет.

В список литературы **НЕ включаются** учебные пособия, нормативные и архивные материалы, статистические сборники, газетные заметки без указания автора, монографии, авторефераты и диссертации. В цитируемой литературе желательно указывать источники с **DOI.**

Вместо ссылок на материалы диссертаций и авторефератов диссертаций, рекомендуется ссылаться на оригинальные статьи по теме диссертационной работы, так как сами диссертации рассматриваются как рукописи и не являются печатными источниками.

Самоцитирование **НЕ более** 2-х ссылок.

Приветствуется подача статей онлайн! Адрес: http://vestnik.vsuet.ru/

III. ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА

Статьи, принимаемые к публикации в журнале *«ВЕСТНИК ВГУИТ»*, должны излагать наиболее существенные, законченные и еще ранее неопубликованные результаты научных исследований.

О публикационной этике и этических нормах для публикации в журнале *«ВЕСТНИК ВГУИТ»* см.: http://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/about/editorialPolicies#custom-2

Журнал «Вестник ВГУИТ» выходит 4 раза в год: № 1 – март; № 2 – июнь; № 3 – сентябрь; № 4 – декабрь.

Статья должна быть тщательно проверена и подписана всеми авторами.

К статье должны прилагаться сопроводительные документы:

- сопроводительное письмо;
- экспертное заключение;
- положительная рецензия ведущего ученого в данной области или члена редакционной коллегии серии, заверенная подписью и печатью.

Вопрос об опубликовании статьи, ее отклонении решает редакционная коллегия журнала и ее решение является окончательным. В случае возвращения статьи для исправления датой представления считается день получения исправленного текста. Срок доработки - не более 1 месяца.

Материалы, не соответствующие данным требованиям оформления, к публикации не принимаются. Рукописи авторам не возвращаются.

Плата с аспирантов и докторантов за публикацию рукописей не взимается.

IV. КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Информацию о стоимости публикации можно узнать в редакции журнала. Также редакция оказывает платные услуги профессионального перевода реферата и ключевых слов на английский язык.

По всем интересующим Вас вопросам обращаться в редакцию журнала по контактам:

Дерканосова Анна Александровна - кандидат технических наук, доцент кафедры Сервиса и ресторанного бизнеса, начальник Центра коллективного пользования «Контроль и управления энергоэффективными проектами»

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»
Телефон: 8 920 432 16 57
E-mail: post@vestnik-vsuet.ru, aa-derk@yandex.ru
Адрес 394000, г. Воронеж, пр. Революции, 19, ауд. 11.

Соответствие рубрик/разделов журнала Вестник ВГУИТ
Номенклатуре научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

1.1 Процессы и аппараты пищевых производств

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

1.2 Пищевая биотехнология

4.3.3. Пищевые системы (технические науки)
4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

2. Химическая технология

2.6.7. Технология неорганических веществ (технические науки)
2.6.7. Технология неорганических веществ (химические науки)
2.6.10. Технология органических веществ (химические науки)
2.6.10. Технология органических веществ (технические науки)
2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (химические науки)
2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ (технические науки)
2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (физикоматематические науки)

Приветствуется подача статей онлайн! Адрес: http://vestnik.vsuet.ru/

Приложение 1

ПОРЯДОК ОПИСАНИЯ ССЫЛОК НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

СТАТЬЯ В ЖУРНАЛЕ:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Буянова И.В., Имангалиева Ж.К. Агрегат для тонкого измельчения творога // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 23–26.

(кол-во авторов более 4):

Семенов Е.В., Бабакин Б.С., Воронин М.И., Белозёров А.Г. и др. Математическое моделирование процесса охлаждения хладоносителя системой замороженных шаров // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 74–79.

