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

2025, Том. 87, № 3

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1938 ГОДУ
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

Воронеж
2025

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. 87, No. 3

SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL

FOUNDED IN 1938
COMES 4 TIMES PER YEAR

Voronezh
2025

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)

ГОЛУБЕВА ЛЮБОВЬ ВЛАДИМИРОВНА доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Россия)

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 08.09.2025. Подписано в печать 22.09.2025
Выход в свет: 30.09.2025
Усл. печ. л. 42,41 Тираж 1500 экз. Заказ.
Цена – свободная.

© ФГБОУ ВО «Воронеж. гос. ун-т инж. технол.», 2025

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

GOLUBEVA, LIUBOV VLADIMIROVNA doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of the Higher School of Russia, Professor of the Department of technology of animal origin products, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia)

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 08.09.2025. Signed to print 22.09.2025
The publication:30.09.2025
Conditional Print l. 42,41 Circulation 1500 copies.
Price - Free.

© FSBEI HE
"Voronezh State University
of Engineering
Technologies ", 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Цапкина Н.И., Остриков А.Н., Копылов М.В., Богомолов И.С. Исследование кинетики трехстадийной переработки соапстоков растительных масел **13**

Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Панина Е.В. Анализ пищевых предпочтений потребителей в отношении мясных продуктов обогащенного состава **20**

Буянова И.В., Коновалов С.А., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Методические аспекты выработки биологически полноценного йогурта **29**

Копылов М.В., Дерканосова А.А., Умарханов Р.У., БерестовоймА.А., Торшина А.А. Исследование кинетических закономерностей процесса получения белков из шрота подсолнечника **37**

Домбровская Я.П., Шевцов А.А., Дранников А.В. Теплонасосное энергоснабжение флюидной технологии получения сухих СО2- экстрактов из травы зверобоя **44**

Фиалков Д.М., Пойманов В.В., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Использование магнитной обработки молочного сырья при производстве сычужных сыров **50**

Антипова Л.В., Ибрагимова О.Т., Плотников В.Е., Плотникова И.В. Изменение химического состава высокобелковых бобовых культур при проращивании и технологические возможности их применения в функциональных пищевых системах **56**

Жаркова И.М., Иванчиков Д.С. Биологически активные пептиды хлеба: источники, пути образования, свойства (мини-обзор) **66**

Аль-Сухайми С.А., Тошева З.А., Воробьева В.А., Коломиец Л.Д., Горшенина С.П., Лямина А.А. Оценка антиоксидантной, антимикробной активности растительного сырья и применение в пищевой промышленности **78**

Ивкова И.А., Коновалов С.А., Екимова А.А., Дерканосова А.А., Пойманов В.В., Полянский К.К. Разработка и определение показателей качества и безопасности сливочно-растительного спреда в сублимированной форме для специализированного питания **87**

Овсянников В.Ю., Ключников А.И., Прибытков А.В. Практическое обоснование способа регенерации щелочного моющего раствора пивоваренного производства с использованием флокулянтов **96**

Ткешелашвили М.Е., Бобожонова Г.А., Магомедов Г.О. Разработка рецептуры и технологии печенья для геродиетического питания **104**

Сергазиева О. Д., Климук А.А., Царьков М.Д. Технологические и биохимические свойства рыбных филе и фаршей из гибридов африканского клариевого сома для производства пищевых рыбопродуктов **113**

Шариков А.Ю., Голубев А.А., Соколова Е.Н., Амелякина М.В., Ионов В.В., Иванов В.В. Влияние зерно-черносмородиновой барды на свойства экструдированных кукурузно -рисовых хлебцев **122**

Кулигин Д.Р., Чусова А.Е., Новикова И.В., Муравьев А.С., Зуева Н.В., Левашов А.С. Особенности технологии пивных напитков с использованием нетрадиционного сырья **129**

Родионова Н.С., Выродов Д.М. Перспективы применения продуктов глубокой переработки амаранта в технологиях резилиенс-продуктов **135**

Плотников В.Е., Магомедов М.Г., Суханов П.Т., Плотникова И.В., Полянский К.К., Скосарь Д.Е. Антипитательные факторы зернобобовых культур: качественный и количественный анализ танинов в чечевице и продуктах ее переработки **141**

Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Куцова А.Е., Косенко И.С. Разработка варено-копченых колбасных изделий с использованием растительных белково-углеводных комплексов **153**

Антипова Л.В., Болдырева М.С., Кумалагова З.Х. Исследование пищевой ценности, качества и безопасности оригинальных мясных изделий с использованием побочных продуктов убоя кроликов **162**

Шаповалова П.Н., Нугманов А.Х., Масловский С.А., Осмоловский П.Д., Одинцова А.А. Перспективная технология получения пищевой клетчатки из корневого цикория **170**

Съедугина А.С., Уткина А.С. Применение искусственного интеллекта для разработки функциональных пищевых ингредиентов на основе биоактивных полисахаридов **177**

Храмова В.Н., Васильева В.В., Княжеченко О.А., Лубчинский К.А., Васильев А.В. Растворимые пищевые волокна «ИнтенсФлор» в технологии полуфабрикатов из мяса птицы **184**

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Арабов С.М., Свинцов В.Я., Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И.Ю., Осмоловский П.Д., Марышева М.А. Изучение влияния режимных параметров механического вспенивания кератинового гидролизата с загустителем в технологии пенобетона **191**

Щербакова Л.А., Петрикова Е.А., Сафаров Р.Р., Гордиенко М.Г. Обоснование эффективности ингаляционного препарата с пролонгированным высвобождением изониазида методами моделирования фармакокинетики и фармакодинамики **198**

Мосюрова А.В., Меньшутина Н.В. Последние достижения в области распылительной сушки **207**

Плотникова С.Е., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И., Кузнецова И.В., Лучко А.М. Синтез трифторметансульфоната висмута **217**

Мохова Е.К., Гордиенко М.Г., Меньшутина Н.В., Карманова О.В. Математическое моделирование вакуумной сублимационной сушки для трансфера технологий с лабораторного уровня на промышленный **224**

Бондаренко Н.И., Скворцова И.Д., Скворцов А.А. Модифицирование отечественного полипропилена бутадиен-стирольным термоэластопластом **234**

Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф., Майоров Е.С., Филимонов А.А. Создание электропроводящего композита с полимерными материалами для 3D-печати на основе поверхностной модификации **241**

Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф., Майоров Е.С., Филимонов А.А. Исследование функциональных свойств пьезорезистивного эффекта и джоулева нагрева электропроводящих композитов на основе 3D-печати полимеров с поверхностным слоем PEDOT:PSS **249**

Елохин И.В. Повышение сорбционных свойств полипропиленовых материалов с помощью поверхностно-активных веществ **255**

CONTENTS

FOOD SYSTEMS

Tsapkina N.I., Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Bogomolov I.S. Investigation of the kinetics of three-stage processing of vegetable oil coapstocks **13**

Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Panina E.V. Analysis of consumers' food preferences in relation to fortified meat products **20**

Buyanova I.V., Konovalov S.A., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. Methodical aspects of producing biologically complete yogurt **29**

Kopylov M.V., Derkanosova A.A., Umarkhanov R.U., Berestovoy A.A., Torshina A.A. Investigation of kinetic patterns of the process of obtaining proteins from sunflower meal **37**

Dombrovskaya Ya.P., Shevtsov A.A., Drannikov A.V. Heat pump power supply of fluid technology for obtaining dry CO_2-extracts from plant materials **44**

Fialkov D.M., Poymanov V.V., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. The using magnetic treatment of raw materials in cheese production **50**

Antipova L.V., Ibragimova O.T., Plotnikov V.E., Plotnikova I.V. Changes in the chemical composition of high-protein legumes during germination and technological possibilities of their application in functional food systems **56**

Zharkova I.M., Ivanchikov D.S. Biologically active bread peptides: sources, routes of formation, properties (mini review) **66**

Al-Suhaimi S.A., Tosheva Z.A., Vorobyova V.A., Kolomiets L.D., Gorshenina S.P., Lyamina A.A. Evaluation of the antioxidant, antimicrobial activity of plant raw materials and products of their processing **78**

Ivkova I.A., Konovalov S.A., Ekimova A.A., Derkanosova A.A., Poymanov V.V., Polyansky K.K. Development and determination of quality and safety indicators of a creamy vegetable spread in freeze-dried form for specialized nutrition **87**

Ovsyannikov V.Yu., Klyuchnikov A.I., Pribytkov A.V. Practical justification of the method for regenerating alkaline cleaning solution for brewing production using flocculants **96**

Tkeshelashvili M.E., Bobozhonova G.A., Magomedov G.O. Development of the formulation and technology of cookies for gerodietetic nutrition **104**

Sergazieva O.D., Klimuk A.A., Tsarkov M.D. Technological and biochemical properties of fish fillets and minced meats from hybrids of african catfish for the production of food fish products **113**

Shsrikov A.Yu., Golubev A.A., Sokolova E.N., Amelyakina M.V., Ionov V.V., Ivanov V.V. Influence of grain–blackcurrant distillers' stillage on the properties of extruded corn–rice crispbreads **122**

Kuligin D.R., Chusova A.E., Novikova I.V., Muravyev A.S., Zueva N.V., Levashov A.S. Features of beer beverage technology using non-traditional raw materials **129**

Rodionova N.S., Vyrodov D.M. Prospects for the application of deep-processed amaranth products in resilience product technologies **135**

Plotnikov V.E., Magomedov M.G., Sukhanov P.T., Plotnikova I.V., Polyansky K.K., Skosar D.E. Anti-nutritional factors of leguminous crops: qualitative and quantitative analysis of tannins in lentils and their processed products **141**

Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Kutsova A.E., Kosenko I.S. Development of boiled and smoked sausage products using vegetable protein-carbohydrate complexes **153**

Antipova L.V., Boldyreva M.S., Kumalagova Z.H. Investigation of the nutritional value, quality and safety of original meat products using by-products of rabbit slaughter **162**

Shapovalova P.N., Nugmanov A.Kh., Maslovsky S.A., Osmolovsky P.D., Odintsova A.A. A promising technology for obtaining dietary fiber from chicory root **170**

Sedugina A.S., Utkina A.S. Application of artificial intelligence to develop food ingredients based on bioactive polysaccharides **177**

Khramova V.N., Vasilyeva V.V., Knyazhechenko O.A., Lubchinsky K.A., Vasilyev A.V. «IntensFlor» soluble dietary fiber in the technology of semi-finished poultry meat products **184**

CHEMICAL TECHNOLOGY

Arabov S.M., Svintsov V.Ya., Nugmanov A.H.-H., Aleksanyan I.Yu., Osmolovskiy P.D., Marysheva M.A. Study of the effect of the regime parameters of mechanical foaming of keratin hydrolysate with a thickener in foam concrete technology **191**

Shcherbakova L.A., Petrikova E.A., Safarov R.R., Gordienko M.G. Evidence for the efficacy of a sustained-release inhaled isoniazid formulation via pharmacokinetic/pharmacodynamic modeling **198**

Mosyurova A.V., Menshutina N.V. Recent advances in spray drying **207**

Plotnikova S.E., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I., Kuznetsova I.V., Luchko A.M. Synthesis of Bismuth Trifluoromethanesulfonate **217**

Mokhova E.K., Gordienko M.G., Menshutina N.V., Karmanova O.V. Mathematical modeling of vacuum freeze-drying for technology transfer from laboratory to industrial scale **224**

Bondarenko N.I., Skvortsova I.D., Skvortsov A.A. Modification of domestic polypropylene with styrene butadiene thermoplastic **234**

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 **241**

Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Kamalieva R.F., Mayorov E.S., Filimonov A.A Study of the functional properties of the piezoresistive effect and Joule heating of electrically conductive composites based on 3D-printed polymers with a PEDOT:PSS surface layer **249**

Elokhin I.V. Enhancement of the sorption properties of polypropylene materials using surfactants **255**

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-13-19 Оригинальная статья/Research article
УДК 625.3 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование кинетики трехстадийной переработки соапстоков растительных масел

Наталия И. Цапкина [1] eco-agro12@mail.ru
Александр Н. Остриков [2] ostrikov27@ya.ru 0000-0002-2335-0017
Максим В. Копылов [2] kopylov-maks@ya.ru 0000-0003-2678-2613
Игорь С. Богомолов [3] igor-bog@ya.ru

1 ООО "Синтез-Ойл", Воронежская область, Репьёвский район, село Репьёвка, Торговый пер., д.11а, 396370, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
3 АО «НПЦ «ВНИИ комбикормовой промышленности», пр-т Труда, 91, г. Воронеж, 394026, Россия

Аннотация. Цель исследования – выявление кинетических закономерностей трехстадийной технологии получения жирных кислот из соапстоков, включающей щелочное омыление гидратированного растительного масла, высаливание хлоридом натрия, гидролиз и разложение мыльной сердцевины серной кислотой, а также промывку полученных жирных кислот. Были исследованы кинетические закономерности каждого из трех этапов обработки соапстока. Гидратированное растительное масло подвергали щелочному омылению раствором гидроксида натрия концентрацией 30–45 % в количестве 15% от массы сырья в течение 240 мин при температуре 90–95 °С при перемешивании до получения мыльного клея. Установлено, что, продолжительность оказывает большее влияние на выход кислоты, чем концентрация раствора гидроксида натрия. Увеличение продолжительности омыления с 60 до 240 мин. повышает выход жирных кислот в 1,58 раза. Полученную омыленную массу подвергали высаливанию хлоридом натрия концентрацией 16–20% в течение 75–80 мин при температуре кипячения и постоянном перемешивании. Были определены рациональные условия высаливания: продолжительность (80 мин.) и концентрация хлорида натрия (20 %). Полученную мыльную сердцевину разлагали раствором серной кислоты в две стадии: на первой стадии – серной кислотой с концентрацией 10–12% при температуре гидролиза 110–115 °С в течение 40 мин; на второй стадии – серной кислотой с концентрацией 80–92% при температуре разложения 90 °С в течение 85 мин при перемешивании массы до полного разложения мыл. Полученные жирные кислоты имели значительно меньшую массовую долю влаги и летучих веществ и увеличенную глубину расщепления.

Ключевые слова: кинетика, закономерности, технология, соапсток, жирные кислоты, щелочное омыление, высаливание, кислотный гидролиз.

Investigation of the kinetics of three-stage processing of vegetable oil coapstocks

Natalia I. Tsapkina [1] eco-agro12@mail.ru
Alexander N. Ostrikov [2] ostrikov27@ya.ru 0000-0002-2335-0017
Maxim V. Kopylov [2] kopylov-maks@ya.ru 0000-0003-2678-2613
Igor S. Bogomolov [3] igor-bog@ya.ru

1 LLC"Sintez-Oil", 396370, Voronezh Region, Repyevka District, Repyovka Village, Torgovy Lane, 11a
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
3 Scientific-production center VNII of feed industry, Truda Av., 91 Voronezh, 394026, Russia

Abstract. The aim of the study is to identify the kinetic patterns of a three-stage technology for obtaining fatty acids from soapstocks, including alkaline saponification of hydrated vegetable oil, desalination with sodium chloride, hydrolysis and decomposition of the soap core with sulfuric acid, as well as washing of the obtained fatty acids. The kinetic patterns of each of the three stages of soapstock processing were investigated. The hydrated vegetable oil was subjected to alkaline saponification with a sodium hydroxide solution with a concentration of 30-45% in an amount of 15% by weight of the raw material for 240 minutes at a temperature of 90-95 ° C with stirring until a soap glue was obtained. It was found that the duration has a greater effect on the acid yield than the concentration of the sodium hydroxide solution. Increased saponification time from 60 to 240 minutes. increases the yield of fatty acids by 1.58 times. The resulting saponified mass was salted with sodium chloride at a concentration of 16-20 % for 75-80 minutes at boiling point and constant mixing. The rational salting conditions were determined: duration (80 min.) and concentration of sodium chloride (20%). The resulting soap core was decomposed with a solution of sulfuric acid in two stages: in the first stage, with sulfuric acid with a concentration of 10-12% at a hydrolysis temperature of 110-115 ° C for 40 minutes; in the second stage, with sulfuric acid with a concentration of 80-92% at a decomposition temperature of 90 ° C for 85 minutes, stirring the mass until the soap completely decomposes. The resulting fatty acids had a significantly lower mass fraction of moisture and volatile substances and an increased cleavage depth.

Keywords: kinetics, patterns, technology, soapstock, fatty acids, alkaline saponification, salting, acid hydrolysis.

Для цитирования
Цапкина Н.И., Остриков А.Н., Копылов М.В., Богомолов И.С. Исследование кинетики трехстадийной переработки соапстоков растительных масел // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 13–19. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-13-19

For citation
Tsapkina N.I., Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Bogomolov I.S. Investigation of the kinetics of three-stage processing of vegetable oil coapstocks. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 13–19. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-13-19

© 2025, Цапкина Н.И. и др. / Tsapkina 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 связи с широким внедрением новых сортов масличных культур, в частности, подсолнечника с масличностью свыше 60%, а, следовательно, изменившимся фракционным составом получаемого из него соапстока, появилась необходимость уточнения и корректировки технологических режимов процессов переработки соапстоков с оценкой значимости влияния каждого технологического параметра: температуры, продолжительности, режима перемешивания, вязкости и др. [1]. Поэтому целесообразно уточнить кинетические закономерности трехстадийной технологии получения из соапстоков жирных кислот. На основе которых можно обосновать рациональные кинетические характеристики исследуемых процессов – это и являлось объектом данного исследования.

В работе [2] исследовали условия разложения хлопкового соапстока серной кислотой с предварительным гидролизом соапстока.

Авторы работы [3] предложили технологию применения серной кислоты для получения жирных кислот за счет разложения соапстока. Они определили характер влияния технологических параметров (температуры и продолжительности) на объем и степень нейтрализации жирных кислот с получением уравнений, определяемых статистической обработкой.

Особый интерес в последние годы был посвящен обработке соапстока, получаемого путем нейтрализации. После предварительной обработки (дегуммирования) фосфорной кислотой или лимонной кислотой для устранения лецитинов (смеси фосфолипидов и других компонентов) следует этап нейтрализации для снижения кислотности масла. Дегуммированное масло обрабатывается щелочным раствором (NaOH) для нейтрализации свободных жирных кислот и избытка фосфорной кислоты. Реакция щелочной воды с жирными кислотами приводит к образованию мыла.

Lin, C.-Y. и др. [4] подвергали соапсток расщеплению для стабилизации и снижения веса для транспортировки. Для извлечения свободных жирных кислот они обрабатывали подкисленный соапсток серной кислотой.

Sytnik, N. и др. [5] получали жирные кислоты из соапстока за счет гидролиза серной кислотой. Было установлено, что увеличение температуры и продолжительности кислотного гидролиза соапстока серной кислотой увеличивает выход и количество нейтрализуемых жирных кислот.

В работе [6] рассмотрены методы ферментативного гидролиза соапстока. Установлено, что использование ферментативных катализаторов позволяет достичь конверсии в 70%. Отходы, образующиеся при очистке масла в наибольшем количестве, представляют собой кислую воду, соапстоки и дистилляты (токоферолы и фитостеролы). Их утилизация создает серьезные проблемы с точки зрения воздействия на окружающую среду и общей экономической стоимости процесса очистки.

В работе [7] предложен оригинальный способ переработки хлопковых соапстоков для получения жирных кислот. Согласно способу, нагретый хлопковый соапсток смешивался с водой и концентрированной серной кислотой. После достижения заданной глубины разложения полученная масса отстаивалась для разделения на слои с различной плотностью.

Переработка мыльного сырья в жирные кислоты путем омыления и последующего высаливания являлась объектом многочисленных исследований [8, 9, 10, 11]. В них рассматривались различные аспекты влияния режимов высаливания сырья и кислотного гидролиза на качество жирных кислот.

Вышеприведенный анализ исследований, связанных с получением жирных кислот из мыльного сырья, свидетельствует об актуальности данной тематики.

Цель работы – исследование кинетических закономерностей трехстадийной технологии получения из соапстоков жирных кислот для уточнения и корректировки технологических режимов процессов переработки соапстоков с оценкой значимости влияния каждого из технологических параметров.

Это поволит обосновать рациональные кинетические характеристики исследуемых процессов технологии получения жирных кислот, включающей омыление исходного сырья щелочным раствором (NaOH), высаливание NaCl и разложение H_2SO_4 (серной кислотой).

Материалы и методы

Объектом исследования являлся соапсток подсолнечного и рапсового масел имеющий следующий состав, % по массе: жир 8–50, воду и различные нежировые компоненты (красящие вещества, фосфатиды, белки, углеводы и др.). Соапсток по органолептическим и физико-химическим показателям соответствовал требованиям, приведенным в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристика соапстока

Table 1.

Characteristics of soapstock

Показатели | Indicator	Характеристика | Characteristics
Цвет | Color	Коричневый различных оттенков Brown in various shades
Запах | Odor	Специфический, свойственный соапстоку Specific, characteristic of soapstock
Консистенция при 20 °С | Consistency at 20°C	Жидкая и мазеобразная | Liquid and paste-like
Кислотное число, мг КОН/г | Acid value, mg KOH/g	80–180*
Массовая доля общего жира, % | Total fat, %	71,9
Массовая доля жирных кислот, % | Fatty acids, %	64,5
Массовая доля нейтральных жиров, % | Neutral fats, %	7,4
Массовая доля влаги и летучих веществ, % | Moisture and volatile matter, %	15,4
Содержание серы, ppm | Sulfur content, ppm	100
Содержание фосфора, ppm | Phosphorus content, ppm	130

Примечание* кислотное число указано для соапстоков из подсолнечного и рапсового масел

В разработанной трехстадийной технологии переработки соапстоков использовались следующие вспомогательные материалы: гидрооксид натрия (NaOH – каустическая сода) для щелочного омыления гидратированного растительного масла; хлорид натрия (NaCl) для высаливания полученной после щелочного омыления массы в качестве выводящего агента; кислота серная техническая (H_2 SO_4) для кислотного гидролиза мыльной сердцевины.

Используемые реагенты соответствовали требованиям ГОСТов: гидроксид натрия (каустическая сода) (NaOH) – ГОСТ 11078–78, хлорид натрия (NaCI) – ГОСТ Р 51574–2000, серная кислота (H_2SO_4) – ГОСТ 2184–77.

Кроме того, для проведения исследований использовались следующие реагенты и материалы: спирт этиловый ректификованный, дистиллированная вода, фенолфталеин, метиловый оранжевый, этиловый эфир.

Физико-химические характеристики соапстоков: содержание мыла и жирных кислот в исходном соапстоке определяли по ГОСТ 5480–59, кислотное число – по ГОСТ 31933–2012, содержание неомыляемых веществ – по ГОСТ 5479–64, число омыление – по ГОСТ 5478–2014, перекисное число – по ГОСТ Р51487–99, концентрацию водородных ионов измерили с помощью иономера марки И-160МИ, массовую долю жирных кислот определяли методом жидкостной хроматографии.

Результаты и обсуждение

Кинетические закономерности комбинированной трехстадийной технологии получения жирных кислот исследовались отдельно для каждого из трех этапов обработки соапстока: щелочного омыления гидратированного растительного масла раствором гидроксида натрия до получения мыльного клея, высаливания хлоридом натрия полученной массы и ее отстаивания для разделения на три слоя (нижний – мыльная щелочь, средний – клеевое мыло, верхний – мыльная сердцевина) и гидролиза верхнего слоя массы, которая образуется при разделении соапстока, серной кислотой.

Выявление кинетических закономерностей исследуемых процессов переработки соапстоков осуществляли на опытной установке путем смешивания соапстока и соответствующего реагента (растворов гидроксида натрия (NaOH), хлорида натрия (NaCl) и серной кислоты (H_2SO_4)) и последующего термостатирования в течение определенного времени при заданных технологических параметрах.

Кинетика процесса щелочного омыления гидратированного масла раствором гидроксида натрия. Исходный продукт (гидратированное масло) подвергали щелочному омылению раствором гидроксида натрия концентрацией 30–45% в количестве 15% от массы сырья в течение 240 мин при температуре 90–95 °С до pH 10–11 при перемешивании до получения раствора мыла различной концентрации (мыльного клея).

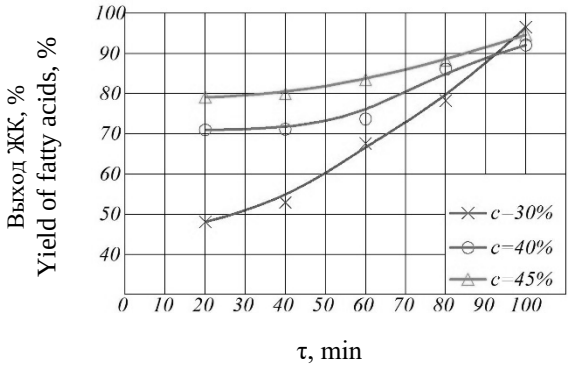


Рисунок 1. Зависимость выхода жирных кислот от продолжительности омыления мыльного сырья и концентрации раствора гидроксида натрия

Figure 1. The dependence of the yield of fatty acids on the duration of saponification of soap raw materials and the concentration of sodium hydroxide solution

Проведенные исследования позволили получить зависимости выхода жирных кислот и количества нейтрализуемых жирных кислот от времени омыления и концентрации реагента (рисунок 1). Установлено доминирующее влияние времени обработки на выход жирных кислот, по сравнению с концентрацией раствора гидроксида натрия. Увеличение времени омыления с 60 до 240 мин. повышает выход жирных кислот в 1,58 раза (рисунок 1). Выявлено, что повышение концентрации гидроксида натрия от 30 до 45% повышает выход жирных кислот за счет более полного превращения липидной части соапстока в мыло.