СТАТЬЯ В ЖУРНАЛЕ С DOI:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Илюхина Н.В., Колоколова А.Ю. Закономерности ингибирования культуры *Salmonella* // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 209–212. doi: 10.20914/2310-1202-2018-4-209-212

(кол-во авторов более 4):

Шарова Н.Ю., Принцева А.А., Манжиева Б.С., Выборнова Т.В. и др. Ферменты гидролитического действия в технологиях переработки некондиционного крахмалсодержащего сырья // Пищевая промышленность. 2019. № 4. С. 115–117. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10058

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ:

Содержание и технологии образования взрослых: проблема опережающего образования: сб. науч. тр. / Институт образования взрослых Рос. акад. образования; под ред. А.Е. Марона. М.: ИОВ, 2007. 118 с.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ, ФОРУМОВ, СОВЕЩАНИЙ, СЕМИНАРОВ:

Цветкова И.И., Сводцева И.А. Индикаторный подход к оценке кадровой безопасности в системе экономической безопасности предприятия // Устойчивое развитие социально-экономической системы Российской Федерации: мат. XVII науч.-практ. конф., Гурзуф, Ялта, 04 декабря 2015 г. Симферополь: Ариал, 2016. С. 110–112.

КНИГА, МОНОГРАФИЯ:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Румянцева З.П. Менеджмент организаций. М.: Инфра-М, 2015. 432 с.

(кол-во авторов более 4):

Антипова Л.В., Сторублевцев С.А., Успенская М.Е., Попова Я.А. и др. Комплексная переработка кроликов: традиции и инновации: монография. Воронеж, 2017. 377 с.

ДИССЕРТАЦИЯ

Пономаренко Ю.А. Нетрадиционные корма и биологически активные вещества в рационах цыплят-бройлеров и кур-несушек: дис… д-ра с.-х. наук. Сергиев Посад: ВНИТИП, 2017. 437 с.

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ:

Ушакова А.С. Разработка комплексной технологии переработки сушеного плодово-ягодного сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово: Кемер. технол. ин-т пищевой пром., 2017. 22 с.

НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ ДОКУМЕНТЫ:

порядок описания:

Заглавие официального документа: сведения, относящиеся к заглавию (указ, постановление), Дата принятия документа / Название издания. Год издания. Количество страниц.

пример:

ГОСТ 5900–2014. Изделия кондитерские. Определение массовой доли влаги и сухих веществ. М.: Стандартинформ, 2015. 8 с.

ПАТЕНТ:

порядок описания:

Обозначение вида документа, номер, название страны, индекс международной классификации изобретений. Название изобретения / И.О.Фамилия изобретателя, заявителя, патентовладельца; Наименование учреждения-заявителя. Регистрационный номер заявки; Дата подачи; Дата публикации, сведения о публикуемом документе.

пример:

Пат. № 2689672, RU, A23L 5/00. Способ комплексной переработки семян сои с выделением белоксодержащих фракций / Четверикова И.В., Шевцов А.А., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. № 2018107149; Заявл. 26.02.2018; Опубл. 01.07.2019. Бюл. № 19.

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕСУРС:

порядок описания:

Фамилия И.О. автора (если указаны). Название ресурса. Место издания: Издательство, год издания (если указаны). Адрес локального сетевого ресурса.

пример:

Лапидус Л.В. Центр компетенций цифровой экономики. Ассоциация граждан и организаций по содействию развитию корпоративного образования. URL: http://www.makonews.ru/centr-kompetencij-cifrovoj-ekonomiki/

Приветствуется подача статей онлайн! Адрес: http://vestnik.vsuet.ru/

Приложение 2

ПОРЯДОК ОПИСАНИЯ ССЫЛОК НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ:

СТАТЬЯ ИЗ ЖУРНАЛА:

порядок описания:

Фамилия И.О. автора (транслитерация). Перевод названия статьи на английский. Перевод названия источника на английский язык. Год, том, номер, страницы (от-до). Указание на язык статьи (in Russian) после описания статьи.

пример:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Buyanova I.V., Imangalieva Zh.K. A unit for fine grinding of cottage cheese. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. no. 3. pp. 23–26. (in Russian).

(кол-во авторов более 4):

Semenov E.V., Babakin B.S., Voronin M.I., Belozerov A.G. et al. Mathematical modeling of the process of cooling a coolant with a system of frozen balls. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. no. 4. pp. 74–79. (in Russian).

СТАТЬЯ С DOI:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Ilyukhina N.V., Kolokolova A.Yu. Patterns of Inhibition of Salmonella Culture. Bulletin of the Voronezh State University. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 209–212. doi: 10.20914 / 2310-1202-2018-4-209-212 (in Russian).

(кол-во авторов более 4):

Sharova N.Yu., Printseva A.A., Manzhieva B.S., Vybornova T.V. et al. Hydrolytic enzymes in the processing of substandard starch-containing raw materials. Food Industry. 2019. no. 4. pp. 115–117. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10058 (in Russian).

СТАТЬЯ ИЗ ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. Journal of Computer Mediated Communication. 1999. vol. 5. no. 2. Available at: http://www. ascusc.org/ jcmc/vol5/ issue2/

СТАТЬЯ ИЗ ПРОДОЛЖАЮЩЕГОСЯ ИЗДАНИЯ (СБОРНИКА ТРУДОВ):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Experimental study of the strength of joints “steel-composite”. Proc. of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”. 2006. no. 593. pp. 125–130. (in Russian).

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ:

Tsvetkova I.I., Svodtseva I.A. An indicator approach to the assessment of personnel security in the system of economic security of an enterprise. Sustainable development of the socio-economic system of the Russian Federation. Simferopol, Arial, 2016. pp. 110–112. (in Russian).

КНИГИ (МОНОГРАФИИ, СБОРНИКИ):

(кол-во авторов от 1 до 4):

Rumyantseva Z.P. Management of organizations: a monograph. Moscow, Infra-M, 2015. 432 p. (in Russian).

(кол-во авторов более 4):

Antipova L.V., Storublevtsev S.A., Uspenskaya M.E., Popova Ya.A. et al. Complex processing of rabbits: traditions and innovations: a monograph. Voronezh, 2017. 377 p. (in Russian).

ДИССЕРТАЦИЯ ИЛИ АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ:

Ushakova A.S. Development of a comprehensive technology for processing dried fruit and berry raw materials. Kemerovo, Kemer. Technol. Institute of Food Industry, 2017. 22 p. (in Russian).

ГОСТ:

State Standard 5900–2014. Confectionery products. Determination of the mass fraction of moisture and dry matter. Moscow, Standartinform, 2015. 8 p. (in Russian).

ПАТЕНТ:

Chetverikova I.V., Shevtsov A.A., Tkach V.V., Serdyukova N.A. The method of complex processing of soybean seeds with the allocation of protein-containing fractions. Patent RF, no. 2689672, 2019.

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕСУРС:

Lapidus L.V. Center of competence of digital economy. Association of citizens and organizations for the development of corporate education. Available at: http://www.makonews.ru/centr-kompetencij-cifrovoj-ekonomiki / (in Russian).

List of requirements of drowing up materials in «Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies»

Editorial Board asks the authors to stick to the following rules in writing the papers, otherwise they may be rejected. Submitting the manuscripts for the review.

Submitting the article for publication in the journal "Proceedings of the VSUET" includes: the paper has not been previously published; it is not being considered for publication in another publishing house; its publication has been approved by all authors and interlinked organizations in which this work was carried out; in case of the approval for publication the paper will not be published elsewhere in the same form, in English or any other language, including electronic form.

Submission form (application) for the publication of an article in a journal, filled up in accordance with the rules, should be sent to the following address: **19, Revolution av., 11 Voronezh 394000 Russia** and the electronic version of the paper with an attached manuscript file to an e-mail address vestnikvgta@mail.ru**.** Should specify the name of the first author of the article in the subject.

The electronic version of the paper should include: a file containing the text of the article, illustrations, tabular material in a separate file (if the amount of one table exceeds full page) and illustration (files in original format), preference is given to vector formats: eps, svg, ai, pdf.

If there are several authors, you must specify contact details of the authors to whom correspondence shall be addressed: address, phone / fax numbers and e-mail addresses.

The manuscript must be accompanied by a review from a specialist in this field, certified by signature and stamp.