Кинетика процесса высаливания омыленной массы раствором хлорида натрия. Для концентрирования жировой фракции соапстока полученную омыленную массу подвергали высаливанию хлоридом натрия концентрацией 16–20% в течение 75–80 мин при температуре 60 °С и постоянном перемешивания в течение 10 мин. При растворении хлорида натрия (NaCl) в водной фазе соапстока процесс высаливания омыленной массы сопровождался расслоением в течение 2 часов полученной массы с последующим всплыванием легкой жировой фракции и опусканием вниз отделившейся воды. Полученную и нагретую до кипения массу разделяли путем отстаивания на нижнюю водную фазу, среднюю – клеевое мыло и верхнюю – мыльную сердцевину с содержанием 50–60% жирных кислот.

Содержание растворимого NaCl составляло 8–10%, так как эта концентрация раствора хлорида натрия обеспечивала полное отделение водной фазы. Высокий выход жирных кислот в количестве 95,0% обеспечивался при времени 80 мин. и концентрация хлорида натрия 20% (рисунок 3).

Анализ кинетических закономерностей выхода жирных кислот от времени высаливания при различных концентрациях хлорида натрия (рисунок 2) показал высокий выход жирных кислот в количестве 87,8% (рисунок 3) при концентрации хлорида натрия 20% и времени процесса высаливания 80 минут. Отмечено доминирующее влияние концентрации хлорида натрия в диапазоне от 4 до 20% на увеличение выхода жирных кислот в 1,5 раза (рисунок 3) и степень нейтрализации – в 1,7 раза.

Кинетика процесса двухэтапного кислотного гидролиза мыльной сердцевины серной кислотой разной концентрацией. Сущность двухэтапного кислотного гидролиза мыльной сердцевины состояла в обработке мыльной сердцевины серной кислотой сначала с концентрацией 10–12% при температуре гидролиза 110–115 °С в течение 40 мин; а затем с концентрацией 80–92% при температуре разложения 90 °С в течение 85 мин при перемешивании массы. После этого в течение 2 часов отделялась сульфатная вода в результате отстаивания. Затем водным конденсатом промывали полученные жирные кислоты.

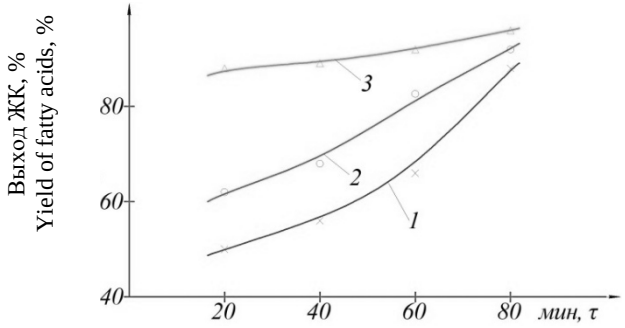


Рисунок 2. Зависимость выхода жирных кислот от времени высаливания при различных концентрациях хлорида натрия: 1 – 4%; 2 – 12%; 3 – 20%

Figure 2. Dependence of the yield of fatty acids on the salting out time at different concentrations of sodium chloride: 1 – 4%; 2 – 12%; 3 – 20%

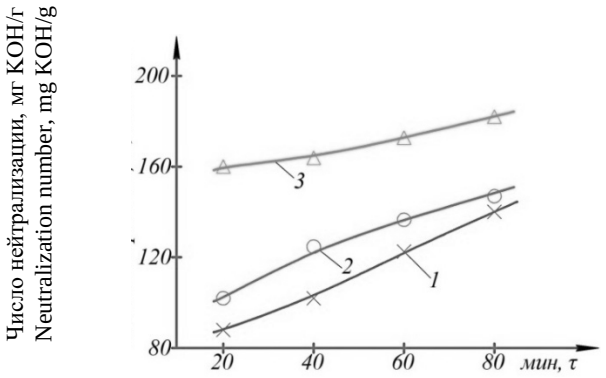


Рисунок 3. Зависимость числа нейтрализации от времени высаливания при различных концентрациях хлорида натрия: 1 – 4%; 2 – 12%; 3 – 20%

Figure 3. Dependence of the neutralization number on the salting out time at different concentrations of sodium chloride: 1 – 4%; 2 – 12%; 3 – 20%

Экспериментальные исследования показали, что использование 10–12% раствора серной кислоты для гидролиза мыльной сердцевины обеспечивает выход свободных жирных кислот на уровне 80–85%. Наибольшая эффективность процесса на первой стадии гидролиза достигается при следующих параметрах: температурный режим 110–115 °С и продолжительность обработки 40 минут.

Проведенный анализ позволил установить корреляционную зависимость между температурными условиями, концентрацией серного кислотного раствора и эффективностью выхода жирных кислот в процессе гидролиза мыльной сердцевины (таблица 2).

Таблица 2.

Влияние температуры гидролиза и концентраций серной кислоты на процесс выделения жирных кислот при гидролизе мыльной сердцевины

Table 2.

The influence of hydrolysis temperature and sulfuric acid concentrations on the process of fatty acid release during soap core hydrolysis

Температура гидролиза Temperature hydrolis	Концентрация серной кислоты, % Sulfuric acid concentration, %	Выход ЖК, % Yield of fatty acids, %
110	10	51
115	12	57
80	80	78
90	90	79

Экспериментальным путем определены оптимальные условия второй стадии переработки мыльного сырья: температура 90–95 °С при времени обработки 40 минут (таблица 3). После завершения гидролиза массу отстаивают 1,5 часа, после чего верхний слой жирных кислот последовательно промывают горячей водой для удаления остатков серной кислоты и сульфата натрия.

Сульфатная вода при этом направляется на регенерацию с получением товарного сульфата натрия. Выход жирных кислот достигает 79,0% при степени нейтрализации 180,0 мг КОН/г. Полученный продукт характеризуется следующими показателями качества: содержание влаги и летучих веществ – 1,8%, общий жир – 97,0%, глубина расщепления (олеиновая кислота) – 64,5%, при полном отсутствии минеральных кислот.

Таблица 3.

Технологические параметры гидролиза и разложения

Table 3.

Technological parameters of hydrolysis and decomposition

Продукт Product	Параметры | Parameters				Выход жирных кислот, кг/т соапстока Yield of fatty acids, %
	гидролиза | hydolysis		разложения | decomposition		
	Т, К	τ, мин	Т, К	Расход H_2SO_4, г/кг Sulfuric acid concentration, %	
Мыльная сердцевина Soap core	110	45	85	33	202
	115	40	90	31	198
	115	45	90	38	204

Заключение

В результате исследования процессов трехэтапной технологии извлечения жирных кислот из соапстоков, полученных при переработке высокомасличных культур, были выявлены кинетические закономерности следующих процессов: щелочного омыления гидратированного растительного масла, высаливание хлоридом натрия, кислотного гидролиза и разложения мыльной сердцевины (мыльного ядра) серной кислотой различной концентрации. Кинетические исследования показали, что при щелочном омылении гидратированных растительных масел выход жирных кислот в большей степени зависит от продолжительности процесса, чем от концентрации NaOH.

Оптимальная концентрация NaCl для эффективного фазового разделения при высаливании омыленного масла составляет 8–10%. Применение двухстадийного кислотного гидролиза с использованием на первом этапе 10–12% H_2SO_4, а на втором – 80–92% H_2SO_4 позволило увеличить выход жирных кислот до 80–85%. В ходе работы определены оптимальные параметры кислотного расщепления мыльного ядра.

Полученные жирные кислоты характеризуются улучшенными качественными показателями: сниженным содержанием влаги и летучих компонентов при высокой степени расщепления. Разработанный процесс демонстрирует эффективную технологию переработки соапстоков с получением высококачественных жирных кислот.

Литература

1 Пат. 2836916 Российская Федерация, МПК C11B 11/00. Способ получения жирных кислот из соапстоков растительных масел / Остриков А.Н., Копылов М.В., Цапкина Н.И.; заявитель ФГБОУ ВО «ВГУИТ». № 2024125531; заявл. 30.08.2024; опубл. 24.03.2025, Бюл. № 9.

2 Schots P.C., Edvinsen G.K., Olsen R.L. A simple method to isolate fatty acids and fatty alcohols from wax esters in a wax-ester rich marine oil // PLoS One. 2023. Vol. 18. № 5. e0285751. doi: 10.1371/journal.pone.0285751

3 Sytnik N., Kunitsia E., Mazaeva V. et al. Rational conditions of fatty acids obtaining by soapstock treatment with sulfuric acid // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 4. № 6-112. P. 6-18. doi: 10.15587/1729-4061.2021.236984

4 Lin C.Y., Lin Y.W. Engine performance of high-acid oil-biodiesel through supercritical transesterification // ACS Omega. 2024. Vol. 9. № 3. P. 3445-3453. doi: 10.1021/acsomega.3c07321

5 Sytnik N., Kunitsia E., Kalyna V. et al. Technology development of fatty acids obtaining from soapstok using saponification // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 5. № 6 (113). P. 16-23.

6 Casali B., Brenna E., Parmeggiani F. et al. Enzymatic methods for the manipulation and valorization of soapstock from vegetable oil refining processes // Sustainable Chemistry. 2021. Vol. 2. № 1. P. 74-91. doi: 10.3390/suschem2010006

7 Хамдамов М.Б. Исследование возможности совершенствования технологии производства жирных кислот из хлопковых соапстоков // Multidisciplinary Scientific Journal. 2022. Vol. 1. № 2. P. 385-388.

8 Kalyna V., Koshulko V., Ilinska O. et al. Development of soapstock processing technology to ensure waste-free and safe production // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 6. № 10 (114). P. 23-29.

9 Achaw O.W., Danso-Boateng E. Soaps and detergents // Chemical and Process Industries: With Examples of Industries in Ghana. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 1-37.

10 Wang Y., Ke L., Peng Y. et al. Characteristics of the catalytic fast pyrolysis of vegetable oil soapstock for hydrocarbon-rich fuel // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 213. 112860. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112860

11 Остриков А.Н., Копылов М.В., Цапкина Н.И. Особенности расчета и проектирования комбинированного аппарата для получения жирных кислот из соапстоков // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 87. № 1. С. 22-28.

12 Mehmood U., Muneer F., Riaz M. et al. Biocatalytic processes for biodiesel production // Biodiesel Technology and Applications. 2021. P. 1-58.

13 Sivamani S., Shanmugam A., Sathish Kumar M. et al. Experimental investigations and concise review on biodiesel production from crude sunflower oil using lime-based catalysts // Bioenergy Research: Integrative Solution for Existing Roadblock. 2021. P. 61-84.

14 Tufail T., Saeed F., Afzaal M. et al. Contemporary views of the extraction, health benefits, and industrial integration of rice bran oil: A prominent ingredient for holistic human health // Foods. 2024. Vol. 13. № 9. 1305. doi: 10.3390/foods13091305

15 Ganger S., Sonawane D., Mhatre N. et al. Biosurfactant Production: Limitations and New Approaches // Microbial Surfactants in Pharmaceuticals and Cosmetics. CRC Press, 2022. P. 26-57.

16 Birta G., Sokolova T., Tkachenko S. et al. Identifying of rational conditions for etherification of sunflower soapstock fatty acids // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 2. № 1 (127). P. 51-59.

17 Исаев Б.М., Ражабов Ж.Г., Сайдалиев С.Ш. Исследование получения жирных кислот путем переработки соапстока масложировой промышленности // Innovation: The Journal of Social Sciences and Researches. 2023. Т. 1. № 5. С. 68-72.

18 Paluzar H. Production of high quality biodiesel from sunflower soapstock acid oil as novel feedstock: Catalyzed by immobilized pancreatic lipase // Journal of the American Oil Chemists' Society. 2024. Vol. 101. № 2. P. 251-265.

19 Сапармухамедова М. Соапсток, получение и свойства // Символ науки. 2024. № 6-2. С. 16-18.

20 El-Faham A.I., Abido A.M.M., Tammam A.M. Effect of using oil by-product (acidulated soap stock and distilled fatty acids) on productive performance, egg components and quality characteristics of laying Japanese quail // Egyptian Journal of Nutrition and Feeds. 2024. Vol. 27. № 1. P. 97-106.

21 Li B., Sun S., Chen X. et al. Enzymatic conversion of soapstock fatty acids from oil refining waste to biosurfactant using a low-cost liquid lipase and a new application as an antioxidant // Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. Vol. 14. № 3. P. 3839-3851.

References

1 Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Tsapkina N.I. Patent RU 2836916. Method for producing fatty acids from vegetable oil soapstocks. 2025. (in Russian)

2 Schots P.C., Edvinsen G.K., Olsen R.L. A simple method to isolate fatty acids and fatty alcohols from wax esters in a wax-ester rich marine oil. PLoS One. 2023. vol. 18. no. 5. p. e0285751. doi:10.1371/journal.pone.0285751

3 Sytnik N., Kunitsia E., Mazaeva V. et al. Rational conditions of fatty acids obtaining by soapstock treatment with sulfuric acid. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. vol. 4. no. 6-112. pp. 6-18. doi:10.15587/1729-4061.2021.236984

4 Lin C.Y., Lin Y.W. Engine performance of high-acid oil-biodiesel through supercritical transesterification. ACS Omega. 2024. vol. 9. no. 3. pp. 3445-3453. doi:10.1021/acsomega.3c07321

5 Sytnik N., Kunitsia E., Kalyna V. et al. Technology development of fatty acids obtaining from soapstok using saponification. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. vol. 5. no. 6(113). pp. 16-23. doi:10.15587/1729-4061.2021.239392

6 Casali B., Brenna E., Parmeggiani F. et al. Enzymatic methods for the manipulation and valorization of soapstock from vegetable oil refining processes. Sustainable Chemistry. 2021. vol. 2. no. 1. pp. 74-91. doi:10.3390/suschem2010006

7 Khamdamov M.B. Investigation of the possibility of improving the technology of fatty acid production from cotton soapstocks. Multidisciplinary Scientific Journal. 2022. vol. 1. no. 2. pp. 385-388. (in Russian)

8 Kalyna V., Koshulko V., Ilinska O. et al. Development of soapstock processing technology to ensure waste-free and safe production. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. vol. 6. no. 10(114). pp. 23-29.

9 Achaw O.W., Danso-Boateng E. Soaps and detergents. Chemical and Process Industries: With Examples of Industries in Ghana. Cham: Springer International Publishing, 2021. pp. 1-37.

10 Wang Y., Ke L., Peng Y. et al. Characteristics of the catalytic fast pyrolysis of vegetable oil soapstock for hydrocarbon-rich fuel. Energy Conversion and Management. 2020. vol. 213. p. 112860.

11 Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Tsapkina N.I. Features of calculation and design of a combined apparatus for producing fatty acids from soapstocks. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 22-28. (in Russian)

12 Mehmood U., Muneer F., Riaz M. et al. Biocatalytic processes for biodiesel production. Biodiesel Technology and Applications. 2021. pp. 1-58.

13 Sivamani S., Shanmugam A., Sathish Kumar M. et al. Experimental investigations and concise review on biodiesel production from crude sunflower oil using lime-based catalysts. Bioenergy Research: Integrative Solution for Existing Roadblock. 2021. pp. 61-84.

14 Tufail T., Saeed F., Afzaal M. et al. Contemporary views of the extraction, health benefits, and industrial integration of rice bran oil: A prominent ingredient for holistic human health. Foods. 2024. vol. 13. no. 9. p. 1305. doi:10.3390/foods13091305

15 Ganger S., Sonawane D., Mhatre N. et al. Biosurfactant Production: Limitations and New Approaches. Microbial Surfactants in Pharmaceuticals and Cosmetics. CRC Press, 2022. pp. 26-57.

16 Birta G., Sokolova T., Tkachenko S. et al. Identifying of rational conditions for etherification of sunflower soapstock fatty acids. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. vol. 2. no. 1(127). pp. 51-59.

17 Isaev B.M., Razhabov Zh.G., Saidaliyev S.Sh. Investigation of fatty acid production by processing soapstock from the oil and fat industry. Innovation: The Journal of Social Sciences and Researches. 2023. vol. 1. no. 5. pp. 68-72. (in Russian)

18 Paluzar H. Production of high quality biodiesel from sunflower soapstock acid oil as novel feedstock: Catalyzed by immobilized pancreatic lipase. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2024. vol. 101. no. 2. pp. 251-265.

19 Saparmukhamedova M. Soapstock, production and properties. Symbol of Science. 2024. no. 6-2. pp. 16-18. (in Russian)

20 El-Faham A.I., Abido A.M.M., Tammam A.M. Effect of using oil by-product (acidulated soap stock and distilled fatty acids) on productive performance, egg components and quality characteristics of laying Japanese quail. Egyptian Journal of Nutrition and Feeds. 2024. vol. 27. no. 1. pp. 97-106.

21 Li B., Sun S., Chen X. et al. Enzymatic conversion of soapstock fatty acids from oil refining waste to biosurfactant using a low-cost liquid lipase and a new application as an antioxidant. Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. vol. 14. no. 3. pp. 3839-3851.

Сведения об авторах

Наталия И. Цапкина заместитель генерального директора , ООО «Синтез-ойл» , Торговый пер., д.11а, Воронежская область, Репьёвский район, село Репьёвка, 396370, Россия, eco-agro12@mail.ru

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

Максим В. Копылов д.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, kopylov-maks@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2678-2613

Игорь С. Богомолов к.т.н., доцент, первый заместитель генерального директора, АО «Научно-производственный центр «ВНИИ комбикормовой промышленности», пр-т Труда, 91, г. Воронеж, 394026, Россия, igor-bog@ya.ru

Information about authors

Natalia I. Tsapkina engineer, deputy general director for, LLC «Sintez-Oil» , Voronezh Region, Repyevka District, Repyovka Village, Torgovy Lane, 11a, eco-agro12@mail.ru

Alexander N. Ostrikov Dr. Sci. (Engin.), 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, ostrikov27@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-2335-0017

Maxim V. Kopylov Dr. 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, kopylov-maks@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2678-2613

Igor S. Bogomolov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, first deputy general director, All-Russian Research Institute of Feed Industry, 91 Truda Ave., Voronezh, 394026, Russia, igor-bog@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 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025

Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-20-28 Оригинальная статья/Research article
УДК 339.138 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Анализ пищевых предпочтений потребителей в отношении мясных продуктов обогащенного состава

Анна А. Дерканосова [1] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Елена Е. Курчаева [1] alena.kurchaeva@ya.ru 0000-0001-5958-0909
Евгения В. Панина [1] panina-genia@mail.ru

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты исследования пищевых предпочтений населения г. Воронежа. Целью исследования было изучение уровня осведомленности потребителей об обогащенных мясных продуктах, оценка различных видов мясных продуктов с точки зрения их значимости и приемлемости для потребителей. Исследования проводили в 2024-2025 гг. С целью выявления потребительских предпочтений в потреблении мясных изделий в г. Воронеже и Воронежской области проведено анкетирование. Объем выборки составил 450 человека. Формирование выборки осуществлялось с учетом распределения по полу и возрастным группам. Было проведено исследование отношения потребителей к обогащенным мясным изделиям, включая частоту потребления, вида продукции и мяса, цены, значимости функциональных продуктов. Около 46% потребителей всё чаще склоняются к выбору изделий, обогащенных витаминами и/или минеральными веществами, 29,1% обогащенных пищевыми волокнами и антиоксидантами 14%. Согласно исследованию, 62,4% опрошенных знают о позитивном влиянии функциональной продукции на здоровье. Неизвестно же о данной информации остаётся 37,6% населения. Согласно опросу, 18% респондентов готовы к значительному изменению вкусовых качеств продуктов. Тем не менее, 43,6% всё же склоняются к незначительным изменениям. С другой стороны, 38,4% не готовы к таким изменениям и считают, что мясное изделие должно оставаться классическим. Согласно данным, обогащение белковыми веществами является наиболее значимым направлением для значительной части опрошенных, набирая 37,1% голосов. На втором месте по интересу обогащения мясных изделий оказалось использование белково-углеводных добавок, оказывающих профилактическое влияние на хронические заболевания, с показателем в 32,2%, обогащение пищевыми волокнами 26,9% голосов и 32,9% потребителей, которые не обращают внимания состав продукции. Полученные данные являются основой для проведения дальнейших исследований, направленных на проектирование мясных изделий с учетом выявленных ограничений и сформировавшихся в текущих условиях потребительских установок.

Ключевые слова: мясные изделия, обогащающие ингредиенты, удовлетворенность потребителей.

Analysis of consumers' food preferences in relation to fortified meat products

Anna A. Derkanosova [1] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Elena E. Kurchaeva [1] alena.kurchaeva@ya.ru 0000-0001-5958-0909
Evgenia V. Panina [1] panina-genia@mail.ru

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 str., 1, Voronezh, 394087, Russia

Abstract. The paper presents the results of a study of the food preferences of the Voronezh population. The purpose of the study was to study the level of consumer awareness about fortified meat products, to evaluate various types of meat products in terms of their significance and acceptability to consumers. The research was conducted in 2024-2025. In order to identify consumer preferences in the consumption of meat products in Voronezh and the Voronezh region, a survey was conducted. The sample size was 450 people. The sample was formed taking into account the distribution by gender and age groups. A study was conducted on consumer attitudes towards fortified meat products, including the frequency of consumption, type of product and meat, price, and importance of functional products. About 46% of consumers are increasingly inclined to choose products fortified with vitamins and/or minerals, 29.1% fortified with dietary fiber and 14% antioxidants. According to the study, 62.4% of the respondents are aware of the positive impact of functional products on health. 37.6% of the population remains unaware of this information. According to the survey, 18% of respondents are ready for a significant change in the taste of products. Nevertheless, 43.6% are still inclined to minor changes. On the other hand, 38.4% are not ready for such changes and believe that the meat product should remain classic. According to the data, protein enrichment is the most significant direction for a significant part of the respondents, gaining 37.1% of the votes. In the second place in terms of the interest in enriching meat products was the use of protein and carbohydrate additives that have a preventive effect on chronic diseases, with an indicator of 32.2%, fiber fortification of 26.9% of votes and 32.9% of consumers who do not pay attention to the composition of products. The data obtained are the basis for further research aimed at designing meat products, taking into account the identified limitations and consumer attitudes formed in the current conditions.

Keywords: meat products, enriching ingredients, consumer satisfaction.

Для цитирования
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. С. 20–28. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-20-28

For citation
Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Panina E.V. Analysis of consumers' food preferences in relation to fortified meat products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 20–28. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-20-28

© 2025, 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

Разработка новых подходов к созданию систем питания, соответствующих принципам здорового образа жизни, должна учитывать интересы потребителей, которые играют ключевую роль на рынке товаров для потребления. Продукты питания, в свою очередь, должны соответствовать установленным стандартам по потреблению питательных веществ и компенсировать их недостаток в традиционных рационах питания. Разработки в данной области нацелены на устранение дефицита важных макро- и микроэлементов, таких как пищевые волокна, витамины, минералы и другие [1, 2, 8, 10].

Обогащенные пищевые продукты должны соответствовать традиционным идентификационным признакам однородной группы продукции и либо минимально отличаться по сенсорным характеристикам от традиционных, исключая возможность противоположного исполнения этих требований. Важно отметить, что пищевые продукты, обогащенные компонентами, должны сохранять свою основную сущность и не нарушать узнаваемость среди потребителей, при этом поддерживая высокий уровень качества и безопасности [6].

Для того чтобы удовлетворить потребности потребителей в здоровом питании, необходимо создать новое поколение пищевых продуктов, которые будут содержать все необходимые человеку макро- и микроэлементы, а также помогать снизить употребление вредных веществ [4, 7]. Изменение состава продуктов с добавлением нетрадиционных ингредиентов может повлиять на их вкусовые качества, что затрудняет их продажу на рынке.

Для оценки вероятности успеха нового обогащенного продукта был предложен инструмент прогнозирования отношения потребителей к нему, включающий разработку модели, предсказывающей реакцию потребителей, и модели, оценивающей предсказательную способность [3]. Для прогнозирования успеха нового продукта с использованием определенных параметров была предложена модель множественного выбора логита, для оценки предсказательной способности которой использовался ROC-анализ. Был разработан алгоритм определения уровня успеха с одновременным снижением рисков как для производителя, так и для потребителя.

Инструментарий для прогнозирования реакции потребителя на инновационный продукт, созданный для обогащенного мясного продукта с использованием белково-углеводных комплексов, может быть успешно применен в различных системах: продвижения продуктов с улучшенными пищевыми свойствами, специализированных и функциональных продуктов, а также в системах разработки пищевых товаров [2, 9, 14, 15].

В рамках рационов питания традиционно рассматривался вопрос дефицита белковых веществ. Последние исследования показывают, что рацион среднестатистического россиянина имеет достаточное количество белка, что нельзя сказать про его качественную характеристику [11–13]. Кроме того, по отношению к обогащенным продуктам на мясной основе, все более активно обсуждается вопрос ограничения использования в питании животных белков. Она обусловлена научными данными в сфере здорового питания, которые свидетельствуют об избыточности белковых компонентов в рационе современного человека.

Для увеличения долголетия и качества жизни своих граждан Российская Федерация ведет программу «Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года», направленную на обеспечение оптимального питания, предупреждение заболеваний и стимулирование развития производства здоровой пищи. Одним из препятствий на этом пути является высокая калорийность и низкая питательная ценность традиционных продуктов, содержание избыточного количества насыщенных жиров и недостаток важных микроэлементов и пищевых волокон в рационе многих групп населения [5].

Исследования Федеральной службы государственной статистики показывают, что подавляющее большинство взрослого населения испытывает дефицит витаминов и минералов, включая железо, и не удовлетворяет рекомендуемые нормы. Отмечается, что у 22–38% людей наблюдается полигиповитаминозное состояние, что означает недостаток трех и более витаминов. Кроме того, питание часто не содержит достаточного количества пищевых волокон, которые играют ключевую роль в усвоении пищи и считаются неотъемлемыми компонентами для здоровья.

Исследование влияния различных компонентов на физико-химические, качественные и другие показатели готовой мясной продукции представляет собой значимую задачу, несмотря на множество возможных добавок. Улучшение биологической ценности продуктов достигается через использование пищевых волокон растительного или животного происхождения в качестве дополнительных ингредиентов. Для обогащения витаминным составом продуктов массового потребления, таких как мясные,

используется ассортимент мясных продуктов, включая рубленые или эмульсионные варианты, что позволяет проводить процесс обогащения без значительного изменения технологического цикла.

Для изучения интереса потребителей к внедрению белково-углеводных комплексов в мясные изделия и оценки перспективности данной корректировки в рецептурах повседневных продуктов проведено исследование.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2024–2025 гг. С целью выявления потребительских предпочтений в потреблении мясных изделий в г. Воронеже и Воронежской области проведено анкетирование. Опрос осуществлялся по специально разработанной анкете в печатном виде и с помощью социальных сетей и месенджеров, а также с использованием специализированного сайта https://webanketa.com/ru/.

После сбора данных участники опроса были проанализированы с помощью программного обеспечения «STATISTICA».

Результаты

Для обеспечения высоких стандартов достоверности и репрезентативности результатов, размер выборки участников опроса был определён с учетом различных факторов, включая демографические характеристики и особенности потребительского поведения в различных регионах. Объем выборки составил 450 человека. Формирование выборки осуществлялось с учетом распределения по полу и возрастным группам. При этом применялся метод стратифицированной выборки, что позволило более точно выделить значимые подгруппы и выявить различия в потребительском поведении между регионами.

В соответствии со стратегией повышения качества пищевой продукции в российской Федерации до 2030 года необходимо создание пищевых продуктов с заданными характеристиками. К таким продуктам нового поколения относятся специализированные, обогащенные, органические и функциональные продукты питания.

С увеличением производства мяса в России наблюдается рост выпуска мясоперерабатывающей продукции. Общий объем производства в 2023 году достиг 7,6 млн тонн, что соответствует почти 4%-ному увеличению. В первом квартале 2024 года объем продукции возрос на 1,1% по сравнению с тем же периодом в предыдущем году.

Распределение респондентов по гендерному признаку представлено на рисунке 1.

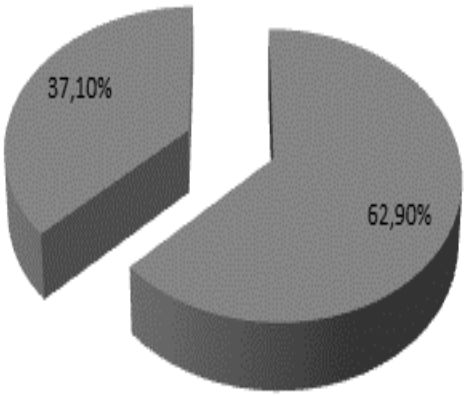


Рисунок 1. Распределение респондентов по гендерному признаку: 37,10 – мужчины; 62,90 – женщины

Figure 1. Gender distribution of respondents: 37.10 – men, 62.90 – women

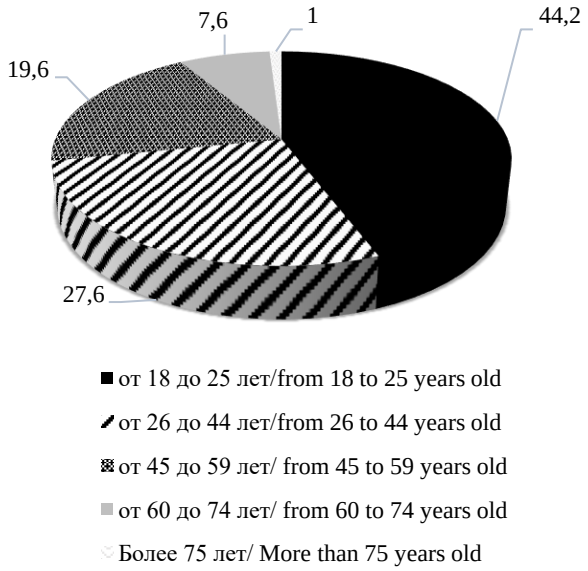


Рисунок 2. Распределение респондентов по возрастному признаку

Figure 2. Distribution of respondents by age



Рисунок 3. Распределение голосов респондентов по предпочтению мясной продукции, % от числа опрошенных

Figure 3. Distribution of respondents' votes on preference for meat products, % of the number of respondents

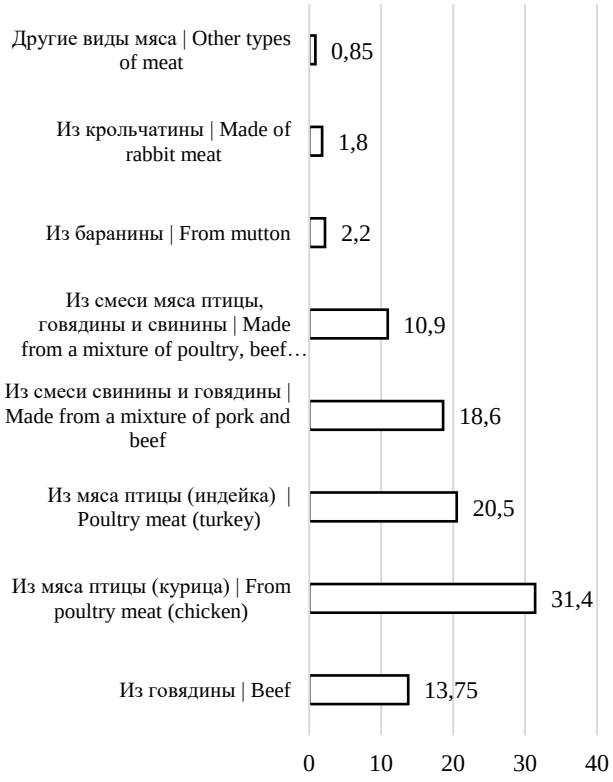


Рисунок 4. Предпочтения респондентов полуфабрикатов по виду мяса, % от числа опрошенных

Figure 4. Respondents' preferences for the type of meat, % of the number of respondents



Рисунок 5. Исследование учитывающие неблагоприятные факторы при приобретении мясных изделий

Figure 5. A study that takes into account unfavorable factors when purchasing meat products



Рисунок 6. Важность информированности этикетки на продукте label on the product

Figure 6. The importance of awareness of the

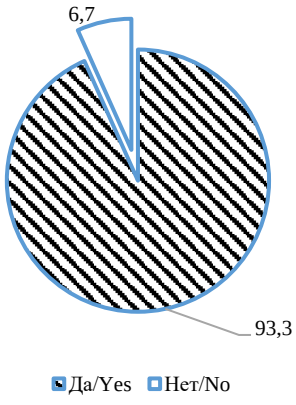


Рисунок 7. Важность состава продукции

Figure 7. The importance of product composition

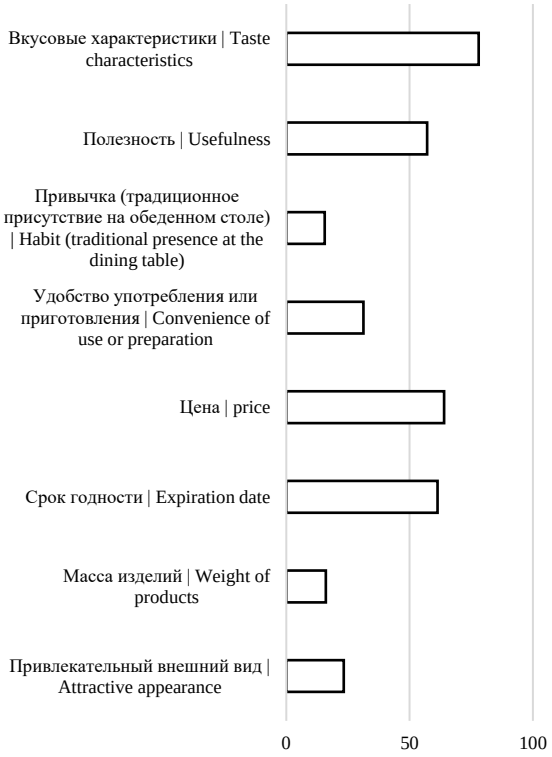


Рисунок 8. Важность характеристик мясных изделий для опрошенных респондентов

Figure 8. The importance of the characteristics of meat products for the surveyed respondents

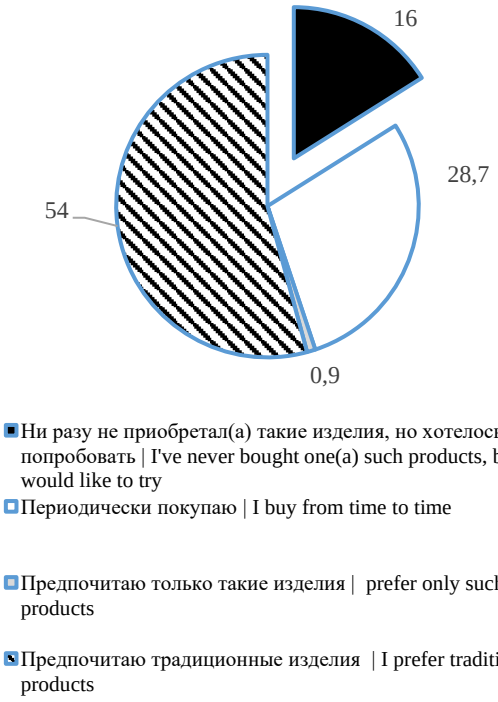


Рисунок 9. Изучение потребительских предпочтений в ассортименте мясных изделий обогащенного состава

Figure 9. Study of consumer preferences in the range of enriched meat products

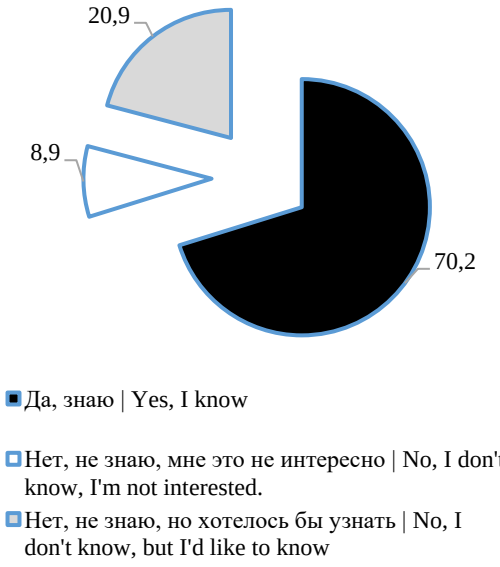


Рисунок 10. Опрос потребителей о знаниях роли высокобелковых продуктах и роли клетчатки

Figure 10. Consumer survey on knowledge of the role of high-protein foods and the role of fiber

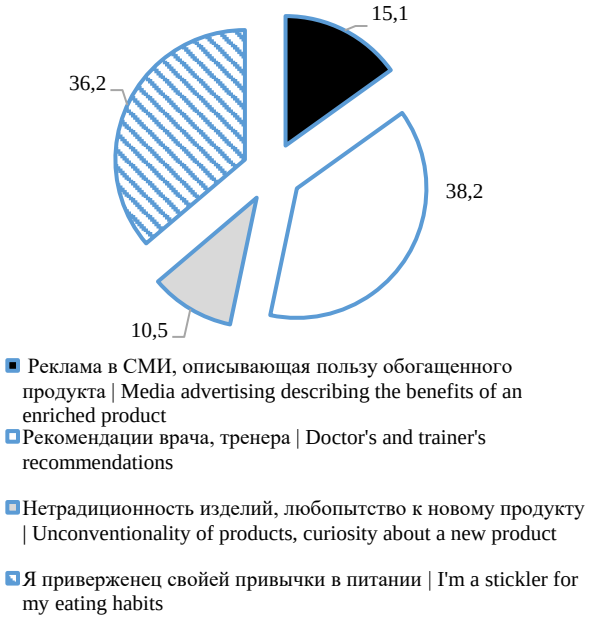


Рисунок 11. Изучения влияния на мнение респондентов при приобретении обогащенной мясной продукции

Figure 11. The study of the influence on the opinion of respondents when purchasing fortified meat products

Ассортимент мясных изделий достаточно разнообразен в г. Воронеже, и все большая осведомленность покупателей о продукции обогащенного состава позволяет производителям расширять линейки продуктов функционального назначения.

Мясные изделия пользуются большим спросом благодаря культурным корням и практикам, сформировавшимся за века.

Современные подходы к питанию не исключают влияния этих факторов, которые определяют потребительские предпочтения. Таким образом, несмотря на рост популярности альтернативных источников белка, традиционные мясные продукты остаются востребованными благодаря их культурному и историческому значению для населения региона. Рынок продолжает эволюционировать, адаптируясь к современным реалиям и новым трендам.

Обсуждение

Из 450 опрошенных 62,9% по гендерному признаку женщины (рисунок 1). 27,6% респондентов в возрасте 25–44 года, менее 25 лет 44,2% (рисунок 2). По роду занятий преобладали учащееся (40,2%), 19,6% служащих, 22,2% рабочих, остальные 21% составили из предпринимателей, пенсионеров и безработных. По уровню дохода распределение получилось следующим, 44,1% доход до трех минимальных окладов (около 50 тыс. руб.), 35,4% доход составляет один прожиточный минимум и 20,5% получают более 50 тыс. рублей.

В результате опроса выявили частоту потребления мясных изделий получили более 50% респондентов приобретают мясную продукцию от 1 до 3 раз в неделю в сетевых продуктовых магазинах.

Очень важным для деятельности мясоперерабатывающих предприятий является ответ на вопрос: «Какие виды мясной продукции предпочитают приобретать потребители?» Результаты обработки этого вопроса представлены на рисунке 3, где видно, что наибольшей популярностью среди покупателей пользуются полуфабрикаты и колбасная продукция. Это объясняется желанием потребителей приобретать мясные продукты, обеспечивающие упрощение процесса приготовления.

Кроме того, существенная доля рыночного спроса приходится на полуфабрикаты, которые упрощают процесс приготовления пищи и экономят время. Наибольшим спросом пользуются полуфабрикаты из мяса птицы и свинины (рисунок 4), что связано с их универсальностью и доступной ценой.

Исследования влияния на приобретения мясных продуктов показало, что в основном респондентов не устраивает цена изделий, так же в тройку неблагоприятных факторов входили качество изделий и недостаточное присутствие профилактических и обогащенных продуктов (рисунок 5).

Далее исследования направленные на знание респондентов о положительном влиянии на организм и профилактике хронических заболеваний функциональных продуктах питания 62,4% ответили, что знают и 37,6% – нет.

Данные свидетельствуют о том, что молодые люди более осведомлены о правильном питании. 73,3% Обращают внимание на этикетку (рисунок 6) и 93,3% важен состав продукта (рисунок 7).

При опросе о наиболее значимых характеристиках при выборе мясных продуктов большинство респондентов отметили вкусовые характеристики, цену, срок годности и полезность (рисунок 8).

Подавляющее большинство потребителей всё чаще склоняются к выбору изделий, обогащенных витаминами и / или минеральными веществами, что составляет 46%. Это неудивительно, ведь такие продукты способствуют улучшению общего состояния организма и поддержанию здорового баланса необходимых элементов.

На втором месте по популярности находятся изделия, обогащенные пищевыми волокнами. Они составляют 29,1% от общего предпочтения потребителей. Менее популярны изделия, обогащенные антиоксидантами (4%). Безсолевые изделия составляют 10,2% от предпочтений. Люди, стремящиеся снизить потребление соли в своем рационе, выбирают такие продукты, чтобы уменьшить риск гипертонии и связанных с ней заболеваний. Наконец, есть категория "других" диетических и обогащенных изделий, на которую приходится 10,7% предпочтений. В эту категорию могут входить продукты, обогащенные пробиотиками или жирными кислотами Омега-3, которые также имеют свои специфические преимущества для здоровья.

Вместе с тем, значительная часть населения, а именно 35,8%, не употребляет подобные обогащенные или диетические продукты, предпочитая, вероятно, более традиционные варианты питания.

Согласно исследованию, 62,4% опрошенных знают о позитивном влиянии функциональной продукции на здоровье. Они отмечают, что такие продукты помогают укреплять иммунную систему, улучшать пищеварение и способствовать поддержанию оптимального уровня энергии. Неизвестно же о данной информации остаётся 37,6% населения. Это может быть связано с недостаточной информированностью или недоверием к нововведениям в пищевой индустрии.

Вопрос, о готовности потребителей к изменению традиционного вкуса, аромата, внешнего вида мясного изделия при условии улучшения его состава, как никогда актуален. Мнения опрошенных на этот счет разделяются. Согласно опросу, 18% респондентов готовы к значительному изменению. Эти люди, возможно, являются теми, кто стремится к экспериментам, открытым для новых ощущений и положения во главу угла качества над привычностью.

Тем не менее, 43,6% всё же склоняются к незначительным изменениям.

С другой стороны, 38,4% не готовы к таким изменениям и считают, что мясное изделие должно оставаться классическим. Для них важна сохранность воспоминаний и традиций, которые являются частью их самобытности.

Рациональное обогащение мясных продуктов становится одним из важнейших направлений научных исследований и практической деятельности в области пищевой промышленности. Согласно данным, обогащение белковыми веществами является наиболее значимым направлением для значительной части опрошенных, набирая 27,1% голосов. Потребность в белках возрастает при высокой физической активности и в условиях стрессовых нагрузок, что делает их дополнительное включение в рацион крайне актуальным.

На втором месте по интересу обогащения мясных изделий оказалось использование белково-углеводных добавок, оказывающих профилактическое влияние на хронические заболевания, с показателем в 32,2%. Эти комплексы могут помочь улучшить метаболическую реакцию организма, снизить риск развития диабета, сердечно-сосудистых заболеваний и ожирения. Не меньший интерес вызывает и обогащение пищевыми волокнами, которое поддерживает здоровье пищеварительной системы и предотвращает множество заболеваний – оно собрало 16,9% голосов. Внедрение волокон в питание способствует очищению организма от токсинов и нормализации уровня сахара в крови. Обогащение антиоксидантами, с 10,9% голосов, также представляет важность, особенно в условиях неблагоприятной экологии и высокого уровня окислительного стресса, подвергающего клетки и ткани организма разрушительным изменениям. Тем не менее, в обществе сохраняется значительное количество людей – 12,9%, которые не обращают внимания на эти аспекты. Это требует усилий по повышению осведомленности и образовательных программ, направленных на понимание важности рациона.

При вопросе об отношении к мясным изделиям улученного состава респонденты в основном разделились на три группы, немного более половины остаются приверженцами традиционного, привычного им питания, сформированного в семье, почти треть периодически приобретают такую продукцию, 16% не пробовали, но готовы экспериментировать и почти 1% предпочитают только такие изделия (рисунок 9).

Опрос респондентов о знаниях роли высокобелковых продуктах и роли клетчатки для организма человека показал, что большинство опрошенных достаточно осведомлены о положительном влиянии белка и клетчатки (рисунок 10). При вопросе что может повлиять на выбор в сторону обогащенной мясной продукции голоса респондентов распределись на четыре группы (рисунок 11).

Заключение

С учетом современных тенденций, на мясном рынке наблюдается стремление потребителей к экономии, что сочетается с увеличением интереса к здоровому питанию в рамках общемирового тренда на здоровый образ жизни.

Мясные изделия быстрой готовности являются популярными продуктами, поэтому их обогащение для обеспечения балансированного питания населения, включая увеличение потребления белка, является логичным шагом. По данным исследования, около 46% потребителей предпочитают изделия, обогащенные витаминами и минеральными веществами, 29,1% – пищевыми волокнами и антиоксидантами, а 10,7% – другими добавками. Более 62,4% респондентов осведомлены о пользе функциональных продуктов для здоровья, в то время как 37,6% населения не обладают этой информацией.

Данные опроса показывают, что 18% опрошенных готовы к радикальным изменениям во вкусовых характеристиках продуктов. Однако у 43,6% людей склонность к незначительным изменениям. В то же время, 38,4% не желают видеть изменений и настаивают на том, чтобы мясные изделия оставались в классическом виде.

Согласно статистике, большинство опрошенных (27,1%) считают, что обогащение продуктов белковыми веществами является наиболее важным. Использование белково-углеводных добавок, которые оказывают профилактическое воздействие на хронические заболевания, считают важным 32,2% опрошенных. При этом 16,9% выразили интерес к обогащению пищевыми волокнами, а 12,9% потребителей не обращают внимания на состав продукции.

Полученные данные являются основой для проведения дальнейших исследований, направленных на проектирование мясных изделий с учетом выявленных ограничений и сформировавшихся в текущих условиях потребительских установок.

Литература

1 Блягоз М.М., Влащик Л.Г. Перспективы разработки обогащенных растительными белковыми ингредиентами продуктов для здорового питания // Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. 2022. С. 758–760.

2 Дерканосова Н.М., Шуршикова Г.В., Василенко О.А. Прогнозирование успешности обогащенной пищевой продукции на потребительском рынке // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2023. № 4 (393). С. 102–107. doi: 10.26297/0579-3009.2023.4.17

3 Криштафович В.И., Криштафович Д.В. Безопасность – основное потребительское свойство продовольственных товаров // М. Рыскулбеков атындагы Кыргыз экономикалык университетинин кабарлары. 2023. № 4 (61). С. 131–133.

4 МР 2.3.1.0253-21 "Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации". Утверждены Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации А.Ю. Поповой 22 июля 2021 г. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=18979 (дата обращения: 29.06.2025).

5 Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 № 20. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73338425/ (дата обращения: 29.06.2025).

6 Пищевые ингредиенты для продуктов здорового питания: монография / Н.В. Байлова, О.А. Сергеева, С.Н. Коновалова и др. Воронеж: ВГАУ, 2023. 183 с. ISBN 978-5-7267-1342-7.

7 Попова А.Ю., Тутельян В.А., Никитюк Д.Б. О новых (2021) Нормах физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации // Вопросы питания. 2021. Т. 90. № 4. С. 6–19.

8 Разработка технологии пищевой смеси быстрого приготовления для людей с предрасположенностью к заболеваниям системы кровообращения / М.В. Клоконос, Н.Г. Иванова, И.А. Никитин и др. // Вестник ВСГУТУ. 2024. № 1 (92). С. 24–33. doi: 10.53980/24131997_2024_1_24

9 Тутельян В.А., Никитюк Д.Б. Ключевые проблемы в структуре потребления пищевой продукции и прорывные технологии оптимизации питания для здоровьесбережения населения России // Вопросы питания. 2024. Т. 93. № 1. С. 6–21.

10 Основные направления повышения конкурентоспособности функциональных продуктов питания / С.А. Шеламова, С.Н. Коновалова, Н.М. Дерканосова и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15. № 3 (74). С. 219–228. doi: 10.53914/issn2071-2243_2022_3_219

11 Курчаева Е.Е., Волкова Ю.С., Панина Е.В. Использование растительных композитов в технологии мясных рубленых полуфабрикатов для функционального питания // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2024. № 2 (25). С. 66–77. doi: 10.53914/issn2311-6870_2024_2_66

12 Концептуальные подходы к использованию продуктов переработки бобов сои при производстве функциональных продуктов питания / Е.В. Панина, Н.В. Королькова, А.А. Колобаева и др. // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2022. № 1 (18). С. 51–62. doi: 10.53914/issn2311-6870_2022_1_51

13 Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 04.07.2016 № 20. URL: http://static.government.ru/media/files/9JUDtBOpqmoAatAhvT2wJ8UPT5Wq8qIo.pdf (дата обращения: 10.06.2025).