Online application form is also available. The author can use the official website of the journal by completing registration at http://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/user/register).

All articles received by the editorial board of the journal "Proceedings of the VSUET", are subject to mandatory unilateral anonymous ("blind") review (the authors do not know the names of reviewers of the manuscript, and will receive a letter with comments, signed by the chief editor).

After passing the review procedure and the approval of an article for publication, the authors' names and their listed order cannot be changed (addition, deletion, rearrangement). When submitting the final version of the article, please make sure that the list of authors is a complete and listed in a proper order.

ATTENTION: The author is solely responsible for the accuracy and originality of the information provided in the article. All manuscripts are checked for the presence of borrowings using "Antiplagiat" system. All manuscripts are tested with ANTIPLAGIAT for testing electronic documents for originality and reveal plagiarisms. The manuscript must comprise at least 80% of originality; otherwise the manuscript will be returned without the right to be published. Upon detection of copyright infringement or plagiarism in already published articles, they will be invalidated in accordance with the rules of COPE.

Requirements for structure of the paper

Articles in the journal "Proceedings of the VSUET" are published in Russian with English summary. In agreement with the editors, the publication may be done entirely in English.

By agreement, the editors accept publication of the article in English.

Full article (tables, text, footnotes, headers, inserts in a foreign language, references, captions, etc..) must be typed on a computer: in accordance with journal template formatting styles for MS Word 2007-2016..

The volume of the article, including references and captions must not exceed: for work of a common significance: from 5 to 20 pages, for news reports to 3 pages.

The manuscript should be structured to the following plan:

- *Type of article (original article, review article, short message or letter);*
- *UDC (Universal Decimal classification);*
- *DOI - numeric identifier (provided by the editors available for an extra fee);*
- *Full title of the article;*

- *First name (full), patronymic name (initials) and surname (full) of the author (s) e-mail;*
- *Name of the department (for a university) / laboratory (for Scientific Research Institute), the full name of the workplace, city, country;*
- *Abstract;*
- *Keywords;*
- *For reference (filled automatically);*
- *Structured text of the article;*
- *Thanks / acknowledgements;*
- *List of resources used (bibliography);*
- *Information about the authors;*
- *Contribution;*
- *Conflict of interest.*

The English version of the article title, first name, patronymic initial and last name of the authors, the full names of all workplaces, structured summaries and keywords must be given below a resume and keywords in Russian.

The editors reserve the right to correct the translation. It is recommended to take the help of a professional translator to avoid mistakes in compiling the English version of resume.

REQUIREMENTS TO THE CONTENT

I THE TITLE PAGE INCLUDES:

Article type

UDK

DOI:

TITLE OF THE ARTICLE. Title of work should be as short as possible (no more than 120 characters), and should accurately reflect its content. It is important to avoid titles in the form of interrogative sentences, as well as titles with an ambiguous meaning. Must use only standard abbreviations (acronyms).Must not use acronyms in the title. Full term should precede the first use of the acronym in the text.

FIRST NAME (FULL), PATRONYMIC (INITIAL) AND SURNAME (FULL) OF AUTHOR (S).

For example: **Aleksey D. Ivanov[1],**

Ivan A. Petrov[2]

FULL NAME OF ALL ORGANIZATIONS to which the authors are related. If the authors work in different institutions, the relationship of each author with his organization should be shown by using uppercase numbers, for example:

Example: Department (Laboratory), University (scientific research institute), city, country.

II. THE MAIN TEXT OF THE ARTICLE

The manuscripts of original research are submitted under the standard international scheme (IMRAD format - Introduction, Methods, Results and Discussion) and article should reflect the following headings:

Introduction - outlines the current state of the problem and the urgency of the study. It is necessary to give a critical assessment of the literature related to the issue. This assessment differentiates outstanding issues. Clear defined goals and objectives must be determined, explaining further research in a particular area;

Materials and methods - a fairly detailed description of the work is given. Previously published methods should be accompanied by a reference note: the author describes the changes related to the subject.