14 Jang H., Oh J., Cho M.S. Study on the Physicochemical Characteristics and Preference for Meat-Based Senior-Friendly Foods Treated with Saturated Vapor // Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition. 2024. Vol. 53. No. 2. P. 180–189. doi: 10.3746/jkfn.2024.53.2.180

15 Croxford Sh. Role of food in our teaching and practice // Nutrition and Dietetics. 2023. Vol. 80. No. 5. P. 448–451. doi: 10.1111/1747-0080.12852

16 Chinnici G., Zarbà C., Privitera D. et al. Food attributes of fortified foods: an analysis of consumption behavior // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. 2023. Vol. 23. No. 6.2. P. 223–230. doi: 10.5593/sgem2023V/6.2/s25.28

17 Tian Y., Zhu H., Zhang L. et al. Consumer preference for nutritionally fortified eggs and impact of health benefit information // Foods. 2022. Vol. 11. No. 8. 1145. doi: 10.3390/foods11081145

18 Nitzko S. Consumer preferences for naturally high-fiber and fiber-fortified foods: a preliminary segmentation study // Journal of Consumer Protection and Food Safety. 2023. Vol. 18. No. 2. P. 119–132. doi: 10.1007/s00003-023-01429-w

19 Embling R., Neilson L., Mellor C. et al. Exploring consumer beliefs about novel fortified foods: A focus group study with UK-based older and younger adult consumers // Appetite. 2024. Vol. 193. 107139. doi: 10.1016/j.appet.2023.107139

20 Ruiz-Capillas C., Herrero A.M., Pintado T. et al. Sensory analysis and consumer research in new meat products development // Foods. 2021. Vol. 10. No. 2. 429. doi: 10.3390/foods10020429

References

1 Blyagoz M.M., Vlaschik L.G. Prospects for the development of products enriched with vegetable protein ingredients for healthy nutrition. Kuban State Agrarian University named after I.T. Trublin. 2022. pp. 758–760. (in Russian)

2 Derkanosova N.M., Shurshikova G.V., Vasilenko O.A. Forecasting the success of fortified food products in the consumer market. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Food technology. 2023. no. 4(393). pp. 102–107. doi:10.26297/0579-3009.2023.4.17 (in Russian)

3 Krishtafovich V.I., Krishtafovich D.V. Safety is the main consumer property of food products. Ryskulbekov atyndagi Kyrgyz ekonomikalykin kabarlary. 2023. no. 4(61). pp. 131–133. (in Russian)

4 MP 2.3.1.0253-21 "Norms of physiological energy and nutritional requirements for various groups of the population of the Russian Federation". Approved by the Head of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation A.Y. Popova, July 22, 2021. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=18979 (in Russian)

5 On the approval of the Food Security Doctrine of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 20 dated January 21, 2020. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73338425/ (in Russian)

6 Baylova N.V. et al. Food ingredients for healthy food products: a monograph. Voronezh: VGAU, 2023. 183 p. ISBN: 978-5-7267-1342-7 (in Russian)

7 Popova A.Yu., Tutelyan V.A., Nikityuk D.B. On new (2021) Standards of physiological energy and nutritional requirements for various population groups of the Russian Federation. Nutrition issues. 2021. vol. 90. no. 4. pp. 6–19. (in Russian)

8 Klokonos M.V., Ivanova N.G., Nikitin I.A. et al. Development of technology for fast-cooking food mixtures for people with a predisposition to diseases of the circulatory system. Bulletin of VSGUT. 2024. no. 1(92). pp. 24–33. doi:10.53980/24131997_2024_1_24 (in Russian)

9 Tutelyan V.A., Nikityuk D.B. Key problems in the structure of food consumption and breakthrough technologies for optimizing nutrition for the health of the Russian population. Nutrition issues. 2024. vol. 93. no. 1. pp. 6–21. (in Russian)

10 Shelamova S.A., Konovalova S.N., Derkanosova N.M., Sergeeva O.A. The main directions of increasing the competitiveness of functional food products. Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2022. vol. 15. no. 3(74). pp. 219–228. doi:10.53914/issn2071-2243_2022_3_219 (in Russian)

11 Kurchaeva E.E., Volkova Yu.S., Panina E.V. The use of vegetable composites in the technology of minced meat semi-finished products for functional nutrition. Technologies and commodity science of agricultural products. 2024. no. 2(25). pp. 66–77. doi:10.53914/issn2311-6870_2024_2_66 (in Russian)

12 Panina E.V., Korolkova N.V., Kolobaeva A.A. et al. Conceptual approaches to the use of soy bean processing products in the production of functional food products. Technologies and commodity science of agricultural products. 2022. no. 1(18). pp. 51–62. doi: 10.53914/issn2311-6870_2022_1_51 (in Russian)

13 On the approval of the Strategy for improving the quality of food products in the Russian Federation dated 04.07.2016, No. 20. URL: http://static.government.ru/media/files/9JUDtBOpqmoAatAhvT2wJ8UPT5Wq8qIo.pdf (in Russian)

14 Jang H., Oh J., Cho Mi.S. Study on the Physicochemical Characteristics and Preference for Meat-Based Senior-Friendly Foods Treated with Saturated Vapor. Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition. 2024. vol. 53. no. 2. pp. 180–189. doi:10.3746/jkfn.2024.53.2.180

15 Croxford Sh. Role of food in our teaching and practice. Nutrition and Dietetics. 2023. vol. 80. no. 5. pp. 448–451. doi:10.1111/1747-0080.12852

16 Chinnici G., Zarbà C., Privitera D. et al. Food attributes of fortified foods: an analysis of consumption behavior. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. 2023. vol. 23. no. 6.2. pp. 223–230. doi: 10.5593/sgem2023V/6.2/s25.28

17 Tian Y., Zhu H., Zhang L. et al. Consumer preference for nutritionally fortified eggs and impact of health benefit information. Foods. 2022. vol. 11. no. 8. p. 1145. doi: 10.3390/foods11081145

18 Nitzko S. Consumer preferences for naturally high-fiber and fiber-fortified foods: a preliminary segmentation study. Journal of Consumer Protection and Food Safety. 2023. vol. 18. no. 2. pp. 119–132. doi: 10.1007/s00003-023-01429-w

19 Embling R., Neilson L., Mellor C. et al. Exploring consumer beliefs about novel fortified foods: A focus group study with UK-based older and younger adult consumers. Appetite. 2024. vol. 193. p. 107139. doi: 10.1016/j.appet.2023.107139

20 Ruiz-Capillas C., Herrero A.M., Pintado T. et al. Sensory analysis and consumer research in new meat products development. Foods. 2021. vol. 10. no. 2. p. 429. doi: 10.3390/foods10020429

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@ya.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, улица Мичурина, 1 Воронеж, 394087, Россия, alena.kurchaeva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5958-0909

Евгения В. Панина старший преподаватель, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, улица Мичурина, 1 Воронеж, 394087, Россия, panina-genia@mail.ru

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@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Elena E. Kurchaeva Dr. Sci. (Acgric.), Professor, private animal science department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,, Michurina Street, 1 Voronezh, 394087, Russia, 394036, Russia, alena.kurchaeva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5958-0909

Evgenia V. Panina Senior Lecturer, processes and equipment of processing industries department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,, Michurina Street, 1 Voronezh, 394087, Russia, 394036, Russia, panina-genia@mail.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 21/07/2025	**После редакции** 01/08/2025	**Принята в печать** 10/08/2025
Received 21/07/2025	**Accepted in revised** 01/08/2025	**Accepted** 10/08/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-29-36 Оригинальная статья/Research article
УДК 637.13. Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Методические аспекты выработки биологически полноценного йогурта

Ирина В. Буянова [1] ibuyanova_@mail.ru 0000-0002-2801-8478
Сергей А. Коновалов [2] sa.konovalov@omgau.org 0000-0003-3537-8081
Анна А. Дерканосова [3] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Константин К. Полянский [3, 4] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466

1. Кузбасский государственный аграрный университет им. В.Н. Полецкова, ул. Марковцева, 5, г. Кемерово,650056, Россия
2. Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия
3.Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
4.Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса. 67А, Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. Йогурт отличает сбалансированность по всем элементам питания, особенно по содержанию биологически важных полноценных белков. Более детальное изучение технологических особенностей йогурта, как наиболее популярного и востребованного у потребителей напитка, позволит совершенствовать его технологию и вырабатывать продукт с новыми биологическими свойствами, повысить степень усвояемости. В силу дефицита белка в рационе питания людей актуальным становится продолжение проведения исследований по совершенствованию методологических подходов к технологии производства наиболее популярного у населения молочного напитка. Для потребителей всегда важна консистенция – плотная, густая, без отделения сыворотки. Регулирование консистенции йогурта можно добиться технологическими приемами. Цель работы- провести исследование факторов, формирующих идентификационные характеристики консистенции биологически полноценного йогурта. В соответствии с целью исследования были сформированы задачи по совершенствованию рецептур биойогурта на базе молочного сырья отечественного производителя. Изучалась роль составных частей молока - белка и жира в составе рецептурной смеси, а также сухого обезжиренного молока в формировании нормативных характеристик консистенции йогурта. Рассматривалась взаимосвязь между рецептурными компонентами и структурно-механическими свойствами кислотного геля йогурта. Химический состав молочной смеси характеризуется наличием молочного жира, который в отвердевшем виде влияет на характер консистенции йогурта. Установлена зависимость, что: с повышением содержания жира йогурт характеризуется как плотный и густой. По всем критериям качества оптимальными дозами в составе йогурта являются: массовая доля жира 2,6–6,1%., сухого обезжиренного молока от 10,5 до 12,5%. Биохимические процессы сквашивания связаны с видом микрофлоры закваски, которые формируют консистенцию йогурта. Для производства йогурта рекомендованы к использованию комбинированные закваски. Активность комбинированного состава бактериальной закваски (St- 3 + AT-5; St - 3 + F-811) позволяет быстрее достичь нормируемых значений кислотности в йогурте и тем самым, сократить технологический цикл производства на 1 час. при наилучших показателях консистенции.

Ключевые слова: белок, молочный жир, йогурт, закваска, сухое молоко, рецептура.

Methodical aspects of producing biologically complete yogurt

Irina V. Buyanova [1] ibuyanova_@mail.ru 0000-0002-2801-8478
Sergey A. Konovalov [2] sa.konovalov@omgau.org 0000-0003-3537-8081
Anna A. Derkanosova [3] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Konstantin K. Polyansky [3, 4] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466

1 Kuzbass State Agrarian University named after V.N. Poletskov, Kemerovo, Russia
2 Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Ploshchad, 1 str., Omsk, 644008, Russia
3 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia
4 Voronezh Branch of the Plekhanov Russian University of Economics, Karl Marx. 67A, Voronezh, 394030, Russia

Abstract. One of the key trends in the food industry's development in Russia and globally is the expansion of the range of functional food products. This study aimed to investigate technological methods for producing functional yogurt with increased milk protein content. The research objectives included examining the effect of the chemical composition of the standardized mixture on yogurt consistency, substantiating the fat/protein ratio and the type of bacterial starter. Direct-inoculation dry starters were used: pure cultures of bifidobacteria, mesophilic, and thermophilic lactic acid bacteria. Standard and generally accepted chemical, physicochemical, and analytical methods were employed. The study examined the influence of two biologically complete components—milk fat and protein—on the moisture-retaining capacity of fermented milk curds. It was found that a decrease in the fat/protein ratio reduces the amount of whey released from the curd, and, accordingly, increases its moisture-retaining capacity. Methods for improving yogurt consistency, the roles of protein and fat in the formulation, and their impact on curd viscosity and density were explored. The addition of skim milk powder in quantities of 10.0% and 12.0% is sufficient in the yogurt composition. Higher protein values of 5.1–5.2% are not recommended due to the occurrence of a consistency defect – flouriness. Based on the study of the density of the curd, the chemical composition of the yogurt mixture is recommended: the mass fraction of fat is 2.5–6.0%, the mass fraction of dry matter is 10.0–12.0%. Combinations of DVS cultures are recommended for yogurt production: St-Body 3 + YF-L811 and St-Body 3 + ABT-5, and optimal fermentation temperatures are set at 41–42°C.

Keywords: protein content, fat, water-holding capacity, yogurt, fermentation, starter.

Для цитирования
Буянова И.В., Коновалов С.А., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Методические аспекты выработки биологически полноценного йогурта // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 29–36. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-29-36

For citation
Buyanova I.V., Konovalov S.A., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. Methodical aspects of producing biologically complete yogurt. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 29–36. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-29-36

© 2025, Буянова И.В. и др. / Buyanova I.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Большинство видов кисломолочных продуктов относятся к традиционным и постоянно являются объектом изучения учеными, поскольку недостаточно изучены с помощью современных методов исследования. Данная группа молочных продуктов обладают уникальными диетическими свойствами и в соответствии с государственной программой здорового питания являются важным аспектом в доктрине оздоровления населения с рекомендациями на ежедневное употребление. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам здоровьесбережения нации, в соответствии с чем, группа кисломолочных напитков востребована населением страны. Кроме того, следует указать на высокую пищевую ценность, что определяет их как неотъемлемый элемент здорового питания и многих специализированных диет [16]. Химический состав отличает высокое содержание основных и биологически активных веществ, в частности иммуноглобулинов различных фракций, витаминов и микроэлементов, полезных видов заквасочных микроорганизмов и бифидофлоры [3, 4].

Более детальное изучение технологических особенностей йогурта, как наиболее популярного и востребованного у потребителей напитка, позволит совершенствовать его технологию и вырабатывать продукт с новыми биологическими свойствами, повысить степень усвояемости. Йогурт отличает от других видов молочных напитков высокое количественное содержание белка. В силу дефицита белка в рационе питания людей актуальным становится продолжение проведения исследований по совершенствованию методологических подходов к технологии производства наиболее популярного у населения молочного напитка.

Йогурт отличает сбалансированность по всем элементам питания, особенно по содержанию биологически важных полноценных белков. Состав штаммов микроорганизмов в бактериальной закваске определяет физиологическое назначение для определенных групп населения, а высокая кислотность продукта, определяемая степенью накопления молочной кислоты, обусловливает его диетические свойства. Для потребителей всегда важна консистенция – плотная, густая, без отделения сыворотки. В технологии производства отдельные производители используют загустители, стабилизационные системы, нарушая естественную среду молока. В связи с этим, регулирование консистенции йогурта можно добиться технологическими приемами. Натуральные свойства молока не нарушаются, сохраняется баланс питательных веществ и безопасность продукта.

В данной работе рассматриваются актуальные вопросы по совершенствованию методологии технологических операций, обусловливающие формирование структурно-механических свойств определяющие отличную консистенцию в соответствии с требованиями ГОСТ. Так, установлено влияние кислотности молочной среды на формирование сгустка йогурта. Окончательной стадией является завершающее нарастание кислотности до значений активной кислотности 4,5–4,3 и получение прочного сгустка [5–8]. Значение кислотности будет определяться активным охлаждение молочной среды до 18–20 ºС. Дальнейшее перемешивание перед розливом не отразится отрицательно на сформированной консистенции сгустка за счет созданных крепких химических связей SH–SH. Другой диапазон кислотности 5,1–4,7 ед. РН дает вялый, неоднородный сгусток, который не подлежит расфасовке, поскольку консистенция будет не соответствовать требованиям ГОСТ [3, 4].

В то же время отмечается другой фактор воздействия на структуру сгустка и консистенцию [3, 4]. Конечные технологические этапы, связанные с условиями хранения и транспортировки, могут улучшить или снизить оценки за консистенцию [8].

Изучение состояния вопроса позволило обозначить цель данной работы: провести исследование факторов, формирующих идентификационные характеристики консистенции биологически полноценного йогурта. В соответствии с целью исследования были сформированы задачи по совершенствованию рецептур биойогурта на базе молочного сырья отечественного производителя.

Материалы и методы

Объектами исследований на разных этапах работы являлись:

– молоко коровье сырое, соответствующее требованиям ГОСТ.

– молоко сухое обезжиренное ГОСТ;

– сухие лиофилизированные закваски прямого внесения – комплекс штаммов молочнокислых бактерий подвидов Lactococcus lactis, Lactobacillus helveticus, Streptococcus thermophiluse и др. Концентрация микроорганизмов была следующей: Lactococcus lactis ssp. Lactis не менее 1.5×10^9 КОЕ/г, – Lac. lactis subsp. Diacetilactis не менее 1.5×10^9 КОЕ/г, – Lactobacillus helveticus не менее 1.5×10^9 КОЕ/г, Streptococcus thermophiluse не менее 1.5×10^9 КОЕ/г.

В рамках совершенствования технологии йогурта были проведены исследования с использованием различных заквасочных культур. Эти исследования включали несколько ключевых этапов:

1. Выбор заквасочных культур: на первом этапе были определены наиболее подходящие заквасочные культуры для производства биойогурта. Эти культуры выбирались с учетом их способности к ферментации молока, вкусовых характеристик, сроков ферментации и других параметров.

2. Лабораторные исследования на этом этапе изучали активность культур, способность к ферментации, влияние на состав и свойства готового продукта. Также оценивалась стабильность культур и устойчивость к различным условиям производства.

3. Оптимизация рецептур: на основе полученных данных проводились работы по оптимизации рецептур кисломолочных напитков. С этой целью обосновывали рецептурные композиции для получения повышенного содержания белка и полезной микрофлоры.

Экспериментальные образцы с различными штаммами бактериальных культур вырабатывались по классической технологии йогуртов. Использовали комбинации штаммов культур микроорганизмов: Streptococcus salivarius ssp. Thermophilus; Lactobacillus plantarum; Lactobacillus acidophilus; Lactobacillus casei; Lactobacillus fermentum; bifidobacterium bifidum; Bifidobacterium breve; Bifidobacterium longum ssp. Linfantis для получения продукта с наилучшими структурно-механическими свойствами.

Результирующими критериями служили: химический состав молочной среды, плотность сгустка по способности удерживать сыворотку в своей структуре, изменение кислотности, органолептическая оценка консистенции йогурта.

При выполнении работы использовали стандартные и общепринятые химические, физико-химические методы исследований.

Отбор проб и подготовка их к анализу для физико-химических исследований производили в соответствие с требованиями ГОСТ 13928–84 «Молоко и сливки заготовляемые. Отбор проб и подготовка их к анализу» и ГОСТ 26809–86. Кислотность, титруемую определяли по ГОСТ 3624–92 «Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности». Активная кислотность – по ГОСТ 32892–2014 «Молоко. Метод измерения активной кислотности» электрометрическим методом на потенциометре pH – 121 в диапазоне измерений от 3,0 до 8,0 единиц pH. Содержание белка по ГОСТ 3445402018 «Продукция молочная. Определение массовой доли белка методом Кьельдаля». Содержание сухих веществ по ГОСТ 3626–73 «Молоко и молочные продукты. Методы определения влаги и сухого вещества» путем высушивания навески молока при 105 °С до постоянного веса. Содержание жира – по ГОСТ Р ИСО 2446–2011. «Молоко. Метод определения содержания жира. Кислотный метод Гербера». Синеретическую способность молочного сгустка определяли центрифужным методом с использованием центрифуги. Органолептические свойства йогурта определяли дегустационным анализом. Структурно-механические свойства определяли объективно на основе показателя динамической вязкости на вискозиметр Reotest – 01, изменяя скорости сдвига. Этот прибор позволяет точно измерять сопротивление жидкости при её перемещении.

Результаты

Образцы йогурта различного химического состава имели массовую долю жира в интервале от 0,1 до 6,0%, массовую долю сухих веществ от 8,2 до 14,3%. Отмечали низкие оценки за консистенцию, вкус. Видимо, сниженные дозы сухих веществ, и в, частности, рецептурной массы сухого обезжиренного молока, явились причиной неудовлетворительной оценки. На основе полученных оценок за экспериментальные образцы сделали вывод об улучшении всех характеристик йогурта с увеличением доли сухого обезжиренного молока в составе молочной смеси. Однако, отмечали появление крупитчатой консистенции в случае значительного повышения массы сухого обезжиренного молока в составе рецептурной смеси йогурта, что следует учесть при дальнейшем обосновании массы каждого ингредиента. Химический состав молочной смеси характеризуется наличием молочного жира, который в отвердевшем виде влияет на характер консистенции йогурта. Установлена зависимость: с повышением содержания жира йогурт характеризуется как плотный и густой. Так, йогурт с массовой долей жира от 4,0 до 6,0% дегустаторы характеризовали вкус как сливочный, полный. По всем критериям качества оптимальными дозами в составе йогурта являются: массовая доля жира 2,6–6,1%., сухого обезжиренного молока от 10,5% до 12,5%. Варианты экспериментальных образцов показаны на рисунке 1, отличающиеся количественным содержанием ингредиентов, соответственно имели различное содержание белка и жира, их соотношение при одинаковом количестве сухих веществ 8%.

Влияние химического состава молочной смеси образцов йогурта на структурно – механические свойства сгустка посредством доли выделившейся сыворотки показаны на рисунке 2.

Анализ экспериментальных данных показал, что в опытных образцах йогурта 1–4 с низким содержанием белка от 3,0 до 3,1% сгусток был недостаточно плотным с высокой долей отделившейся сыворотки в пределах от 82,5 до 75, 5, 0% от общего объема сгустка. В то же время образцы йогурта с повышенным содержанием молочного жира (№ 3, 4) показали меньшее количество сыворотки на поверхности продукта, что обусловлено высокими гидратационными свойствами молекулы жира, образуя оболочку мономолекулярной адсорбции.

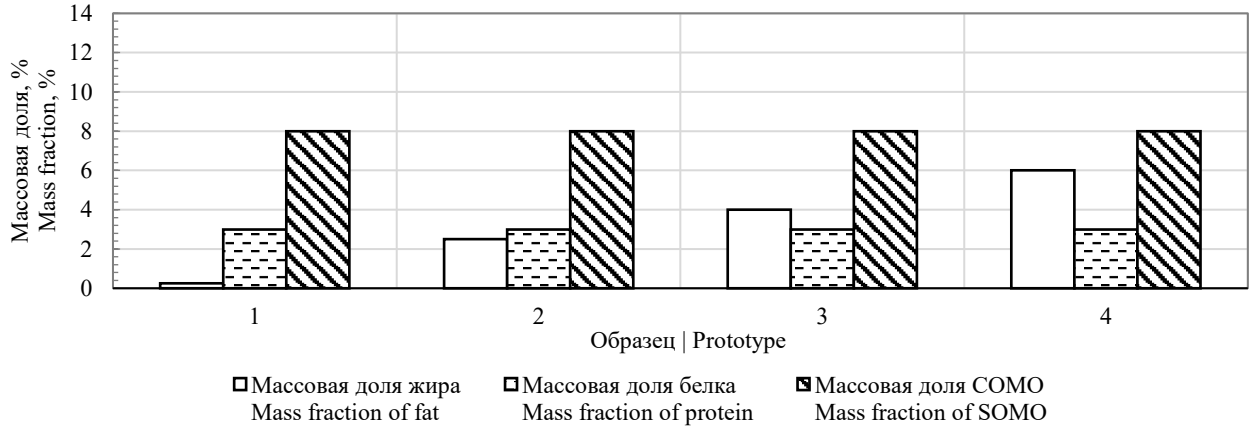


Рисунок 1. Экспериментальные образцы йогурта различного рецептурного состава и количественного содержания белка, жира, сухих веществ

Figure 1. Experimental yogurt samples of various formulations and quantitative content of protein, fat, and solids

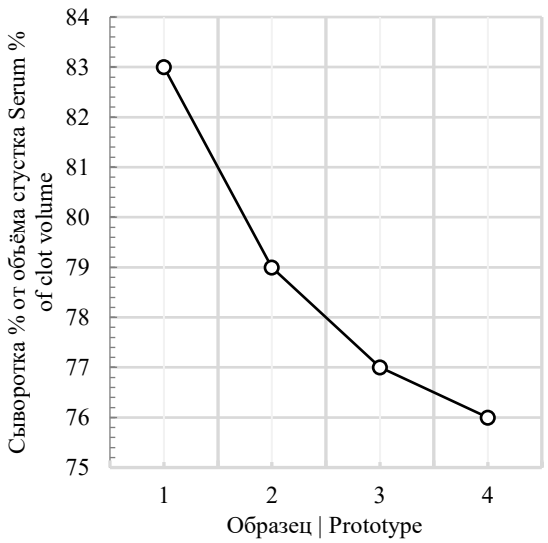


Рисунок 2. Влияние химического состава молочной смеси образцов йогурта на долю выделившейся сыворотки

Figure 2.The effect of the chemical composition of the milk mixture of yogurt samples on the proportion of released whey

Результаты показали, что в образцах № 1, 2 с низкими влагоудерживающими свойствами кислотных гелей необходимо повышать массовую долю белка путем совершенствования рецептуры за счет увеличения массы сухих молочных продуктов. Внесение сухого обезжиренного молока 10,5% и 12,5% приводило к повышению количественного содержания белка от 3,75% до 4,5%. Тем самым, влага мономолекулярной адсорбции субмицелл казеина прочно связывалась, и кислотные сгустки были прочными, на разрезе давали небольшое количество сыворотки, что выражалось в снижении доли от 78 до 65% от общего объема сгустка. Дозу сухого обезжиренного молока варьировали до содержания излишнего количества белка 5,25%, что отрицательно сказывалась на формирование консистенции и проявлялось в появлении порока консистенции – мучнистость.

Биохимические процессы сквашивания связанные с видом микрофлоры закваски формируют консистенцию йогурта. Исследования проводили с различными штаммами заквасок (таблица 1). Все они относятся к пробиотическим культурам функционального назначения.

Следует отметить, что комбинирование культур St 3 + AT-5 и St – 3 + F-811 в опытных образцах йогурта позволяет активизировать кислотообразование в сравнении с образцами, заквашенных штаммом St-Body 3, содержащей только Streptococcus thermophilus. Динамика кислотообразования, контролируемая в течение процесса сквашивания опытных образцов йогурта, проиллюстрирована на рисунке 3.

Результаты показывают, что процесс ферментации проходил наиболее активно в диапазоне оптимальных температурных режимов 41–43 ºС для указанных видов микроорганизмов, и одновременно при более низких значениях температур в диапазоне 37–38 ºС и 39–41 ºС. Плотная консистенция йогурта зафиксирована при нарастании кислотности среды до 64–76 ºТ.

Таблица 1.

Характеристика бактериальных заквасок молочнокислых бактерий

Table 1.

Characteristics of bacterial starter cultures of lactic acid bacteria

Характеристика Characteristic	Заквасочная культура | Starter culture		
	St–3	AT-5	F–811
Вид микрофлоры Type of microflora	1) *Streptococcus thermophilus*	1) *Streptococcus thermophilus* 2) *Lactobacillus acidophilus* 3) *Bifidobacterium longum*	1)*Streptococcus thermophilus* 2) *Lactobacillus delbruekii* подвид|subspecies *bulgaricus*
Минимальная клеточная концентрация, КОЕ/г Minimum cellular concentration CFU/g		5×10^{9}	5×10^{11}
Оптимальная температура сквашивания, ºС Optimal fermentation temperature, ºС	38–44	38 – 44	38–44
pH	4,8–5,3	4,9–5,2	4,6–4,9

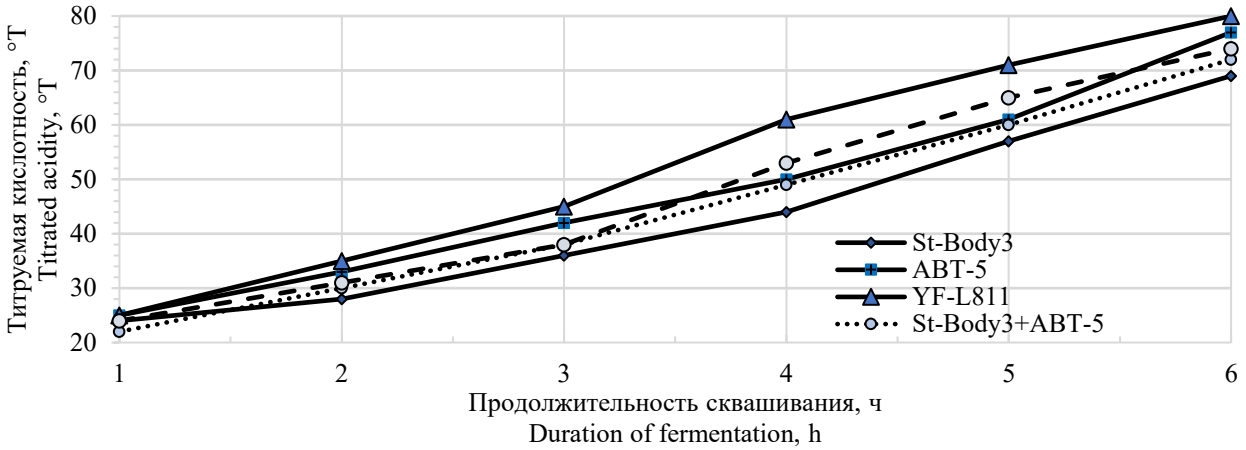


Рисунок 3. Динамика кислотонакопления при выработке йогурта

Figure 3. Dynamics of acid accumulation during yogurt production

Оптимальной продолжительностью сквашивания можно считать 3–4 часа, когда заканчивается активность молочнокислой микрофлоры, завершена коагуляция белков молочной смеси и получен плотный сгусток напитка. Использование заквасочных культур АТ-5 и F-811 в составе закваски для йогурта ускоряет накопление молочной кислоты, и коагуляция белков молока проходит быстрее, за 2,5–3 час. с образованием плотной структуры. Видимо штаммы Lactobacillus acidophilus и Lactobacillus delbruekii подвида bulgaricus отличаются высокой скоростью ферментирования. Аналогичной динамикой обладают культуры комбинированной закваски St -3 + AT-5; St -3 + F – 811, сокращая время выработки йогурта в соответствии с требованиями ГОСТ до 2,5–3,0 час. Таким образом, использование комбинированных заквасочных культур позволяет ускорить технологический процесс производства с наилучшими характеристиками готового продукта, особенно в отношении формирования консистенции.