The results and discussion - the results should be clear and concise. Give a convincing explanation of the results and their significance so as the reader can not only independently assess the methodological advantages and disadvantages of the study, but also replicate if necessary.

Conclusion summarizes the main results of the research. The author gives recommendations and guidance on possible areas of further research.

The name and contents of figures and tables (rows and columns) should be given as in both Russian and English languages.

III ACKNOWLEDGEMENTS:

(when available - in Russian and English). The author should list persons, organizations, foundations, etc., who contributed help for a research, work and so on. (E.g. financial aid, language (linguistic) aid assistance in writing articles or editing proofreading , etc.)

IV. *REFERENCES*

Cited bibliography must contain at least 10 sources. Self-citations are allowed no more than 20 percent. At least 50 percent of the sources from the bibliography should be published in the last five years, including in the journals indexed in databases ***ScienceDirect, Web of Science, Scopus, Science Index***. Only in case of need the references to earlier works are allowed. The bibliography does not include textbooks, regulatory and archival materials, statistical collections, newspaper notes without the author's name, monographs, abstracts and theses. In the cited literature, it is desirable to specify the sources with **DOI**.

Bibliography (list of resources) is presented in two ways:

1. Russian along with foreign sources in accordance with GOST 7.0.5-2008 (All Union State standard).

2. Transliterated in the Latin alphabet with the translation of source publications into English for the international identification system.

Style of links (references):

In the article, the number of a link is enclosed in square brackets and placed in line with the text. You can give the names of the authors, but the number(s) of the references must always be present. The reference numbers (numbers in brackets) shall be in the reference list in the order in which they appear in text.

Example:

«... as shown [3; 6] or Barnaby and Jones [8] obtained a different result ... "

The author is solely responsible for the accuracy of bibliographic sources, including the English translation.

1. Russian version - in accordance with ***Appendix 1, 2***

References in the Russian version of the article are given in the original language. All references should be made uniformly: only a dot (full stop) without dashes between the parts of description. Symbols № and & are not used; for a number you should use Latin letter N with no point after it; double slash separates the description of a larger document, which refers to the fragment. You should not put dot (full stop) before the double slash // but spaces before and after the double slash // are required.

2. The English (REFERENCES) - in accordance with Harvard standard:

References in English are primarily necessary to track cited authors and journals. The correct description of the sources used in reference lists is the guarantee that the quoted publication will be taken into account when assessing the scientific work of its authors, and thus the organization, region and country. Quoting a journal determines its scientific level, the credibility, the effectiveness of its Editorial Board, etc.

The names of sources and works are specified in full, without abbreviations. The titles of monographs, collections of articles and conferences are transliterated into Latin alphabet, followed by an English translation in brackets. The website *http://www.translit.ru/* can be used for free transliteration of Russian text in Latin letters (version of BSI).

In the bibliography **(English version), it is not allowed** to use separating characters ***«//», «–»*** and ***«№»***

Instead of references to materials of theses and abstracts, it is recommended to include references to the original articles on the subject of the thesis, as the theses themselves are viewed as the manuscripts and are not printed sources.

VI. BASIC ETHICAL PRINCIPLES

Articles accepted for publication in the journal "Proceedings of the VSUET" must reveal the most significant, complete and previously unpublished research results.

To learn more on publication ethics and ethical standards for publication in the journal "Proceedings of the VSUET" please visit the website.: *http://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/about/editorialPolicies#custom-2*

The magazine «the Messenger ВГУИТ» leaves 4 times a year: № 1 – March; № 2 – June; № 3 – September; № 4 – December.

The article must be thoroughly checked and signed by all the authors. Name, middle name, last name, address, science degree, position, place of work, telephone number (office and home) E-mail, the person communicate to are pointed out on a separate sheet of paper.

Accompanying deeds should be applied on paper:

- The transmittal letter;
- An extract from the report of faculty meeting with paper recommendation for printing;
- The positive review of the leading scientist in the given area or a member of an editorial board of the series, authenticated by the signature and printing.