Обсуждение

Результатами исследований установлено, что в формировании структуры кисломолочных продуктов наряду с белком принимает участие и молочный жир. Зафиксирована динамика сокращения количества выделившейся сыворотки по мере увеличения количественного содержания жира, и, следовательно, степени его влияния на образование гелевой структуры. На этапе исследований рассматривалось влияние двух биологически полноценных компонентов – молочного жира и белка на способность удерживать сыворотку в структуре сгустка йогурта.

Установлена зависимость между объемом выделившейся сыворотки из кислотного сгустка и значением соотношения жир / белок в составе готового продукта. Установлено, что со снижением значения соотношения жир / белок сокращается количество выделившейся сыворотки из сгустка, и, соответственно, увеличивается способность к удержанию влаги. При использовании сухого обезжиренного молока на этапе составления смеси, с целью устранения пороков консистенции, необходимо руководствоваться улучшением влагоудерживающей способности кислотных сгустков за счет оптимальных значений молочного белка и жира в составе сухого обезжиренного молока. Анализировали динамику кислотообразования в течение сквашивания при различных температурных режимах с определением оптимальных условий развития микрофлоры бактериальной закваски.

Отмечали, что динамика накопления молочной кислоты была наиболее активной при использовании отдельных штаммов микроорганизмов АТ-5 и F–811 и характеризовалась уровнем кислотности в интервале от 70 до 80 ºТ. Кроме того, активность комбинированного состава бактериальной закваски (St–3 + AT-5; St–3 + F-811) позволяет быстрее достичь нормируемых значений кислотности в йогурте и тем самым, сократить технологический цикл производства на 1 час. при наилучших показателях консистенции.

Заключение

В проведенной работе проводились исследования по улучшению консистенции йогурта, роли биологически полноценных составных частей молока – белка и жира в составе рецептурной смеси, а также сухого обезжиренного молока в формировании нормативных характеристик консистенции йогурта. Рассматривалась взаимосвязь между рецептурными компонентами и структурно-механическими свойствами кислотного геля йогурта. Химический состав молочной смеси характеризуется наличием молочного жира, который в отвердевшем виде влияет на характер консистенции йогурта. Установлена зависимость, что: с повышением содержания жира йогурт характеризуется как плотный и густой. По всем критериям качества оптимальными дозами в составе йогурта являются: массовая доля жира 2,6–6,1%., сухого обезжиренного молока от 10,5 до 12,5%.

Увеличение количественного содержания белка до 5,1–5,2% в составе йогурта путем включения в рецептурную смесь сухого обезжиренного молока усиливало гидратационные свойства продукта, что снижало степень отделения сыворотки. Но в практике не рекомендуется использование указанного варианта в силу появления порока – мучнистость. Установлено, что со снижением значения соотношения жир / белок сокращается количество выделившейся сыворотки, соответственно, создаются условия для формирования плотного сгустка в соответствии с нормативами. Биохимические процессы сквашивания связанные с видом микрофлоры закваски формируют консистенцию йогурта. Изучен процесс гелеобразования микрофлорой бактериальных культур. Для производства йогурта рекомендованы к использованию комбинированные закваски. Активность комбинированного состава бактериальной закваски (St-3 + AT-5; St-3 + F-811) позволяет быстрее достичь нормируемых значений кислотности в йогурте и тем самым, сократить технологический цикл производства на 1 час. при наилучших показателях консистенции.

Литература

1 Сумина С.Р., Янковская В.С. Анализ рынка кисломолочных напитков с повышенным содержанием белка // Пищевые инновации и биотехнологии: сб. тез. XIII Всерос. (нац.) науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2025. С. 305–306.

2 Бронникова В.В., Мошков В.И. Производство кисломолочных напитков функционального назначения // Совершенствование рациона питания населения, обеспечение качества и безопасности кулинарной продукции: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти Г.Г. Дубцова. М., 2022. С. 17–24.

3 Носкова В.И., Неронова Е.Ю. Изучение реологических характеристик кисломолочного напитка // Молочнохозяйственный вестник. 2024. № 1 (53). С. 195–206.

4 Ковалева О.А., Поповичева Н.Н., Киреева О.С. и др. Совершенствование рецептуры кисломолочного напитка с повышенной пищевой ценностью // Ползуновский вестник. 2022. № 2. С. 7–14.

5 Khan M.F., Khan M.A. Functional Yogurt: Types and Health Benefits // Foods. 2021. Vol. 10. № 4. 1000. doi: 10.3390/foods10041000

6 Mehta A., Gupta R.K. Innovations in Yogurt Production: Incorporation of Whole Grains and Their Health Benefits // Foods. 2020. Vol. 9. № 12. 1745. doi: 10.3390/foods9121745

7 Patel S., Ghosh S. The Impact of Fermented Dairy Products on Human Health: A Review of Current Research // Foods. 2021. Vol. 10. № 2. 300. doi: 10.3390/foods10020300

8 Petrevska S., Trajkovska B., Nakov G. et al. Sustainable Innovations in Oat-Based Yogurts: Modulating Quality and Sensory Properties with Chia Seeds and Honey // Sustainability. 2024. Vol. 16. № 20. 8944. doi: 10.3390/su16208944

9 Sharma R., Sharma A. Antioxidant Effect and Sensory Evaluation of Yogurt Supplemented with Ginseng Extract // Foods. 2021. Vol. 10. № 3. 639. doi: 10.3390/foods10030639

10 Zhang Y., Wang J. The Role of Probiotics in Yogurt: A Review of Health Benefits and Nutritional Value // Foods. 2022. Vol. 11. № 5. 700. doi: 10.3390/foods11050700

11 Харитонова И.Б. Исследование физико-химических и структурно-механических показателей овощного функционального кисломолочного напитка // Научная жизнь. 2024. Т. 19. № 1 (133). С. 92–100.

12 Arab M., Yousefi M., Khanniri E. et al. A comprehensive review on yogurt syneresis: Effect of processing conditions and added additives // Journal of Food Science and Technology. 2023. Vol. 60. № 6. P. 1656–1665. doi: 10.1007/s13197-022-05477-2

13 Gantumur M.A., Sukhbaatar N., Jiang Q. et al. Effect of modified fermented whey protein fortification on the functional, physical, microstructural, and sensory properties of low-fat yogurt // Food Control. 2024. Vol. 155. 110032. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.110032

14 Brodziak A., Król J., Barłowska J. et al. Changes in the physicochemical parameters of yoghurts with added whey protein in relation to the starter bacteria strains and storage time // Animals. 2020. Vol. 10. № 8. 1350. doi: 10.3390/ani10081350

15 Biçer Y., Telli A.E., Turkal G. et al. From Raw to Fermented: Uncovering the Microbial Wealth of Dairy // Fermentation. 2025. Vol. 11. № 10. 552. doi: 10.3390/fermentation11100552

16 Фаткуллин Р.И., Калинина И.В., Попова Н.В. и др. Разработка йогурта с антиоксидантными свойствами на основе использования инкапсулированного таксифолина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 2. С. 46–51. doi: 10.20914/2310-1202-2022-2-46-51

17 Kenzheyeva Z., Velyamov M., Dyuskalieva G. et al. Biotechnology of yogurt producing with specialized fermentation starters: safety indicators assessment // Food Science and Technology. 2021. Vol. 42. e31221. doi: 10.1590/fst.31221

18 Zobkova Z.S., Lazareva E.G., Semipyatniy V.K. Methodological approach to designing fermented dairy products with optimal biological value // Foods. 2022. Vol. 11. № 1. 114. doi: 10.3390/foods11010114

19 Sinotte V.M., Rubin B.E.R., Moreau C.S. et al. Making yogurt with the ant holobiont uncovers bacteria, acids, and enzymes for food fermentation // iScience. 2025. Vol. 28. № 10. 113595. doi: 10.1016/j.isci.2025.113595

20 Rathnakumar K., Jain S., Awasti N. et al. Ultrasonic processing: Effects on the physicochemical and microbiological aspects of dairy products // Critical Reviews in Biotechnology. 2024. Vol. 44. № 8. P. 1638–1652. doi: 10.1080/07388551.2024.2332941

21 Paz-Díaz H.J., Serna-Cock L., Vargas-Muñoz M.A. Effect of process variables on the physicochemical and rheological properties of yogurt // Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica. 2021. Vol. 24. № 1. e1778. doi: 10.31910/rudca.v24.n1.2021.1778

22 Коршик Т.С., Мастихина А.Л., Сергазиева О.Д. и др. Оптимизация ассортимента йогуртов с растительными добавками: товароведческий подход к выбору и оценке компонентов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 87. № 1. С. 175–183. doi: 10.20914/2310-1202-2025-1-175-183

References

1 Sumina S.R., Yankovskaya V.S. Market analysis of fermented milk drinks with high protein content. In: Food innovations and biotechnologies. Collection of abstracts of the XIII All-Russian (National) Scientific Conference of students, postgraduates and young scientists. Kemerovo, 2025. pp. 305–306. (in Russian)

2 Bronnikova V.V., Moshkov V.I. Production of fermented milk beverages for functional purposes. In: Improving the diet of the population, ensuring the quality and safety of culinary products. Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical conference with international participation, dedicated to the memory of Honorary Worker of Higher Education of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor Georgy Georgievich Dubtsov. Moscow, 2022. pp. 17–24. (in Russian)

3 Noskova V.I., Neronova E.Yu. Study of rheological characteristics of a fermented milk drink. Dairy Bulletin. 2024. no. 1(53). pp. 195–206. (in Russian)

4 Kovaleva O.A., Popovicheva N.N., Kireeva O.S., Lazareva T.N., Zhuchkov S.A. Improving the formulation of a fermented milk drink with increased nutritional value. Polzunovsky bulletin. 2022. no. 2. pp. 7–14. (in Russian)

5 Khan M.F., Khan M.A. Functional Yogurt: Types and Health Benefits. Foods. 2021. vol. 10. no. 4. p. 1000. doi:10.3390/foods10041000

6 Mehta A., Gupta R.K. Innovations in Yogurt Production: Incorporation of Whole Grains and Their Health Benefits. Foods. 2020. vol. 9. no. 12. p. 1745. doi:10.3390/foods9121745

7 Patel S., Ghosh S. The Impact of Fermented Dairy Products on Human Health: A Review of Current Research. Foods. 2021. vol. 10. no. 2. p. 300. doi:10.3390/foods10020300

8 Petrevska S., Trajkovska B., Nakov G., Zlatev Z., Raykova V., Ivanova N. Sustainable Innovations in Oat-Based Yogurts: Modulating Quality and Sensory Properties with Chia Seeds and Honey. Sustainability. 2024. vol. 16. no. 19. p. 8944. doi:10.3390/su16198944

9 Sharma R., Sharma A. Antioxidant Effect and Sensory Evaluation of Yogurt Supplemented with Ginseng Extract. Foods. 2021. vol. 10. no. 3. p. 639. doi:10.3390/foods10030639

10 Zhang Y., Wang J. The Role of Probiotics in Yogurt: A Review of Health Benefits and Nutritional Value. Foods. 2022. vol. 11. no. 5. p. 700. doi:10.3390/foods11050700

11 Kharitonova I.B. Investigation of physicochemical and structural-mechanical parameters of a vegetable functional fermented milk drink. Scientific life. 2024. vol. 19. no. 1(133). pp. 92–100. (in Russian)

12 Arab M., Yousefi M., Khanniri E. et al. A comprehensive review on yogurt syneresis: Effect of processing conditions and added additives. Journal of Food Science and Technology. 2023. vol. 60. no. 6. pp. 1656–1665. doi:10.1007/s13197-022-05477-2

13 Gantumur M.A., Sukhbaatar N., Jiang Q. et al. Effect of modified fermented whey protein fortification on the functional, physical, microstructural, and sensory properties of low-fat yogurt. Food Control. 2024. vol. 155. p. 110032. doi:10.1016/j.foodcont.2023.110032

14 Brodziak A., Król J., Barłowska J. et al. Changes in the physicochemical parameters of yoghurts with added whey protein in relation to the starter bacteria strains and storage time. Animals. 2020. vol. 10. no. 8. p. 1350. doi:10.3390/ani10081350

15 Biçer Y., Telli A.E., Turkal G. et al. From Raw to Fermented: Uncovering the Microbial Wealth of Dairy. Fermentation. 2025. vol. 11. no. 10. p. 552. doi:10.3390/fermentation11100552

16 Fatkullin R.I., Kalinina I.V., Popova N.V. et al. Development of yogurt with antioxidant properties based on the use of encapsulated taxifolin. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 46–51. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-46-51 (in Russian)

17 Kenzheyeva Z., Velyamov M., Dyuskalieva G. et al. Biotechnology of yogurt producing with specialized fermentation starters: safety indicators assessment. Food Science and Technology. 2021. vol. 42. p. e31221. doi:10.1590/fst.31221

18 Zobkova Z.S., Lazareva E.G., Semipyatniy V.K. Methodological approach to designing fermented dairy products with optimal biological value. Foods. 2022. vol. 11. no. 1. p. 114. doi:10.3390/foods11010114

19 Sinotte V.M., Rubin B.E.R., Moreau C.S. et al. Making yogurt with the ant holobiont uncovers bacteria, acids, and enzymes for food fermentation. iScience. 2025. vol. 28. no. 10. p. 113595. doi:10.1016/j.isci.2025.113595

20 Rathnakumar K., Jain S., Awasti N. et al. Ultrasonic processing: Effects on the physicochemical and microbiological aspects of dairy products. Critical Reviews in Biotechnology. 2024. vol. 44. no. 8. pp. 1638–1652. doi:10.1080/07388551.2024.2332941

21 Paz-Díaz H.J., Serna-Cock L., Vargas-Muñoz M.A. Effect of process variables on the physicochemical and rheological properties of yogurt. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica. 2021. vol. 24. no. 1. p. e1778. doi:10.31910/rudca.v24.n1.2021.1778

22 Korshik T.S., Mastikhina A.L., Sergazieva O.D. et al. Optimization of the assortment of yogurts with plant additives: commodity approach to the selection and evaluation of components. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 175–183. doi:10.20914/2310-1202-2025-1-175-183 (in Russian)

Сведения об авторах

Ирина В. Буянова д.т.н., профессор, Высшая аграрная школа, Кузбасский государственный аграрный университет имени В.Н. Полецкова, ул. Марковцева, 5, г. Кемерово 650056, Россия, ibuyanova_@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2801-8478

Сергей А. Коновалов к.т.н., доцент, кафедра продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина учреждения, 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 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, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнес-процессами, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030), 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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Irina V. Buyanova Dr. Sci. (Engin) professor, Higher Agricultural School, Kuzbass State Agrarian University named after V.N. Poletskov, 5 Markovtseva St., Kemerovo, 650056, Russia, ibuyanova_@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2801-8478

Sergey A. Konovalov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, 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) proffessor, restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, Russia, aa-derk@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

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, st., 67A, Voronezh, 394030, Russia, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8817-1466

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 01/07/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 03/09/2025
Received 01/07/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 03/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-37-43 Выберите тип статьи.
УДК 665.939.14 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование кинетических закономерностей процесса получения белков из шрота подсолнечника

Максим В. Копылов [1] kopylov-maks@yandex.ru 0000-0003-2678-2613
Анна А. Деркаосова [1] aa-derk@yandex.ru 0000-0002-9726-9262
Руслан У. Умарханов [1] rus_270487@mail.ru 0000-0001-5113-6096
Алексей А. Берестовой [1] berestovoy_1991@mail.ru 0000-0003-2255-9414
Алиса А. Торшина [1] alislis.tor@yandex.ru 0000-0003-3150-8686

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

Аннотация. Статья посвящена разработке и экспериментальному исследованию технологии комплексной переработки подсолнечного шрота с целью получения ценных белковых концентратов. Актуальность работы обусловлена необходимостью рационального и углубленного использования вторичных продуктов масложировой промышленности для создания пищевых и кормовых добавок с высокой питательной ценностью. В ходе исследования был апробирован многоступенчатый технологический процесс, включающий такие ключевые операции, как измельчение и фракционирование сырья, гидролиз, центрифугирование, баромембранное разделение и заключительное обезвоживание полученных фракций. Центральное место в работе уделено подбору оптимальных параметров баромембранного разделения. Были испытаны керамические и полимерные мембраны с различными размерами пор. Установлено, что полимерная мембрана (200 Да) задерживает весь белок, но не обеспечивает селективности, в то время как керамическая мембрана (1,4 мкм) пропускает свыше 60% целевого продукта. В результате комплексного анализа производительности и селективности оптимальной была признана керамическая мембрана с размером пор 0,14 мкм, 23 каналами и фильтрующей поверхностью 0,35 м². Второй важной частью работы стало исследование процесса сушки жидкого белкового концентрата на распылительной сушилке. Были определены рациональные режимы, обеспечивающие получение сухого сыпучего продукта с заданными качественными показателями. Наибольшая эффективность достигнута при использовании форсунки диаметром 2,0 мм, температуре теплоносителя на входе 384,3–390 К и на выходе 348,0–352,5 К, а также скорости подачи продукта 3,09–3,42 кг/ч. Это позволило получить готовый порошок светло-коричневого цвета с влажностью 6,48–6,83%. В результате работы была научно обоснована и экспериментально подтверждена эффективность предложенной технологии, определены оптимальные параметры ключевых стадий процесса, что позволяет рекомендовать ее для практической реализации в условиях перерабатывающих предприятий.

Ключевые слова: комплексная переработка, подсолнечный шрот, белковые фракции, баромембранное разделение, кинетические закономерности..

Investigation of kinetic patterns of the process of obtaining proteins from sunflower meal

Maxim V. Kopylov [1] kopylov-maks@yandex.ru 0000-0003-2678-2613
Anna A. Derkanosova [1] aa-derk@yandex.ru 0000-0002-9726-9262
Ruslan U. Umarkhanov [1] rus_270487@mail.ru 0000-0001-5113-6096
Alexey A. Berestovoy [1] berestovoy_1991@mail.ru 0000-0003-2255-9414
Alisa A. Torshina [1] alislis.tor@yandex.ru 0000-0003-3150-8686

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

Abstract. The article is devoted to the development and experimental research of the technology of complex processing of sunflower meal in order to obtain valuable protein concentrates. The relevance of the work is due to the need for rational and in-depth use of secondary products of the fat and oil industry to create food and feed additives with high nutritional value. During the research, a multi-stage technological process was tested, including such key operations as crushing and fractionation of raw materials, hydrolysis, centrifugation, baromembrane separation and final dehydration of the obtained fractions. The central place in the work is given to the selection of optimal parameters of baromembrane separation. Ceramic and polymer membranes with different pore sizes were tested. It was found that the polymer membrane (200 Da) retains the entire protein, but does not provide selectivity, while the ceramic membrane (1.4 microns) passes over 60% of the target product. As a result of a comprehensive analysis of performance and selectivity, a ceramic membrane with a pore size of 0.14 microns, 23 channels and a filter surface of 0.35 m2 was found to be optimal. The second important part of the work was the study of the drying process of liquid protein concentrate on a spray dryer. Rational modes have been identified to ensure the production of a dry bulk product with specified quality parameters. The highest efficiency was achieved using a 2.0 mm diameter nozzle, a coolant inlet temperature of 384.3–390 K and an outlet temperature of 348.0–352.5 K, and a product feed rate of 3.09–3.42 kg/h. This made it possible to obtain a ready-made powder of light brown color with a moisture content of 6.48–6.83%. As a result of the work, the effectiveness of the proposed technology was scientifically substantiated and experimentally confirmed, the optimal parameters of the key stages of the process were determined, which makes it possible to recommend it for practical implementation in the conditions of processing enterprises.

Keywords: complex processing, sunflower meal, protein fractions, baromembrane separation, kinetic patterns.

Для цитирования
Копылов М.В., Деркаосова А.А., Умарханов Р.У., БерестовоймА.А., Торшина А.А. Исследование кинетических закономерностей процесса получения белков из шрота подсолнечника // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 37–43. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-37-43

For citation
Kopylov M.V., Derkanosova A.A., Umarkhanov R.U., Berestovoy A.A., Torshina A.A. Investigation of kinetic patterns of the process of obtaining proteins from sunflower meal. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 37–43. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-37-43

© 2025, Копылов М.В. и др. / Kopylov M.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Растущий спрос на белок для пищевых и кормовых целей в условиях ограниченности ресурсов обуславливает активный поиск новых и рационализацию существующих источников его получения. Особое внимание уделяется полноценной переработке побочных продуктов агропромышленного комплекса, что позволяет повысить рентабельность основных производств и решить вопросы ресурсосбережения. Одним из таких перспективных источников являются шроты и жмыхи масличных культур, в частности, подсолнечника и рапса. Однако традиционные методы переработки данных продуктов не позволяют эффективно выделять и концентрировать белковые фракции, что приводит к их недоиспользованию и получению товаров с невысокой добавленной стоимостью.

Результаты и обсуждение

Технология комплексной переработки подсолнечного шрота включает следующие операции: измельчение и фракционирование шрота, гидролиз, центрифугирование, баромембранное разделение, обезвоживание белкового концентрата, обезвоживание углеводного комплекса.

Экспериментальные исследования по концентрированию белковых составляющих из подсолнечного шрота проводили с помощью баромембранной установки «ВОДОПАД УМТКп-1 (рисунок 1).

В ходе экспериментальных исследований были апробированы керамические мембраны («Tami») с размерами 1,4 мкм, 0,14 мкм, полимерные мембраны («Нанотех») с размерами пор 200 Да. Основными параметрами баромембранного разделения является размер пор, поддержание постоянной температуры продукта и давление в системе.

Было установлено, что керамическая мембрана с размерами пор 1,4 мкм улавливает только крупные фракции белков, которые составляют минимальное количество, при этом более 60 % белков уходит в пермеат. Полимерные мембраны с размерами пор 200 Да, улавливают весь белок и остальные мелкодисперстные, составляющие которые входят в состав субстрата. Установлено, что оптимальной мембраной для баромембранного разделения сыворотки являются керамические мембраны со следующими характеристиками: размер пор – 0,14 мкм, внешний диаметр мембраны – 25 мм, количество каналов – 23 шт., гидравлический диаметр канала – 3,5 мм, фильтрующая поверхность мембраны – 0,35 м^2.

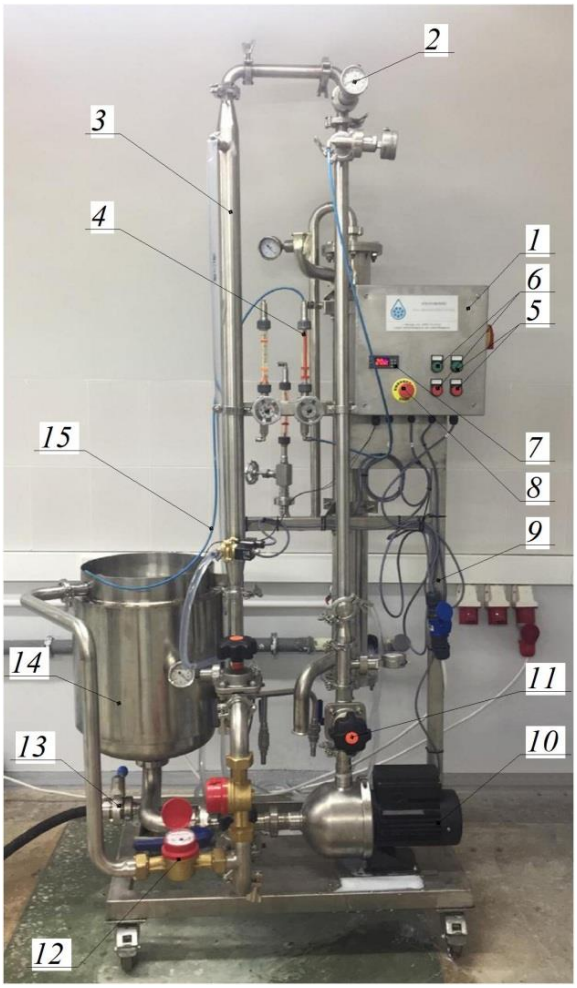


Рисунок 1. Баромембранная установка: 1 – щит управления, 2 – манометр, 3 – теплообменник, 4 – ротаметр, 5 – кнопки пуск/стоп электродвигателя, 6 – кнопки контроля датчика температуры, 7 – датчик контроля температуры, 8 – кнопка отключения установки, 9 – рама, 10 – насос, 11 – задвижка, 12 – расходомер, 13 – кран для слива концентрата, 14 – емкость, 15 – трубка для слива пермеата

Figure 1. Baromembrane installation: 1 – control panel, 2 – pressure gauge, 3 – heat exchanger, 4 – rotameter, 5 – start buttons/electric motor stop, 6 – temperature sensor control buttons, 7 – temperature control sensor, 8 – installation shutdown button, 9 - frame, 10 – pump, 11 – valve, 12 – flow meter, 13 – faucet for draining concentrate, 14 – container, 15 – permeate drain tube

На рисунок 2 представлены зависимости производительности мембранной установки (по фильтрату) от времени: 1 – керамическая, 1,4 мкм, 23 канала; 2 – керамическая, 0,14 мкм, 23 канала; 3 – керамическая, 0,14 мкм, 8 каналов; 4 – полисульфон, 200 Да.