The question on paper publication, its deviation is solved by an editorial board of the log and ee the solution is definitive. In case of refund of paper for correction by representation date it is considered day of reception of the corrected text. Finishing term - no more than 1 month.

The materials mismatching given demands of registration, to the publication are not accepted. Manuscripts are not refunded to authors.

The pay for the publication of manuscripts is not raised from post-graduate students

VII. CONTACT INFORMATION

scientific and public journal "Proceedings of the VSUET"

If you have any questions, please contact the editorial office:

Anna A. Derkanosova - Ph.D., associate professor of department of Service and restaurant business, Head of the Centre for collective use "Control and management of energy efficient projects"

FSBEE HE "Voronezh state university of engineering technologies"

Tel.: 8 920 432 16 57

E-mail: vestnikvgta@mail.ru, aa-derk@yandex.ru

Address: 19, Revolution av., 11 Voronezh 394000 Russia

Appendix 1

ORDER OF DESCRIPTION OF LINKS IN RUSSIAN

JOURNAL ARTICLE:

(number of authors from 1 to 4):

Buyanova I.V., Imangalieva Zh.K. A unit for fine grinding of cottage cheese // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. № 3. P. 23–26.

(number of authors more than 4):

Semenov E.V., Babakin B.S., Voronin M.I., Belozerov A.G. et al. Mathematical modeling of the process of cooling a coolant with a system of frozen balls // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. № 4. P. 74–79.

ARTICLE WITH DOI:

(number of authors from 1 to 4):

Ilyukhina N.V., Kolokolova A.Yu. Patterns of Inhibition of *Salmonella* Culture // Bulletin of the Voronezh State University. 2018.V. 80. № 4. P. 209–212. doi: 10.20914 / 2310-1202-2018-4-209-212

(number of authors more than 4):

Sharova N.Yu., Printseva A.A., Manzhieva B.S., Vybornova T.V. et al. Hydrolytic enzymes in the processing of substandard starch-containing raw materials // Food Industry. 2019. № 4. P. 115–117. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10058

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS:

The content and technology of adult education: the problem of advanced education: collection of scientific papers / Institute for Adult Education Ros. Acad. education; under the editorship of A.E. Marona. M.: JOB, 2007.118 p.

MATERIALS OF CONFERENCES, FORUMS, MEETINGS, SEMINARS:

Tsvetkova I.I., Svodtseva I.A. An indicator approach to the assessment of personnel security in the system of economic security of an enterprise // Sustainable development of the socio-economic system of the Russian Federation: mat. XVII scientific and practical. conf., Gurzuf, Yalta, December 4, 2015. Simferopol: Arial, 2016. P. 110–112.

BOOK, MONOGRAPH:

(number of authors from 1 to 4):

Rumyantseva Z.P. Management of organizations. M.: Infra-M, 2015.432 p.

(number of authors more than 4):

Antipova L.V., Storulevtsev S.A., Uspenskaya M.E., Popova Y.A. et al. Integrated processing of rabbits: traditions and innovations: a monograph. Voronezh, 2017. 377 p.

DISSERTATION:

Ponomarenko Yu.A. Unconventional feeds and biologically active substances in the diets of broilers and laying hens: dis ... Dr. S.-kh. sciences. Sergiev Posad: VNITIP, 2017.443 p.

SUMMARY OF THE DISSERTATION

Ushakova A.S. Development of a comprehensive technology for processing dried fruit and berry raw materials: abstract of the diss....cand. tech. sciences. Kemerovo: Kemer. technol. Institute of Food Industry, 2017.22 p.

REGULATORY DOCUMENTS:

description order:

Title of an official document: information related to the title (decree, resolution), Date of adoption of the document / Title of publication. The year of publishing. Number of pages.

example:

GOST 5900–2014. Confectionery. Determination of the mass fraction of moisture and solids. M.: Standartinform, 2015. 8 p.