Из полученных зависимостей видно, что наиболее эффективной мембраной для получения концентрата белков является керамическая мембрана с размером пор 0,14 мкм с числом каналов – 23 шт.

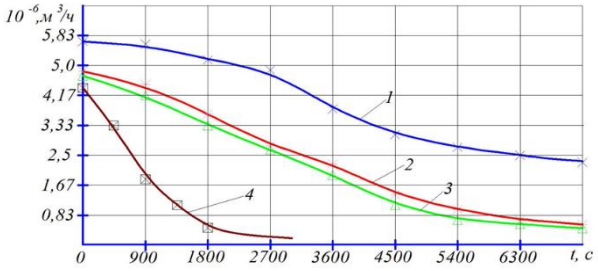


Рисунок 2. Зависимости производительности баромембранной установки (по фильтрату) от времени t, с

Figure 2. Dependences of the performance of the baromembrane installation (by filtrate) on time t, c

На рисунке 3 представлены зависимости проницаемости УФ мембран от давления (по фильтрату при Т = 293 К). У мембран, изготовленных из полисульфона с размером пор 200 Да, проницаемость мембран не превышает $15 \cdot 10^{-3}$ $м^3/м^2 \cdot ч$. При этом через керамическую мембрану с размером пор 1,4 мкм, проходит большое количество белков. Установлено, что оптимальной для фильтрования белков являются керамические мембраны с размером пор 0,14 мкм. Немаловажным показателем, влияющим на проницаемость мембран, является температура.

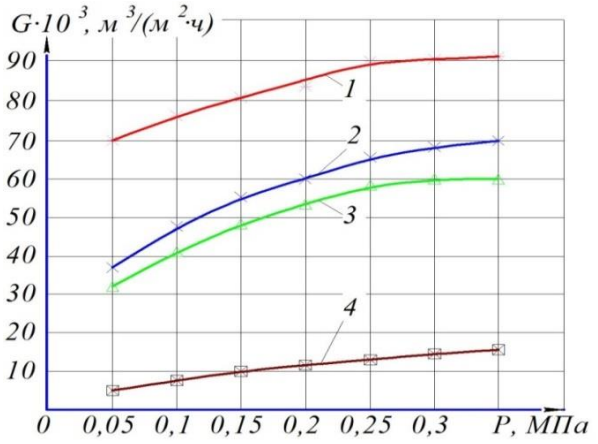


Рисунок 3. Зависимости проницаемости УФ мембран от давления (по фильтрату при Т = 293 К)

Figure 3. Dependence of the permeability of UV membranes on pressure (by filtrate at T = 293 K)

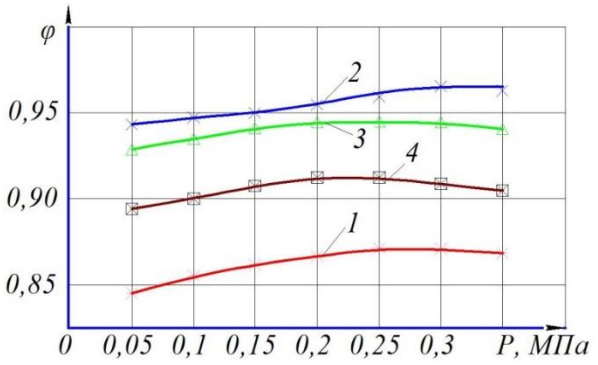


Рисунок 4. Зависимости селективности УФ мембран от давления (по фильтрату при Т = 293 К)

Figure 4. Dependence of the selectivity of UV membranes on pressure (by filtrate at T = 293 K)

Селективность мембраны – это заданное свойство мембраны, иметь различную проницаемость для компонентов разделяемой смеси. На рисунке 4 представлены зависимости селективности УФ мембран от давления (по фильтрату при Т = 293 К).

Экспериментальные исследования по сушке продукта на распылительной сушилке осуществлялись на установке YC-500 (рисунок 5), в состав которой входят форсунка 1, трубка подачи сжатого воздуха 2, сушильная камера 3, тумблер питания 4, сборник конденсата 5, приемная емкость 6, циклонный сепаратор 7, панель управления 8, перистальтический насос 9, трубка подачи продукта 10, трубка защиты системы от засорения 11, компрессор 12, отвод отработанного воздуха 13, смотровое окно 14.

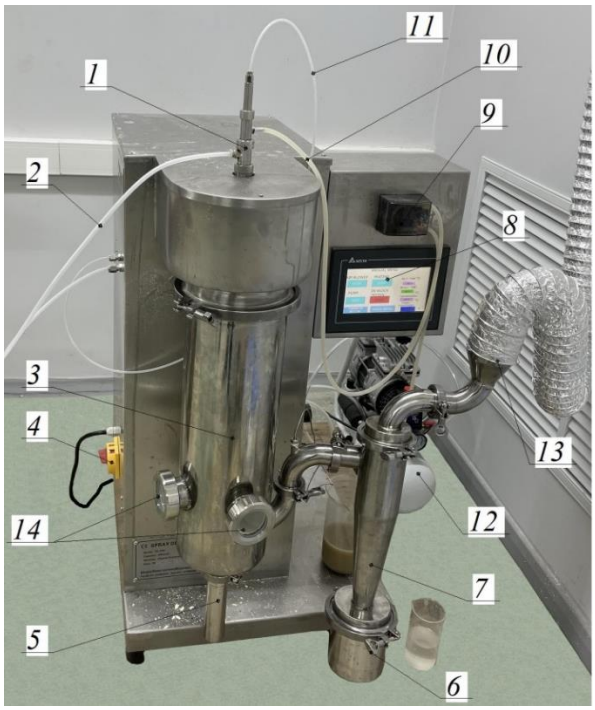


Рисунок 5. Распылительная сушилка YC-500: 1 – форсунка, 2 – трубка подачи сжатого воздуха, сушильная камера, 4 – тумблер питания, 5 – сборник конденсата, 6 – приемная емкость, 7 – циклонный сепаратор, 8 – панель управления, 9 – перистальтический насос, 10 – трубка подачи продукта, 11 – трубка защиты системы от засорения, 12 – компрессор, 13 – отвод отработанного воздуха, 14 – смотровое окно

Figure 5. Spray dryer YC-500: 1 – nozzle, 2 – compressed air supply tube, drying chamber, 4 – power switch, 5 – condensate collector, 6 – receiving tank, 7 – cyclone separator, 8 – control panel, 9 – peristaltic pump, 10 – product supply tube, 11 – protection tube anti–clogging systems, 12 – compressor, 13 – exhaust air outlet, 14 - viewing window

Подготовленный жидкий продукт подается насосом-дозатором в форсунку. Нагретый до необходимой температуры калорифером воздух при помощи вентилятора подается в сушильную камеру. Отделение высушенного порошка от транспортирующего воздуха осуществляется в циклоне, из которого он разгружается в сборную емкость. Кроме того, был использован отсасывающий вентилятор, в который отработанный воздух попадает по воздуховоду после циклона.

Из этой емкости жидкий продукт по продуктопроводу засасывается насосом-дозатором и подается в форсунку. Белковый концентрат распыляется потоком воздуха в сушильной камере и высушивается в потоке нагретого воздуха. Отработанный воздух из сушилки, содержащий мелкие частицы раствора, движется навстречу распыленному раствору. В результате взаимодействия воздуха и капель происходит испарение, а сухие частицы осаждаются из воздушного потока. Из-за развитой поверхности диспергированных частиц процесс протекает почти мгновенно, что позволяет использовать высокие температуры газа без ухудшения качества продукта. Сухой порошкообразный продукт оседает на дно сушильной камеры и непрерывно удаляется. По показаниям весов определяется производительность установки по подаваемому на сушку жидкому продукту.

В исследованиях контролировались следующие параметры:

– расход воздуха, подаваемого на сушку (измерялся соплом «четверть круга» с микроманометром ММН);

– расход воздуха на распыл продукта G_v (измерялся ротаметром РС-40);

– температура воздуха на входе в сушильную камеру t1 и температура отработанного воздуха t2 (измерялась термопарами).

Скорость воздуха рассчитывали, как отношение расхода воздуха в единицу времени к площади сечения сушильной камеры. При проведении экспериментов варьировались параметры распыла исходного продукта, температуру входящего и отработанного воздуха.

Исследования сушки проводились при следующих параметрах вибрации: амплитуда колебаний 9 мм, расход воздуха на сушку 330 нм^3/ч.

В результате проведенных экспериментов по сушке белкового концентрата были получены образцы сухого продукта на разных режимах (рисунок 6). Установлено, что из поставляемого комплекта форсунок: 0,5 мм, 0,8 мм, 1,0 мм, 1,5 мм и 2,0 мм высушить продукт получается только на форсунке с диаметром 2,0 мм.



Рисунок 6. Поучаемый готовый продукт на распылительной сушилке

Figure 6. The finished product being taught on a spray dryer

При этом даже этот диаметр форсунки не обеспечивает непрерывность процесса сушки и периодически форсунка забивается. Готовый продукт (рисунок 6) получается светло-коричневого цвета и влажность составляет 5-7 %.

Образец № 1. Влажность концентрата, подаваемого на сушку, – 88.91 % (определена на экспресс-влагомере «Сарториус»). Температура воздуха, подаваемого на сушку в сушильную камеру 371,6-373,8 К. Температура воздуха, выходящего из сушильной камеры 342,3-346,5 К. Подача жидкого продукта на сушку – 2,4-3,0 кг/ч. Влажность сухого продукта – 7,4 % (определена на экспресс-влагомере Сарториус)

Образец № 2. Влажность концентрата, подаваемого на сушку, 85,03 (определена на экспресс-влагомере «Сарториус»). Температура воздуха, подаваемого на сушку в сушильную камеру 384,3-390 К. Температура воздуха, выходящего из сушильной камеры 348,0-352,5 К. Подача жидкого продукта на сушку – 3,09-3,42 кг/ч. Влажность сухого продукта – 6,48-6,83 % (определена на экспресс-влагомере Сарториус).

Правильно подобранные параметры сушки позволяют получать качественный готовый продукт в сыпучем виде (рисунок 7).

На рисунках 7-8 представлены кинетические зависимости процесса сушки белкового концентрата на распылительной сушилке.

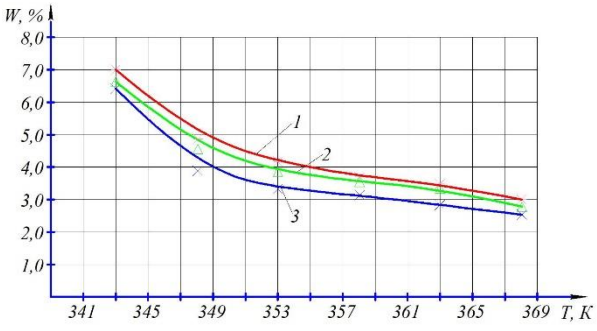


Рисунок 7. Зависимость влажности подсолнечного белка W, % от температуры Т, К при частоте вращения насоса 0,2 об/с: 1 – содержание СВ = 12,2 %; 2 – СВ = 13,7 %; 3 – СВ = 15,6 %

Figure 7. The dependence of the moisture content of sunflower protein W, % on the temperature T, K at a pump speed of 0.2 rpm: 1 – CB content = 12.2%; 2 – CB = 13.7%; 3 – CB = 15.6 %

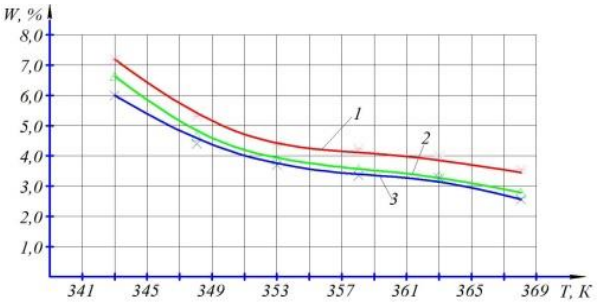


Рисунок 8. Зависимость влажности подсолнеччного белка W,% от температуры Т, К при содержании СВ = 13,4 % (частота вращения насоса: 1 – n = 0,15 об/с; 2 – n = 0,2 об/с; 3 – n = 0,25 об/с)

Figure 8. The dependence of the moisture content of sunflower protein W,% on the temperature T, K at the content CB = 13.4 % (pump rotation speed: 1 – n = 0.15 rpm; 2 – n = 0.2 rpm; 3 – n = 0.25 rpm)

Заключение

Установлено, что оптимальной мембраной для баромембранного разделения являются керамические мембраны со следующими характеристиками: размер пор – 0,14 мкм, внешний диаметр мембраны – 25 мм, количество каналов – 23 шт., гидравлический диаметр канала – 3,5 мм, фильтрующая поверхность мембраны – 0,35 м2. Выявлены кинетические зависимости процесса сушки белкового концентрата на распылительной сушилке, которые позволили определить рациональные параметры: влажность исходного концентрата 85,03, начальная температура теплоносителя 384,3-390 К, конечная температура отработанного воздуха 348,0-352,5 К, подача продукта 3,09-3,42 кг/ч, диаметр форсунки 2,0 мм, влажность сухого продукта – 6,48-6,83 %.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-26-00391 «Получение светлых концентратов подсолнечного белка с использованием адсорбционных методов и сенсорным формированием органолептического профиля».

Литература

1 Мельникова Е.И., Станиславская Е.Б., Копылов М.В. и др. Получение и применение сухого микропартикулята сывороточных белков в технологии вареных колбас // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 1. С. 137–143.

2 Василенко Л.И., Мещерякова О.Л., Берестовой А.А. и др. Ферментативный гидролиз балластных полимеров с последующим получением концентратов белков методом ультрафильтрации // Технология органических веществ: мат. 87-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2023. С. 441–444.

3 Доморощенкова М.Л., Иванова Т.Н., Петрова О.А. и др. Белковый потенциал семян подсолнечника. Исследования процессов получения пищевых белков из подсолнечного шрота // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2020. № 1-2. С. 24–29.

4 Щеколдина Т.В. Технологии получения белоксодержащего сырья из продуктов переработки семян подсолнечника // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 109. С. 360–378.

5 Романова А.Б., Самарина Е.А., Баурин Д.В. Получение белковых ферментолизатов шрота подсолнечника // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. 27. № 9 (149). С. 11–14.

6 Шагинова Л.О., Семенова А.А., Козлова О.В. и др. Исследование процесса получения белкового препарата из семян подсолнечника для использования в пищевой промышленности // Новые технологии. 2021. № 3. С. 41–50.

7 Ivanova P., Petkov K., Koleva M. et al. Optimization of protein extraction from sunflower meal produced in Bulgaria // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2012. Vol. 18. № 2. P. 153–160.

8 Dabbour M., He R., Ma H. et al. Optimization of ultrasound assisted extraction of protein from sunflower meal and its physicochemical and functional properties // Journal of Food Process Engineering. 2018. Vol. 41. № 5. e12799. doi: 10.1111/jfpe.12799

9 Dabbour M., He R., Ma H. et al. Ultrasonic-assisted protein extraction from sunflower meal: Kinetic modeling, functional, and structural traits // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2021. Vol. 74. 102824. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102824

10 Yust M.M., Pedroche J., Girón-Calle J. et al. Improvement of protein extraction from sunflower meal by hydrolysis with alcalase // Grasas y Aceites. 2003. Vol. 54. № 4. P. 419–423. doi: 10.3989/gya.2003.v54.i4.224

11 Richardson C.R., Hsu J.T., Hatfield E.E. et al. Sunflower meal as a protein supplement for growing ruminants // Journal of Animal Science. 1981. Vol. 53. № 3. P. 557–563. doi: 10.2527/jas1981.533557x

12 Nedelkov K.V. A new approach for processing and use of sunflower meal // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2023. Vol. 29. № 2. P. 245–252.

13 Wongsirichot P., Gonzalez-Miquel M., Winterburn J. Recent advances in rapeseed meal as alternative feedstock for industrial biotechnology // Biochemical Engineering Journal. 2022. Vol. 180. 108373. doi: 10.1016/j.bej.2022.108373

14 Gültekin Subaşı B., Casanova F., Capanoglu E. et al. A review on protein extracts from sunflower cake: Techno-functional properties and promising modification methods // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. Vol. 62. № 24. P. 6682–6697. doi: 10.1080/10408398.2021.1904823

15 Iegorov B., Kananykhina O., Turpurova T. Development of production technology of high-protein feed additive from by-products of sunflower oil production // Grain Products and Mixed Fodder's. 2022. Vol. 22. № 2. P. 17–23.

16 Тарасов В.Е., Коробко С.С. Использование вторичных ресурсов переработки семян подсолнечника для создания новых ПАВ натурального происхождения // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 2. С. 108–115. doi: 10.20914/2310-1202-2021-2-108-115

17 Гапонова Л.В., Гаврилова В.А., Демьяненко Т.Ф. и др. Подсолнечник и использование его в безотходной технологии переработки с целью производства продуктов лечебно-профилактического и детского питания // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 4. С. 181–189. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-181-189

18 Huang X., Li Z., Wang Y. et al. Structural, functional properties, and in vitro digestibility of sunflower protein concentrate as affected by extraction method: Isoelectric precipitation vs ultrafiltration // Food Chemistry. 2024. Vol. 439. 138090. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.138090

19 Sentís-Moré P., Ortega-Olivé N., Mas-Capdevila A. et al. Impact of centrifugation and vacuum filtration step on the yield and molecular weight distribution of protein hydrolysates from rapeseed and sunflower meals // LWT - Food Science and Technology. 2022. Vol. 165. 113741. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113741

20 Domorochshenkova M.L., Ivanova T.N., Petrova O.A. et al. Influence of the composition of sunflower meal on the efficiency of separating the protein part of the raw material from fiber by mechanical fractionation // Food Systems. 2024. Vol. 17. № 1. P. 3–13. doi: 10.21323/2618-9771-2024-17-1-3-13

References

1 Melnikova E.I., Stanislavskaya E.B., Kopylov M.V. et al. Production and application of dry whey protein microparticulate in cooked sausage technology. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 1. pp. 137–143. (in Russian)

2 Vasilenko L.I., Meshcheryakova O.L., Berestovoy A.A. et al. Enzymatic hydrolysis of ballast polymers with subsequent production of protein concentrates by ultrafiltration. Technology of organic substances: materials of the 87th scientific and technical conference of teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation). Minsk, 2023. pp. 441–444. (in Russian)

3 Domoroshchenkova M.L., Ivanova T.N., Petrova O.A. et al. Protein potential of sunflower seeds. Studies of the processes of obtaining food proteins from sunflower meal. Bulletin of the All-Russian Research Institute of Fats. 2020. no. 1-2. pp. 24–29. (in Russian)

4 Shchekoldina T.V. Technologies for obtaining protein-containing raw materials from sunflower seed processing products. Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2015. no. 109. pp. 360–378. (in Russian)

5 Romanova A.B., Samarina E.A., Baurin D.V. Production of protein enzymatic hydrolysates from sunflower meal. Advances in chemistry and chemical technology. 2013. vol. 27. no. 9(149). pp. 11–14. (in Russian)

6 Shaginova L.O., Semenova A.A., Kozlova O.V. et al. Study of the process of obtaining protein preparation from sunflower seeds for use in the food industry. New technologies. 2021. no. 3. pp. 41–50. (in Russian)

7 Ivanova P., Petkov K., Koleva M. et al. Optimization of protein extraction from sunflower meal produced in Bulgaria. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2012. vol. 18. no. 2. pp. 153–160.

8 Dabbour M., He R., Ma H. et al. Optimization of ultrasound assisted extraction of protein from sunflower meal and its physicochemical and functional properties. Journal of Food Process Engineering. 2018. vol. 41. no. 5. p. e12799. doi: 10.1111/jfpe.12799

9 Dabbour M., He R., Ma H. et al. Ultrasonic-assisted protein extraction from sunflower meal: Kinetic modeling, functional, and structural traits. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2021. vol. 74. p. 102824. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102824

10 Yust M.M., Pedroche J., Girón-Calle J. et al. Improvement of protein extraction from sunflower meal by hydrolysis with alcalase. Grasas y Aceites. 2003. vol. 54. no. 4. pp. 419–423. doi: 10.3989/gya.2003.v54.i4.224

11 Richardson C.R., Hsu J.T., Hatfield E.E. et al. Sunflower meal as a protein supplement for growing ruminants. Journal of Animal Science. 1981. vol. 53. no. 3. pp. 557–563. doi: 10.2527/jas1981.533557x

12 Nedelkov K.V. A new approach for processing and use of sunflower meal. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2023. vol. 29. no. 2. pp. 245–252.

13 Wongsirichot P., Gonzalez-Miquel M., Winterburn J. Recent advances in rapeseed meal as alternative feedstock for industrial biotechnology. Biochemical Engineering Journal. 2022. vol. 180. p. 108373. doi: 10.1016/j.bej.2022.108373

14 Gültekin Subaşı B., Casanova F., Capanoglu E. et al. A review on protein extracts from sunflower cake: Techno-functional properties and promising modification methods. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. vol. 62. no. 24. pp. 6682–6697. doi: 10.1080/10408398.2021.1904823

15 Iegorov B., Kananykhina O., Turpurova T. Development of production technology of high-protein feed additive from by-products of sunflower oil production. Grain Products and Mixed Fodder's. 2022. vol. 22. no. 2. pp. 17–23.

16 Tarasov V.E., Korobko S.S. Use of secondary resources of sunflower seed processing for the creation of new natural surfactants. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021. vol. 83. no. 2. pp. 108–115. doi:10.20914/2310-1202-2021-2-108-115 (in Russian)

17 Gaponova L.V., Gavrilova V.A., Demyanenko T.F. et al. Sunflower and its use in waste-free processing technology for the production of therapeutic, prophylactic and baby food products. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021. vol. 83. no. 4. pp. 181–189. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-181-189 (in Russian)

18 Huang X., Li Z., Wang Y. et al. Structural, functional properties, and in vitro digestibility of sunflower protein concentrate as affected by extraction method: Isoelectric precipitation vs ultrafiltration. Food Chemistry. 2024. vol. 439. p. 138090. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.138090

19 Sentís-Moré P., Ortega-Olivé N., Mas-Capdevila A. et al. Impact of centrifugation and vacuum filtration step on the yield and molecular weight distribution of protein hydrolysates from rapeseed and sunflower meals. LWT - Food Science and Technology. 2022. vol. 165. p. 113741. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113741

20 Domorochshenkova M.L., Ivanova T.N., Petrova O.A. et al. Influence of the composition of sunflower meal on the efficiency of separating the protein part of the raw material from fiber by mechanical fractionation. Food Systems. 2024. vol. 17. no. 1. pp. 3–13. doi: 10.21323/2618-9771-2024-17-1-3-13

Сведения об авторах

Максим В. Копылов д.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, kopylov-maks@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-2678-2613

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

Руслан У. Умарханов к.х.н., доцент, кафедра физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, rus_270487@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5113-6096

Алексей А. Берестовой к.т.н., доцент, кафедра информационной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия , berestovoy_1991@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2255-9414

Алиса А. Торшина к.т.н., инженер-химик, испытательный центр, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alislis.tor@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-3150-8686

Information about authors

Maxim V. Kopylov Dr. 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, kopylov-maks@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-2678-2613

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

Ruslan U. Umarkhanov Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, Physical and analytical chemistry department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, rus_270487@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5113-6096

Alexey A. Berestovoy Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, information security department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, berestovoy_1991@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2255-9414

Alisa A. Torshina Cand. Sci. (Engin.), chemical engineer, testing center, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alislis.tor@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-3150-8686

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 18/08/2025	**После редакции** 01/09/2025	**Принята в печать** 11/09/2025
Received 18/08/2025	**Accepted in revised** 01/09/2025	**Accepted** 11/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-44-49 Оригинальная статья/Research article
УДК 640 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Теплонасосное энергоснабжение флюидной технологии получения сухих CO_2-экстрактов из травы зверобоя

Яна П. Домбровская [1] yana_dombrovskaya@inbox.ru 0000-0003-2363-7648
Александр А. Шевцов [2] shevalol@rambler.ru 0000-0003-2599-5692
Алексей В. Дранников [1] drannikov@list.ru 0000-0002-3060-8688

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, д. 54 а, г. Воронеж, 394064, Россия

Аннотация. Производство высококачественной микробиологически чистой продукции является важной задачей для предприятий пищевой промышленности. Учитывая высокую микробиологическую загрязненность сырья (в основном муки), для производства хлебобулочных изделий, необходимо использовать комплексные технологии, а также продукты, обладающие антибактериальными или антибиотическими свойствами для предотвращения микробиологической порчи. Таким антибактериальным действием обладает трава зверобоя благодаря высокому содержанию веществ, обладающих бактерицидными свойствами (дубильные вещества, фитонциды, флавоноиды, эфирные масла) и антиоксидантов. Современные тенденции в развитии теории тепловых процессов подготовили условия для научного подхода к созданию промышленных энергосберегающих и экологически безопасных флюидных технологий получения сухих CO_2-экстрактов из растительного сырья на основе теплонасосного теплоснабжения. Выбор рабочих циклов тепловых насосов, озонобезопасных рабочих тел, рациональных схем вовлечения теплонасосного оборудования в структуру технологического пота составляет значительный объем исследований в области альтернативной энергетики. Для эффективного замещения в системах теплоснабжения невозобновляемых источников энергии на теплоту возобновляемых и вторичных энергоресурсов предложена теплонасосная технология получения сухих CO_2-экстрактов из травы зверобоя, в которой рассматриваются два смежных процесса – флюидная CO_2-экстракция и распылительная сушка, для реализации температурных режимов которых используется каскадный трехступенчатый тепловой насос. Определены органолептические и физико-химические показатели, а также химический состав сухого экстракта травы зверобоя, полученного по предлагаемой технологии, свидетельствующие о высоких антибактериальных свойствах.