PATENT:

description order:

Designation of the type of document, number, name of the country, index of international classification of inventions. Title of invention / name of inventor, applicant, patent holder; Name of applicant institution. Registration number of the application; Date of application; Date of publication, information about the published document.

example:

7 Pat. no. 2689672, RU, A23L 5/00. The method of complex processing of soybean seeds with the allocation of protein-containing fractions / Chetverikova I.V., Shevtsov A.A., Tkach V.V., Serdyukova N.A. no. 2018107149; Appl. 26.02.2018; Publ. 01.07.2019. Bull. Number 19.

ELECTRONIC RESOURCE:

Lapidus L.V. Center of competence of digital economy. Association of citizens and organizations for the development of corporate education. URL: http://www.makonews.ru/centr-kompetencij-cifrovoj-ekonomiki/

Appendix 2

ENGLISH LANGUAGE DESCRIPTION PROCEDURE:

JOURNAL ARTICLE:

description order:

Surname I.O. author (transliteration). Translation of the title of the article into English. Translation of the source name into English. Year, volume, number, pages (from-to). An indication of the language of the article (in Russian) after the description of the article.

example**:**

(number of authors from 1 to 4):

Buyanova I.V., Imangalieva Zh.K. A unit for fine grinding of cottage cheese. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. no. 3. pp. 23–26. (in Russian).

(number of authors more than 4):

Semenov E.V., Babakin B.S., Voronin M.I., Belozerov A.G. et al. Mathematical modeling of the process of cooling a coolant with a system of frozen balls. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. no. 4. pp. 74–79. (in Russian).

ARTICLE WITH DOI:

(number of authors from 1 to 4):

Ilyukhina N.V., Kolokolova A.Yu. Patterns of Inhibition of Salmonella Culture. Bulletin of the Voronezh State University. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 209–212. doi: 10.20914 / 2310-1202-2018-4-209-212 (in Russian).

(number of authors more than 4):

Sharova N.Yu., Printseva A.A., Manzhieva B.S., Vybornova T.V. et al. Hydrolytic enzymes in the processing of substandard starch-containing raw materials. Food Industry. 2019. no. 4. pp. 115–117. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10058 (in Russian).

ARTICLE FROM ELECTRONIC JOURNAL:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. Journal of Computer Mediated Communication. 1999. vol. 5. no. 2. Available at: http://www. ascusc.org/ jcmc/vol5/ issue2/

ARTICLE FROM CONTINUING PUBLICATIONS (PROCEEDINGS):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Experimental study of the strength of joints “steel-composite”. Proc. of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”. 2006. no. 593. pp. 125–130. (in Russian).

CONFERENCE MATERIALS:

Tsvetkova I.I., Svodtseva I.A. An indicator approach to the assessment of personnel security in the system of economic security of an enterprise. Sustainable development of the socio-economic system of the Russian Federation. Simferopol, Arial, 2016. pp. 110–112. (in Russian).

BOOK, MONOGRAPH:

(number of authors from 1 to 4):

Rumyantseva Z.P. Management of organizations: a monograph. Moscow, Infra-M, 2015. 432 p. (in Russian).

(number of authors more than 4):

Antipova L.V., Storublevtsev S.A., Uspenskaya M.E., Popova Ya.A. et al. Complex processing of rabbits: traditions and innovations: a monograph. Voronezh, 2017. 377 p. (in Russian).

DISSERTATION OR SUMMARY OF THE DISSERTATION:

Ushakova A.S. Development of a comprehensive technology for processing dried fruit and berry raw materials. Kemerovo, Kemer. Technol. Institute of Food Industry, 2017. 22 p. (in Russian).

GOST:

State Standard 5900–2014. Confectionery products. Determination of the mass fraction of moisture and dry matter. Moscow, Standartinform, 2015. 8 p. (in Russian).

PATENT:

Chetverikova I.V., Shevtsov A.A., Tkach V.V., Serdyukova N.A. The method of complex processing of soybean seeds with the allocation of protein-containing fractions. Patent RF, no. 2689672, 2019.

ELECTRONIC RESOURCE:

Lapidus L.V. Center of competence of digital economy. Association of citizens and organizations for the development of corporate education. Available at: http://www.makonews.ru/centr-kompetencij-cifrovoj-ekonomiki / (in Russian).