Ключевые слова: микробиологическая порча, антибактериальные свойства, трава зверобоя, сверхкритические флюиды, тепловой насос, CO2-экстракция.

Heat pump power supply of fluid technology for obtaining dry CO_2-extracts from plant materials

Iana P. Dombrovskaia [1] yana_dombrovskaya@inbox.ru 0000-0003-2363-7648
Alexander A. Shevtsov [2] shevalol@rambler.ru 0000-0003-2599-5692
Alexey V. Drannikov [1] drannikov@list.ru 0000-0002-3060-8688

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
2 Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, st. Starykh Bolshevikov, 54 a, Voronezh, 394064, Russia

Abstract. Production of high-quality microbiologically pure products is an important task for food industry enterprises. Given the high microbiological contamination of raw materials (mainly flour), for the production of bakery products, it is necessary to use complex technologies, as well as products with antibacterial or antibiotic properties to prevent microbiological spoilage. St. John's wort has such an antibacterial effect due to the high content of substances with bactericidal properties (tannins, phytoncides, flavonoids, essential oils) and antioxidants. Modern trends in the development of the theory of thermal processes have prepared the conditions for a scientific approach to the creation of industrial energy-saving and environmentally friendly fluid technologies for obtaining dry CO_2-extracts from plant materials based on heat pump heating. The choice of working cycles of heat pumps, ozone-safe working fluids, rational schemes of involving heat pump equipment in the structure of technological sweat constitutes a significant volume of research in the field of alternative energy. For effective substitution in heat supply systems of non-renewable energy sources for heat of renewable and secondary energy resources, a heat pump technology for obtaining dry CO_2-extracts from St. John's wort is proposed, which considers two related processes – fluid CO_2-extraction and spray drying, for realization of temperature modes of which a cascade three-stage heat pump is used. Organoleptic and physicochemical indicators, as well as the chemical composition of the dry extract of St. John's wort, obtained according to the proposed technology, are determined, indicating high antibacterial properties.

Keywords: microbiological spoilage, antibacterial properties, St. John's wort, supercritical fluids, heat pump, CO2-extraction.

Для цитирования
Домбровская Я.П., Шевцов А.А., Дранников А.В. Теплонасосное энергоснабжение флюидной технологии получения сухих CO_2-экстрактов из травы зверобоя // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 44–49. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-44-49

For citation
Dombrovskaya Ya.P., Shevtsov A.A., Drannikov A.V. Heat pump power supply of fluid technology for obtaining dry CO_2-extracts from plant materials. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 44–49. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-44-49

© 2025, Домбровская Я.П. и др. / Dombrovskaya Ya.P. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Как показали многочисленные исследования, самыми уязвимыми и часто нарушаемыми показателями при производстве продуктов питания, как в изделиях, так и в сырье, являются микробиологические показатели. Решение этой задачи тесно связано с постоянным входным контролем основного и дополнительного сырья, соблюдением санитарно-гигиенических требований в процессе производства и упаковывания готовой продукции [1].

Учитывая высокую микробиологическую загрязненность сырья, необходимо использовать комплексные технологии, а также продукты, обладающие антибактериальными или антибиотическими свойствами для предотвращения развития микробиологической порчи. Таким продуктом является сухой экстракт травы зверобоя, благодаря высокому содержанию веществ, обладающих бактерицидными свойствами (дубильные вещества, фитонциды, флавоноиды, эфирные масла), и антиоксидантов [2].

Сухой экстракт травы зверобоя может быть получен посредством процесса экстракции в среде сверхкритического диоксида углерода с последующей сушкой. Несмотря на очевидные преимущества сверхкритических флюидных технологий их нельзя признать энергоэффективным, обеспечивающие сбалансированное распределение тепловых и материальных потоков, что не создает перспектив снижения энергозатрат на единицу массы получаемого сухого экстракта.

Современная теоретико-аналитическая база для дальнейшего развития принципиально новых сверхкритических CO_2-технологий, и прежде всего в области CO_2-экстрагирования ценных компонентов из сырья растительного происхождения отражена в работах профессора Касьянова Г.И. [3–6].

Из–за роста цен на традиционные энергоносители перерабатывающие предприятия вынуждены искать новые пути энергоснабжения с применением независимых альтернативных источников энергии. Предпосылкой для использования новых источников энергии является расширяющийся рынок современного теплонасосного оборудования, способного эффективно использовать низкопотенциальную энергию, которая в большинстве случаев выбрасывается в атмосферу. Тепловые насосы могут утилизировать низкопотенциальное тепло, снижая при этом не только финансовые, но и экологические издержки предприятия [7].

Цель работы – разработка энергоэффективной технологии получения сухих CO_2-экстрактов из травы зверобоя с применением теплового насоса.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели предложена технология, в которой рассматриваются два смежных процесса – флюидная CO_2-экстракция и распылительная сушка, для реализации которых необходимы низкотемпературные и высокотемпературные источники энергии. В этой связи в технологию получения сухого CO_2-экстракта из травы зверобоя вовлечен каскадный трехступенчатый парокомпрессионный тепловой насос, позволяющий получить энергоносители разного температурного потенциала и обеспечить необходимые температурные режимы на всех стадиях предлагаемой технологии [8].

Вымытая трава зверобоя подвергалась тонкому измельчению на мельнице–дезинтеграторе МД-2 до значения 0,25 мм.

Экспериментальные исследования проведены в установке для экстракции в сверхкритической среде фирмы ООО «ЛТД», содержащей экстракционный автоклав со следующими техническими характеристиками:

Рабочее давление (атм.) до	500;
Рабочая температура (°С) до	250;
Материал (из которого выполнен экстрактор) нерж. сталь	316L;
Внутренний объём (л)	1,5;
Внутренний диаметр (мм)	106;
Внутренняя высота (мм)	180;
Материал уплотнений	тефлон;
Используемые флюиды	сверхкритический CO_2.

Измельченные цветки и вегетативная масса зверобоя помещались в специальный экстракционный картридж экстракционного сосуда. После установки картриджа в автоклав и закрытия крышки запускали в работу компрессор высокого давления, который нагнетал сверхкритический диоксид углерода в экстракционный сосуд. Отделившийся экстракт высушивали в распылительной сушилке и получали порошок экстракта зверобоя. Режим сушки поддерживали в следующем интервале значений:

Давление жидкого экстракта в форсунках, МПа	0,2–0,4;
Расход жидкого экстракта, $м^3/ч$	4,1–4,2;
Скорость движения воздушного потока в рабочем объеме, м/с.	0,4–0,5;
Температура воздуха на входе в сушилку, °С	55–57;
Влагосодержание воздуха на входе в сушилку, кг/кг	0,005–0,006;
Температура воздуха на выходе из сушилки, °С	30–32;
Влажность порошка CO_2-экстракта, %	2,0–2,5;
Дисперсность порошка, мм	0,20–0,22;
Время сушки, с	6–7;

В процессе эксперимента по счетчику определяли удельные затраты электроэнергии на процессы CO_2-экстракции и распылительной сушки, которые на 15–20 % меньше, чем при водной экстракции и составили 360100 кДж /кг.

Результаты и обсуждение

Процесс экстракции в среде сверхкритического диоксида углерода связан со сложностью достижения критических параметров в условиях высоких температур и давлений. Для возврата отработанных энергоносителей в технологию необходимы замкнутые термодинамические циклы по материальным и тепловым потокам, что позволит обеспечить совершенствование промышленного производства сухого экстракта как энергоэффективного и экологически безопасного способа, направленного на минимизацию «парникового эффекта», охрану окружающей среды и снижение потребления ресурсов [9].

Технология получения сухих CO_2-экстрактов (рисунок 1) включает колонны экстрактора *1*, *2*; затворы *3*, *4*, *5*, *6*, *7*, *8*, *9*, *10*; заслонки *39*, *40*, *41*, *42*; реверсивные насосы *11*, *12*, транспортеры *13*, *14*; газожидкостный сепаратор *15*; газгольдер *16*; двухступенчатый компрессор *17*, рекуперативные теплообменники *18*, *21*; флюидный насос *20*; резервуар для сжиженного диоксида углерода; компрессор *22*; распылительная сушилка *23* (с механической или пневматической форсункой); каскадный трехступенчатый тепловой насос, включающий компрессоры *24*, *25*, *26* соответственно первой второй и третьей ступени, конденсатор третьей ступени *27*, испарители-конденсаторы *28*, *29*, испаритель третьей ступени *30*; терморегулирующие вентили *31*, *32* и *33* первой, второй и третьей ступени; резервуар для накопления тосола *34*; фильтр тонкой очистки отработанного воздуха от взвешенных частиц *35*; двухсекционный аппарат для конденсации влаги из отработанного воздуха с секциями *36* и *37*; сборник конденсата *38*; вентилятор *43*; насосы *44*, *45*, *46*; смесители *47*, *48*, *48*; распределители потоков *50*, *51*, *52*, *53*; материальные и тепловые потоки: *1.0* – исходное измельченное растительное сырье; *1.1* – жидкий экстракт с высоким содержанием CO_2, *1.2* – отработанное растительное сырье; *1.3* – пары диоксида углерода; *1.4* – сжиженный диоксид углерода; *1.5* – жидкий экстракт без CO_2 ; *1.6* – сухой экстракт; *2.0* – воздух; *3.0* – конденсат; *4.0* – тосол; *5.0* – фреон R123; *6.0* – фреон R124; *7.0* – фреон R1270 (пропелен).

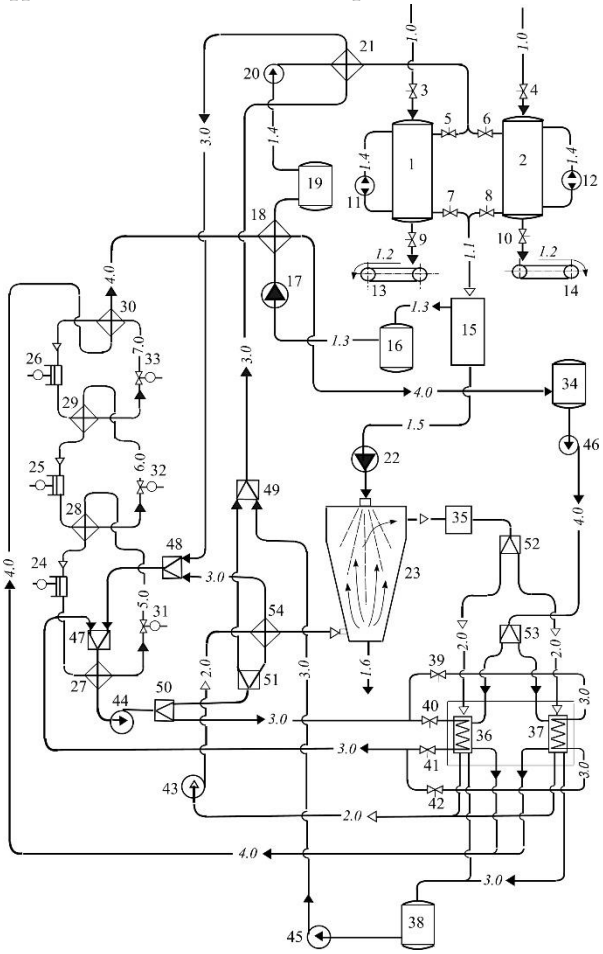


Рисунок 1. Теплонасосная технология получения сухих CO_2-экстрактов

Figure 1. Heat pump technology for obtaining dry CO_2-extracts

Измельченное растительного сырья с размерами частиц 0,5–8,0 мм подается в одну из колонн двухколонного экстрактора *1*, работающей в режиме экстракции. Экстракция проводится диоксидом углерода (CO_2) в сверхкритическом (флюидном) состоянии при давлении 10–40 МПа и температуре 10–50 °С в течение 15–60 мин при закрытых затворах *3*, *5*, *7*, *9*. В процессе экстракции реверсивным насосом *11* осуществляется многократная циркуляция флюидного диоксида углерода через слой измельченного растительного сырья в режиме фильтрации, периодически меняя направление движения потока. По завершении экстракции сначала открывается затвор *7* и выводится полученный экстракт в газожидкостный сепаратор *15*, а затем выгружается из колонны *1* отработанное растительное сырье через затвор *9* и отводится транспортером *13*. Во время проведения экстракции в колонне *1* измельченное растительное сырье загружается в колонну *2*.

Процесс экстракции растительного сырья в колонне *2* осуществляется аналогичным образом как в колонне *1*. После загрузки колонны *2* закрываются затворы *4*, *6*, *8* и *10*, проводится процесс экстракции с реверсивным движением потока жидкого CO_2 через слой растительного сырья с помощью реверсивного насоса *12*, а затем через затвор *8* экстракт отводится в газожидкостный сепаратор *15*, а через затвор *10* выгружается отработанное растительное сырье, которое выводится транспортером *14*. Попеременная работа колонн *1* и *2* двухколонного CO_2 –экстрактора обеспечивает непрерывность технологического потока в целом.

Установлено, что возможности повышения энергоэффективности тепловых и тепломассообменных процессов могут быть реализованы посредством рециркуляции диоксида углерода в непрерывном режиме получении сверкритических флюидов как в химической технологии, так и в технологии пищевых производств [10].

Рациональные параметры перевода паров диоксида углерода после газожидкостного сепаратора 15 сначала в жидкое, затем в газообразное и далее во флюидное состояние устанавливались в соответствии с диаграммой фазового состояния диоксида углерода, после чего сверхкритический CO_2 направлялся в колонну двухколонного экстрактора, работающую в режиме экстракции.

Температурные режимы при подготовке горячей воды и тосола обеспечивается каскадным трехступенчатым тепловым насосом [11].

Подбор рабочих тел для каждой ступени с характеристиками в требуемых пределах изменения температур в конденсаторе и испарителе осуществлялся в соответствии с энергосберегающим преобразованием теплоты в обратных термодинамических циклах Карно [12]. С точки зрения минимальной мощности на компрессионное сжатие, что непосредственно связано с экономией энергетических ресурсов, в качестве рабочих тел использованы: на первой ступени фреон R123, на второй ступени фреон R124 и на третьей ступени фреон R1270 (пропелен).

Ступенчатая структура парокомпрессионного теплового насоса позволяет обеспечить одновременное производство необходимого количества тепловой энергии для приготовления горячей воды с последующим рекуперативным теплообменом с воздухом, а также для получения холода, необходимого для сжижения диоксида углерода, и кондиционирования воздуха при его осушении.

В процессе распылительной сушки жидкого экстракта получают сухой порошок влажностью 2,0–3,5 % с эквивалентным диаметром частиц 0,2–1,0 мм, при этом влагосодержание отработанного воздуха достигает значений 0,025–0,030 кг/кг. Для снижения влагосодержания воздуха до 0,005 кг/кг пред сушкой в контуре рециркуляции проводится его кондиционирование в двухсекционном аппарате с попеременной работой секций в режимах конденсации и регенерации.

Предлагаемая технология получения сухих экстрактов из травы зверобоя и установка для его осуществления прошли экспериментальную проверку в лаборатории инструментальных методов исследования Воронежского государственного университета инженерных технологий.

Анализ органолептических и физико-химических свойств (таблица 1) и химического состава высушенного экстракта травы зверобоя (таблица 2) говорит о звозможности его использования в качестве антибактериального средства, предотвращающего микробиологическую порчу различных продуктов питания, например хлебобулочных изделий, благодаря высоким показателям антиоксидантной активности и кислотности [13].

Таблица 1.

Органолептические и физико-химические показатели сухого экстракта травы зверобоя

Table 1.

Organoleptic and physicochemical parameters of dry extract of St. John's wort

Показатель Index	Характеристика Characteristic
Органолептические | Organoleptic	
Внешний вид | Appearance	Сухой порошок
Цвет | Colour	Светло-коричневый
Вкус | Taste	Кисловато-сладкий
Физико-химические | Physic-chemical	
Кислотность, град | Acidity, deg	24,0
Массовая доля сухих веществ, % Mass fraction, %	96,5–98
Антиоксидантная активность, мг/г Antioxidant activity, mg/g	466,9

Таблица 2.

Химический состав сухого экстракта травы зверобоя

Table 2.

Chemical composition of dry extract of St. John's wort

Компонент Component	Значение Value
Вода, % | Water, %	2,5
Белки, % | Proteins, %	8,6
Жиры, % | Fats, %	0,2
Углеводы, % | Carbohydrates, %	88,7
Витамин А, мг/100г | Vitamin A, mg/100g	30,0
Витамин С, мг/100г | Vitamin C, mg/100g	45,0
Витамин Р, мг/100г | Vitamin P, mg/100g	32,0
Витамин РР, мг/100г | Vitamin PP, mg/100g	20,0
Дубильные вещества, % Tannins, %	10,0

Выводы

Предлагаемая технология:

– открывает реальные перспективы в разработке промышленного производства получения сухих CO_2-экстрактов из травы зверобоя с высокими антибактериальными свойствами;

– создает условия для повышения энергетической эффективности за счет возврата значительной части отработанных теплоносителей в технологический цикл, что является существенным резервом в снижении удельных энергозатрат: при средней стоимости сухого экстракта травы зверобоя 300–500 р за 50 г порошка затраты энергии (в ценах 2025 года) на его производство примерно составляют от 18 до 25 р/г. Предлагаемая технология обеспечивает снижение себестоимости со 18–25 р/г до 14–20 р/г, то есть снижение затраченной энергии на получение 1 г сухого экстракта до 20 %;

– предотвращает выброс отработанных теплоносителей и обеспечивает экологическую чистоту предлагаемой технологии.

Литература

1 Королев А.А., Смирнов С.О., Фазуллина О.Ф. Определение критических контрольных точек при производстве макаронных изделий // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 106–112.

2 Постраш И.Ю. Трава зверобоя продырявленного: химический состав, свойства, применение // Вестник АПК Верхневолжья. 2021. № 1. С. 57–63.

3 Касьянов Г.И. Техника и технология использования диоксида углерода в суб- и сверхкритическом состоянии // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 1. С. 130–135.

4 Касьянов Г.И. Эффективность использования диоксида углерода в качестве экстрагента // Повышение качества и безопасности пищевых продуктов: мат. X Всерос. науч.-практ. конф. 2020. С. 102–105.

5 Иночкина Е.В., Касьянов Г.И., Малашенко Н.Л. и др. Эффективность процесса CO_2-экстракции с позиций системного и экономического анализа // Биотехнологические, экологические и экономические аспекты создания безопасных продуктов питания специализированного назначения: мат. междунар. науч.-практ. конф. Краснодар, 2020. С. 94–99.

6 Меньшутина Н.В., Казеев И.В., Артемьев А.И. и др. Применение сверхкритической экстракции для выделения химических соединений // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. Вып. 6. С. 4–19.

7 Гумеров Ф.М. Технологии сверхкритических флюидов. Экономическая целесообразность. М.: Бутлеровское наследие, 2019. 440 с.

8 Surup G.R., Trubetskaya A., Tang P. et al. The effect of wood composition and supercritical CO_2 extraction on charcoal production in ferroalloy industries // Energy. 2020. Vol. 193. 116696. doi: 10.1016/j.energy.2019.116696

9 Домбровская Я.П., Дранников А.В., Дерканосова А.А. Научное обеспечение ресурсосберегающей технологии хлеба из пшеничной муки с длительным сроком хранения: монография. Воронеж: ВГУИТ, 2022. 109 с.

10 Использование тепловых насосов в мире – статистика, тенденции, перспективы. URL: https://vteple.xyz/ispolzovanie-teplovyihnasosov-v-mire (дата обращения: 03.02.2020).

11 Пат. 2810005 C1 Российская Федерация, МПК C11B 9/00, C11B 1/10. Способ получения сухих CO_2-экстрактов из растительного сырья и установка для его осуществления / Домбровская Я.П., Дранников А.В., Шевцов А.А.; заявитель и патентообладатель ВГУИТ. № 2023111225; заявл. 24.04.2023; опубл. 27.11.2023, Бюл. № 36.

12 Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. 142 с.

13 Дранников А.В., Шевцов А.А., Домбровская Я.П. и др. Способы получения экстракта травы зверобоя для пищевой промышленности // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 2 (92). С. 147–151.

14 Aleshkevich Y.S., Barbashov A.V., Zaporozhskii A.A. et al. System analysis and safety of the process to obtain CO_2-extracts from plants // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 640. № 4. 042018. doi: 10.1088/1755-1315/640/4/042018

15 Vázquez L., Fornari T., Hernández E.J. et al. Supercritical fluid technology for lupin hulls valorization: extraction and fractionation of lupeol // Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. Vol. 14. № 24. P. 32453–32463. doi: 10.1007/s13399-024-05511-7

16 Burgaz O., Kocak E., Yilmaz D. et al. Extraction of phenolic compounds and antioxidant activity analysis of Ficus carica L. seed oil using supercritical fluid technology // International Journal of Plant Based Pharmaceuticals. 2024. Vol. 4. № 2. P. 125–130. doi: 10.62313/ijpbp.2024.251

17 Amangeldinova M., Kukula-Koch W., Sakipova Z. et al. Bioactive Potential of Rheum cordatum Losinsk. Leaf Extracts: Phytochemical Insights from Supercritical CO2, Subcritical Ethanol and Ultrasound-Assisted Extractions // Plants. 2025. Vol. 14. № 15. 2314. doi: 10.3390/plants14152314

18 Karimkhani M.M., Nasrollahzadeh M., Maham M. et al. Extraction and purification of α-pinene; a comprehensive review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. Vol. 64. № 13. P. 4286–4311. doi: 10.1080/10408398.2022.2140331

19 Saadullah M., Ali B., Younas U. et al. Isolation and Characterization Techniques of Plant Secondary Metabolites // Plant Secondary Metabolites Chemistry and Role. Boca Raton: CRC Press, 2025. P. 25–45.

20 Kaundal M., Sharma R., Kumar R. Elevated CO2 and temperature effect on growth, phenology, biomass and hypericin content of Hypericum perforatum L. in the western Himalaya // Plant Physiology Reports. 2021. Vol. 26. № 1. P. 116–127. doi: 10.1007/s40502-021-00571-7

21 Сабирова Л.Ю., Петрова И.А., Козлов А.В. и др. Энергосберегающие аспекты процесса экстракции биоактивных соединений из растительного сырья сверхкритическими флюидными растворителями // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 6. С. 157–165.

References

1 Bogatyreva T.G., Sidorova O.A. Ways to improve the microbiological purity of bakery and pasta products (control methods). Moscow: TSNIITEI Khleboproduktov, 1994. 40 p. (in Russian)

2 Postrash I.Yu. St. John's wort herb: chemical composition, properties, application. Bulletin of the Upper Volga Region APK. 2021. no. 1. pp. 57–63. (in Russian)

3 Kasyanov G.I. Equipment and technology for using carbon dioxide in a sub- and supercritical state. Bulletin of VSUET. 2014. no. 1. pp. 130–135. (in Russian)

4 Kasyanov G.I. Efficiency of using carbon dioxide as an extractant. In: Improving the quality and safety of food products. Proceedings of the X All-Russian scientific and practical conference. 2020. pp. 102–105. (in Russian)

5 Inochkina E.V., Kasyanov G.I., Malashenko N.L., Silinskaya S.M. Efficiency of the CO_2 extraction process from the standpoint of system and economic analysis. In: Biotechnological, environmental and economic aspects of creating safe specialized food products. Proceedings of the international scientific and practical conference. Krasnodar, 2020. pp. 94–99. (in Russian)

6 Menshutina N.V., Kazeev I.V., Artemyev A.I., Bocharova O.A., Khudeev I.I. Application of supercritical extraction for the isolation of chemical compounds. News of universities. Chemistry and chemical technology. 2021. vol. 64. no. 6. pp. 4–19. (in Russian)

7 Gumerov F.M. Supercritical fluid technologies. Economic feasibility. Moscow: Butlerovskoe sledstvie, 2019. 440 p. (in Russian)

8 Surup G.R., Trubetskaya A., Tang P. et al. The effect of wood composition and supercritical CO_2 extraction on charcoal production in ferroalloy industries. Energy. 2020. vol. 193. p. 116696. doi: 10.1016/j.energy.2019.116696

9 Dombrovskaya Ya.P., Drannikov A.V., Derkanosova A.A. Scientific support for resource-saving technology of bread from wheat flour with a long shelf life. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2022. 109 p. (in Russian)

10 Use of heat pumps in the world - statistics, trends, prospects. URL: https://vteple.xyz/ispolzovanie-teplovyihnasosov-v-mire (in Russian)

11 Dombrovskaya Ya.P., Drannikov A.V., Shevtsov A.A. Patent RU 2810005. Method for producing dry CO_2 extracts from plant raw materials and installation for its implementation. 2023. (in Russian)

12 Trubaev P.A., Grishko B.M. Heat pumps. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2009. 142 p. (in Russian)

13 Drannikov A.V., Shevtsov A.A., Dombrovskaya Ya.P. et al. Methods for obtaining St. John's wort herb extract for the food industry. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. vol. 84. no. 2(92). pp. 147–151. (in Russian)

14 Aleshkevich Y.S., Barbashov A.V., Zaporozhskii A.A. et al. System analysis and safety of the process to obtain CO_2-extracts from plants. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 640. no. 4. p. 042018. doi: 10.1088/1755-1315/640/4/042018

15 Vázquez L., Fornari T., Hernández E.J. et al. Supercritical fluid technology for lupin hulls valorization: extraction and fractionation of lupeol. Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. vol. 14. no. 24. pp. 32453–32463. doi: 10.1007/s13399-024-05511-7

16 Burgaz O., Kocak E., Yilmaz D. et al. Extraction of phenolic compounds and antioxidant activity analysis of Ficus carica L. seed oil using supercritical fluid technology. International Journal of Plant Based Pharmaceuticals. 2024. vol. 4. no. 2. pp. 125–130. doi: 10.62313/ijpbp.2024.251

17 Amangeldinova M., Kukula-Koch W., Sakipova Z. et al. Bioactive Potential of Rheum cordatum Losinsk. Leaf Extracts: Phytochemical Insights from Supercritical CO_2, Subcritical Ethanol and Ultrasound-Assisted Extractions. Plants. 2025. vol. 14. no. 15. p. 2314. doi:10.3390/plants14152314

18 Karimkhani M.M., Nasrollahzadeh M., Maham M. et al. Extraction and purification of α-pinene; a comprehensive review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. vol. 64. no. 13. pp. 4286–4311. doi: 10.1080/10408398.2022.2140331

19 Saadullah M., Ali B., Younas U. et al. Isolation and Characterization Techniques of Plant Secondary Metabolites. Plant Secondary Metabolites Chemistry and Role. Boca Raton: CRC Press, 2025. pp. 25–45.

20 Kaundal M., Sharma R., Kumar R. Elevated CO_2 and temperature effect on growth, phenology, biomass and hypericin content of Hypericum perforatum L. in the western Himalaya. Plant Physiology Reports. 2021. vol. 26. no. 1. pp. 116–127. doi: 10.1007/s40502-021-00571-7

21 Sabirova L.Yu., Petrova I.A., Kozlov A.V. et al. Energy-saving aspects of the process of extracting bioactive compounds from plant raw materials with supercritical fluid solvents. News of higher educational institutions. Energy problems. 2024. vol. 26. no. 6. pp. 157–165. (in Russian)

Сведения об авторах

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

Александр А. Шевцов д.т.н., профессор, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, д. 54 а, г. Воронеж, 394064, Россия, shevalol@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0003-2599-5692

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

Information about authors

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

Alexander A. Shevtsov Dr. Sci. (Engin.), professor, Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, st. Starykh Bolshevikov, 54 a, Voronezh, 394064, Russia, shevalol@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0003-2599-5692

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

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 11/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025

Received 11/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-50-55 Оригинальная статья/Research article
УДК 537.61:637.1 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Использование магнитной обработки молочного сырья при производстве сычужных сыров

Дмитрий М. Фиалков [1] dm.fialkov@omgau.org 0000-0002-4834-6161
Владимир В. Пойманов [2] v-poymanov@yandex.ru 0000-0001-7274-3557
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, 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, ул. Карла Маркса, 67А, г. Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. В России наблюдается нехватка высококачественного сырья на сыродельных предприятиях молочной промышленности. Магнитная обработка молочного сырья является одной из и экономически доступных способов улучшения сыропригодности молока, хорошо вписывающихся в общепринятые технологии производства сыра Целью работы было исследование влияния магнитной обработки нормализованной молочной смеси на эффективность производства из неё сычужных сыров. Объектами исследования являлись нормализованная молочная смесь, сычужные сгустки, сыворотка и готовый сыр «Голландский лилипут» выработанный по ТУ 9225-001-000435139-2005, из молока прошедшего обработку магнитным полем (опыт) и молока без обработки (контроль). При проведении работы использовались стандартные методы исследований, предусмотренные нормативными документами Количество водорастворимого азота в сыре определяли методом Кьельдаля – Ганнинга. Время сычужного свертывания контролировали оригинальным капиллярным методом. Окончание созревания сыра фиксировали при повышении в нем количества водорастворимого азота на 23-24 % от начального содержания белкового азота. Результатом исследования является экспериментальное обоснование оптимальной напряженности магнитного поля при обработке молочной смеси. Электромагнитная обработка молочной смеси перед внесением фермента позволила снизить на 19-20% время сычужного свертывания и получить более плотные сгустки с лучшим выделением сыворотки. Подсырная сыворотка содержала меньше жира и белка. Магнитная обработка сырья ускорила на 20% сократила время созревания сыра и повысила его органолептическую оценку. По результатам исследования можно сделать вывод о целесообразности применения магнитной обработки молочного сырья в сыроделии.

Ключевые слова: молочное сырье, сычужное свертывание, состав сыворотки, созревание сыра, органолептические показатели.

The using magnetic treatment of raw materials in cheese production

Dmitriy M. Fialkov [1] dm.fialkov@omgau.org 0000-0002-4834-6161
Vladimir V. Poymanov [2] v-poymanov@yandex.ru 0000-0001-7274-3557
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. Stolypin, Institut Sq., 1, Omsk, 644008, Russia
2 Russia 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. There is a shortage of high-quality raw materials at cheese-making plants in the Russian dairy industry. Magnetic treatment of raw milk is one of the most cost-effective ways to improve the suitability of milk for cheese production. Magnetic treatment fits well with conventional cheese production technologies. The aim of the work was to study the influence of magnetic treatment of normalized milk mixture on the efficiency of production of rennet cheeses from it. The objects of the study were normalized milk mixture, rennet curds, whey and finished cheese "Dutch Lilliputian" made from milk treated with a magnetic field (experiment) and milk without treatment (control). Standard research methods prescribed by regulatory documents were used during the study. The amount of water-soluble nitrogen in the cheese was determined using the Kjeldahl-Gunning method. The rennet coagulation time was monitored using a unique capillary method. The end of cheese ripening was determined when the amount of water-soluble nitrogen in it increased by 23-24% of the initial protein nitrogen content. The result of the study is an experimental justification of the optimal magnetic field strength during the processing of milk formula. Electromagnetic treatment of the milk mixture before enzyme addition reduced rennet coagulation time by 19-20%, resulting in denser curds with improved whey extraction. The resulting whey contained less fat and protein. Magnetic treatment of raw materials accelerated cheese ripening by 20% and improved its organoleptic quality. The results of the experiment suggest the feasibility of using magnetic treatment of dairy raw materials in cheesemaking.

Keywords: milk raw materials, rennet coagulation, whey composition, cheese ripening, organoleptic properties.

Для цитирования
Фиалков Д.М., Пойманов В.В., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Использование магнитной обработки молочного сырья при производстве сычужных сыров // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 50–55. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-50-55

For citation
Fialkov D.M., Poymanov V.V., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. The using magnetic treatment of raw materials in cheese production. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 50–55. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-50-55

© 2025, Фиалков Д.М. и др. / Fialkov D.M. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Современный этап развития сельскохозяйственного производства, и экономики России сопровождается нехваткой высококачественного сырья на предприятиях молочной промышленности. Это особенно актуально для предприятий осуществляющих производство сыра и предъявляющих высокие требования к составу молока, его технологическим и экологическим показателям. [1–3] Из-за отсутствия надлежащего контроля качества кормов и условий получения молока, сырье, поступающее на переработку требует более жесткой тепловой обработки, что снижает сычужную свертываемость и, следовательно, сыропригодность молока. [4–5] Вышеизложенное ставит на повестку дня изыскание простых и экономически доступных способов улучшения сыропригодности молока, хорошо вписывающихся в общепринятые технологии производства сычужных сыров.

Молоко содержит в ионной (заряженной) форме соли, заряженные мицеллы белка и жировые шарики, оболочки которых также имеют заряд. Все это окружено диполями воды. Очевидно, что все составные части молока в той или иной степени чувствительны к электромагнитным воздействиям. Известно, что электромагнитное поле способно индуцировать в суспензированых частицах молока дипольные заряды, что приводит к взаимному притяжению частиц. Причем для частиц каждою вида существует свой оптимальный диапазон частот, в приделах которою эффект возникает при минимальной напряженности поля. Значительную роль в воздействии магнитного поля играет вода. Предполагается, что под действием магнитного поля в молекулах воды происходят орто-пара-переходы. Необходимая для этого энергия очень мала (в сотни раз меньше энергии водородной связи). Возникновение в водных растворах зон с параллельной ориентацией спинов может приводить к выталкиванию из таких областей растворенных веществ. [6]. Применительно к молоку, это приведет к изменению солевого равновесия

Принято считать, что белковые молекулы в водном растворе способствуют организации молекул воды в стабильные структуры, вокруг неполярных групп белковых молекул образуются так называемые гидротактоиды. Вместе с тем, имеются экспериментальные указания на то, что вода участвует в образовании специфической структуры характерной для макромолекул, то есть, играет существенную роль в стабилизации структуры белков [7]. По этому, воздействие на диполи и микрокристаллы воды должно отражаться на состоянии гидратных оболочек и свойствах белка. Обработка молока магнитным полем уже была успешно использована для улучшения качества и интенсификации процесса производства кисломолочных продуктов и творога [8–10].

Вышеизложенное позволяет предполагать, что поставленная задача может быть успешно решена путем магнитной обработки нормализованной молочной смеси перед внесением сычужного фермента.

Цель работы: исследование влияния магнитной обработки нормализованной молочной смеси на эффективность производства из неё сычужных сыров

Материалы и методы

Исследования выполнялись на кафедре «Продуктов питания и пищевой биотехнологии» ФБГОУ ВПО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина» и на ООО «Маслосыркомбинат Тюкалинский»

Объектами исследования являлись нормализованная молочная смесь, сычужные сгустки, сыворотка и готовый сыр «Голландский лилипут» выработанный по ТУ 9225–001–000435139–2005, из молока прошедшего обработку магнитным полем (опыт) и молока без обработки (контроль). При проведении работы использовались стандартные методы исследований, предусмотренные нормативными документами. Количество водорастворимого азота в сыре определяли методом Кьельдаля – Ганнинга.

Для повышения точности и объективности результатов время сычужного свертывания контролировали оригинальным капиллярным методом, сущность которого в следующем: после внесения фермента в молочную смесь погружали капилляр и подавали через него воздух. Количество подаваемого в капилляр воздуха устанавливали из расчета выхода из капилляра 10–15 воздушных пузырьков в минуту. Давление в капилляре в момент выхода пузырька контролировалось соединенным с ним микроманометром. Об окончании процесса коагуляции и начале синерезиса судили по резкому, в 2–2,5 раза, повышению давления в капилляре.

Сыр считали достигшим необходимого уровня зрелости при повышении в нем количества водорастворимого азота на 23–24 % от начального содержания белкового азота.

В ходе эксперимента технологические режимы получения опытных и контрольных сыров (температура, количество сычужного фермента и др.) были идентичны за исключением магнитной обработки опытной нормализованной смеси на экспериментальной установке. Опытную смесь пропускали через постоянное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям. Скорость движения обрабатываемого продукта лежала в пределах 1,0–1,5 м/с, напряженность магнитного

поля варьировали от 50 до 350 кА/м. В ходе работы контролировали продолжительность сычужного свертывания, физико-химические показатели сгустка, подсырной сыворотки и готового сыра, динамику созревания.

Результаты и обсуждение

Результаты математической обработки экспериментальных данных степени влияния магнитной обработки на время сычужного свертывания представлены на рисунке 1. За начало отсчета (ноль на графике) принято время получения сгустка из контрольной смеси. Анализ полученных данных показал, что рост напряженности магнитного поля от 50 до 300 кА/м приводит к достоверному сокращению продолжительности сычужного свертывания. Более интенсивное протекание сычужной коагуляции сопровождалась увеличением плотности сгустка и снижением отхода в сыворотку сырной пыли.

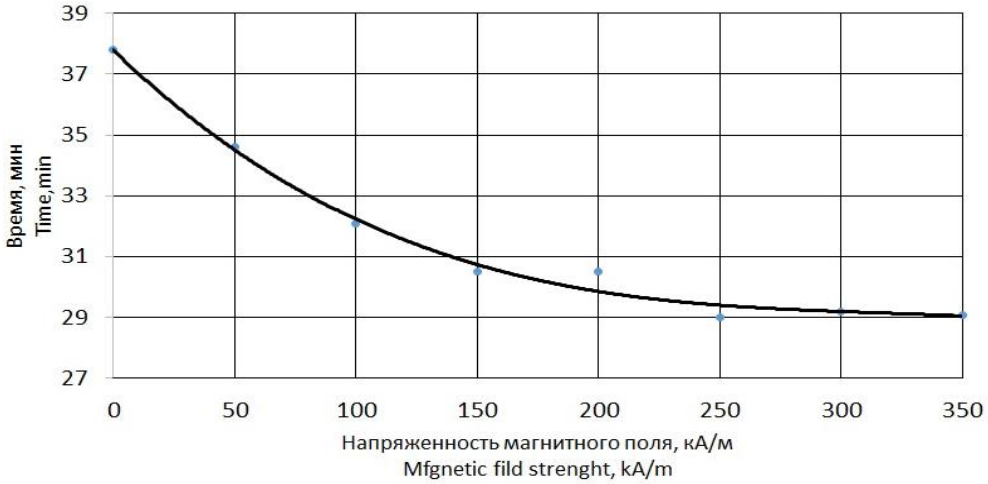


Рисунок 1. Зависимость времени сычужного свертывания от напряженности магнитного поля

Figure 1. Dependence of rennet coagulation time on magnetic field strength

Наилучший результат наблюдается при обработке молочной смеси магнитным полем напряженностью 250–300 кА/м, при данном режиме время сычужной коагуляции сократилось на 19–20 %. Полученные сгустки имели плотную консистенцию, интенсивнее выделяли сыворотку. Дальнейший рост напряженности магнитного поля существенного результата не давал. Белковые молекулы диамагнитны, поэтому воздействие магнитных полей на их поляризованные боковые цени способно вызвать разрыв водородных связей, изменение зоны гидратации и др. Все это способствует денатурации и коагуляции белка [10].

Сыворотка выделившаяся при получении сырного зерна из смеси прошедшей магнитную обработку содержала меньше белка и жира (рисунок 2). Очевидно, что более прочная белковая сетка сгустка на этапе синерезиса более эффективно удерживает белок и жировые шарики. Не исключен дополнительный переход в сгусток сывороточных белков, но это предположение требует дополнительных исследований

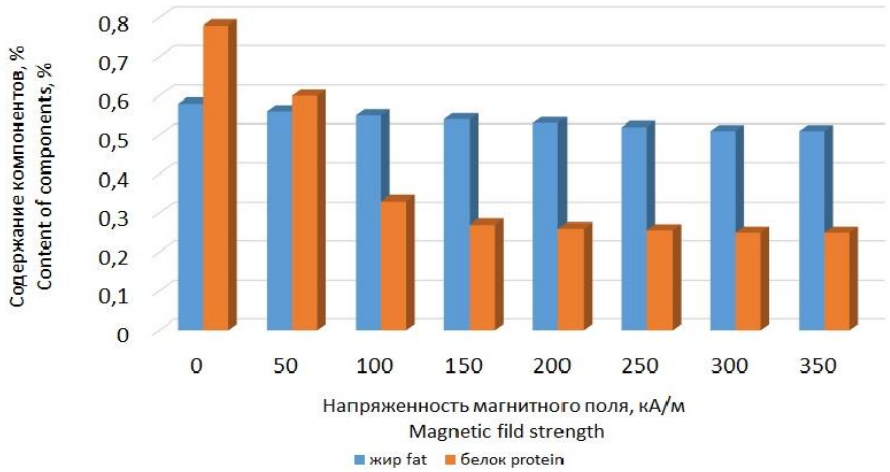


Рисунок 2. Зависимость состава сыворотки от напряженности магнитного поля

Figure 2. Dependence of serum composition on magnetic field strength

Исследования показали, что после электромагнитной обработки молочной смеси процесс созревания полученного из нее сыра протекал интенсивнее. Обработка молочной смеси при оптимальном режиме 250–300 кА/м сократила срок созревания сыра в среднем на 20 % (рисунок 3). Это, в частности, может быть результатом изменения свойств содержащейся в сыре влаги как среды развития заквасочной микрофлоры.

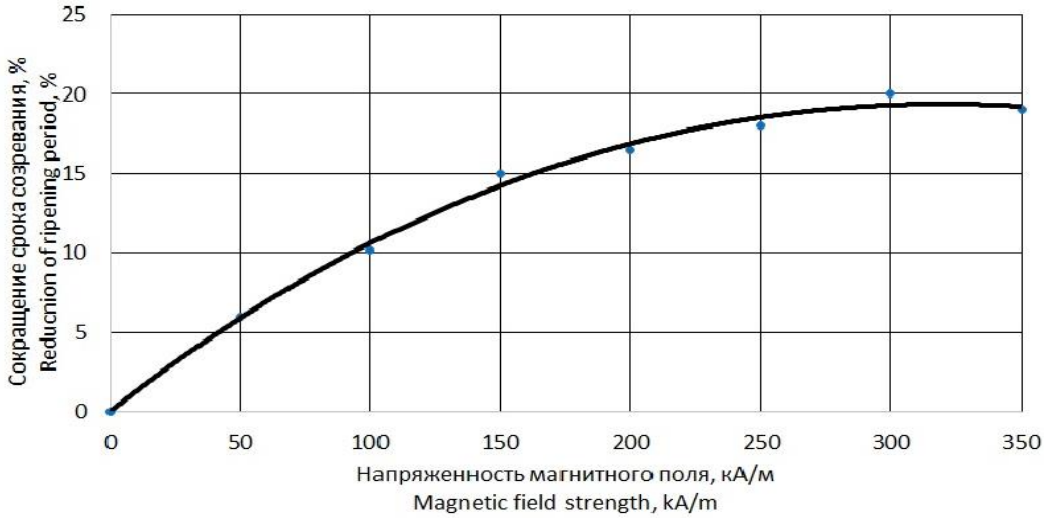


Рисунок 3. Зависимость сокращения срока созревания сыра от напряженности магнитного поля
Figure 3. Dependence of the reduction in the ripening period of cheese on the magnetic field strength

Большая подвижность молекул воды, возможно, облегчает транспорт питательных веществ в микробную клетку и удаление из нее продуктов жизнедеятельности. В том числе это ведет к повышению активности ферментных систем микроорганизмов, что в свою очередь интенсифицирует процесс ферментации.

В опытных сырах в сравнении с контролем отмечалось более интенсивное накопление продуктов распада белка, сыры получили более высокую органолептическую оценку

В таблице 1 приведены показатели качества контрольного сыра и сыра из молока прошедшего магнитную обработку при оптимальной напряженности 250 кА/м.

Таблица 1.

Показатели контрольных и опытных сыров

Table 1.

Indicators of control and experimental cheeses

Показатели качества сыра Cheese quality indicators	Сыр | Cheese	
	Контрольный | Control	Опытный | Experimental
pH	5,16	5,22
Органолептическая оценка, баллы Organoleptic assessment, points в том числе: | including:	83	94
вкус и запах | taste and smell	38	44
консистенция |consistency	22	24
рисунок |pattern	8	10
цвет теста |dough color	5	5
внешний вид| appearance	10	10

Как следует из приведенных данных сыр, полученный из смеси прошедшей обработку магнитным полем получил более высокую оценку за вкус, рисунок и консистенцию, показатели качества, оцениваемые потребителем, прежде всего. Опытные сыры более привлекательны для потребителя и могут быть реализованы за более высокую цену.

Заключение

Изучены закономерности влияния магнитной обработки на эффективность производства сычужных сыров. Установлено, что наиболее оптимальной является обработка полем напряженностью 250–300 кА/м Обоснована целесообразность магнитной обработки нормализованной молочной смеси.

Электромагнитная обработка молочной смеси способствует повышению экономических показателей производства в результате сокращения продолжительности сычужного свертывания молока и созревания сыра, снижения отхода в сыворотку жира и белка, повышения качества готового продукта.

Литература

1 Витушкина М.А., Дулепова М.А. Сыропригодность молока при производстве сыров // Вестник науки. 2020. Т. 5. № 8 (29). С. 59–63.

2 Лейберова Н.В. Основа качества натурального сыра – сыропригодность молока // Качество в производственных и социально-экономических системах АПК: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Курск, 28 ноября 2023 г. Курск: Университетская книга, 2023. С. 161–164.

3 Меньшикова З.Н., Пчела Н.Б., Бойкова О.А. Ветеринарно-санитарная оценка сыропригодности сырого коровьего молока и определение качества твердых сыров частного производства // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2020. № 2. С. 22–27. doi: 10.26155/vet.zoo.bio.201902004

4 Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Божкова С.Е. и др. Анализ сыропригодности молочного сырья и качества обогащённых сырных продуктов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 3 (59). С. 258–267. doi: 10.32786/2071-9485-2020-03-27

5 Буламбаева О.В., Неверова О.П. Влияние рационов кормления коров на сыропригодность молока // Современная аграрная наука: проблемы и пути решения: сб. тез. круглого стола в формате online, Екатеринбург, 12 ноября 2020 г. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2020. С. 300–303.

6 Лобанова А.А. Факторы, влияющие на сыропригодность молока // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: сб. мат. Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. молодых ученых, Пенза, 20–21 октября 2021 г. Т. I. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. С. 266–268.

7 Saleh S., Wibisono Y., Subagja H. Effect of extremely low frequency (ELF) magnetic field on processing and quality of local fresh milk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1001. 012034. doi: 10.1088/1755-1315/1001/1/012034

8 Jia W., Zhang M., Xu M. et al. Novel strategy to remove the odor in goat milk: Dynamic discovey magnetic field treatment // Food Chemistry. 2022. Vol. 375. 131889. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131889

9 Фиалков Д.М. Перспективы электромагнитной обработки сырья при производстве молочной продукции // Мировые научные исследования и разработки в эпоху цифровизации: сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 25 ноября 2021 г. Ч. 2. Ростов-на-Дону: Южный университет (ИУБиП), 2021. С. 187–190.

10 Дзахмишева И.Ш. Исследование влияния магнитной обработки молока на качество кефира // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 4. С. 58–61. doi: 10.20914/2310-1202-2019-4-58-61

11 Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Артемов Е.С. и др. Качество молока красно-пестрой породы и перспективы его использования в производстве мягких сыров комбинированного состава // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 4. С. 117–125. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-117-125

12 Канина К.А., Красуля О.Н., Жижин Н.А. и др. Изучение влияния воздействия высокочастотной акустической кавитации на качество молока-сырья и молочных продуктов на его основе // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 3. С. 145–150. doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-145-150

13 Yatskov M., Korchyk N., Besediuk V. Design of systems for integrated processing of dairy raw materials in the cheese industry // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 3. № 11 (113). P. 111–119. doi: 10.15587/1729-4061.2021.234818

14 Falih M.A., Al-Saadi A.H.M., Al-Mohammadi A.-R. et al. Enhancing safety and quality in the global cheese industry: A review of innovative preservation techniques // Heliyon. 2024. Vol. 10. № 23. e40459. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40459

15 Ladyka V., Pavlenko Y., Skliar O. et al. Determining the influence of raw milk protein composition on the yield of cheese and its nutrient content // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 126. № 11 (126). P. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2023.292445

16 Bilyi V., Kukhtyn M., Horiuk V. et al. Amino acid composition of whey and cottage cheese under various rennet enzymes // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. 2021. Vol. 15. P. 1021–1031. doi: 10.5219/1693

17 Czyżak-Runowska G., Wojtowski J., Danków R. et al. Properties of rennet cheese made from whole and skimmed summer and winter milk on a traditional polish dairy farm // Animals. 2020. Vol. 10. № 10. 1794. doi: 10.3390/ani10101794

18 Franceschi P., Sandri S., Marusi M. et al. Chemical composition, hygiene characteristics, and coagulation aptitude of milk for Parmigiano Reggiano cheese from herds yielding different milk levels // Revista Brasileira de Zootecnia. 2020. Vol. 49. e20180113. doi: 10.37496/rbz4920180113

19 García-Gómez B., Vázquez-Oderiz L., Muñoz-Ferreiro N. et al. Rennet type and microbial transglutaminase in cheese: effect on sensory properties // European Food Research and Technology. 2020. Vol. 246. № 3. P. 513–526. doi: 10.1007/s00217-019-03418-6

20 Li L., Bai Y., Yang X. et al. Effects of papain concentration, coagulation temperature, and coagulation time on the properties of model soft cheese during ripening // LWT - Food Science and Technology. 2022. Vol. 161. 113404. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113404

References

1 Vitushkina M.A., Dulepova M.A. Suitability of milk for cheese production. Science Bulletin. 2020. vol. 5. no. 8(29). pp. 59–63. (in Russian)

2 Leyberova N.V. The basis of the quality of natural cheese is the suitability of milk for cheese production. In: Quality in production and socio-economic systems of the agro-industrial complex: collection of scientific articles of the International scientific and technical conference, Kursk, November 28, 2023. Kursk: ZAO "University Book", 2023. pp. 161–164. (in Russian)

3 Menshikova Z.N., Pchela N.B., Boykova O.A. Veterinary and sanitary assessment of the suitability of raw cow's milk for cheese production and determination of the quality of privately produced hard cheeses. Veterinary science, animal science and biotechnology. 2020. no. 2. pp. 22–27. doi:10.26155/vet.zoo.bio.201902004 (in Russian)

4 Gorlov I.F., Slozhenkina M.I., Bozhkova S.E. et al. Analysis of the suitability of dairy raw materials for cheese production and the quality of fortified cheese products. News of the Nizhnevolzhsky Agrarian University Complex: Science and Higher Professional Education. 2020. no. 3(59). pp. 258–267. doi:10.32786/2071-9485-2020-03-27 (in Russian)

5 Bulambaeva O.V., Neverova O.P. Influence of cow feeding rations on milk suitability for cheese production. In: Modern agrarian science: problems and solutions: Collection of abstracts of the round table in online format, Yekaterinburg, November 12, 2020. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University, 2020. pp. 300–303. (in Russian)

6 Lobanova A.A. Factors influencing the suitability of milk for cheese production. In: Contribution of young scientists to the innovative development of the Russian agro-industrial complex: Collection of materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference of young scientists, Penza, October 20–21, 2021. Volume I. Penza: Penza State Agrarian University, 2021. pp. 266–268. (in Russian)

7 Saleh S., Wibisono Y., Subagja H. Effect of extremely low frequency (ELF) magnetic field on processing and quality of local fresh milk. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 1001. p. 012001. doi:10.1088/1755-1315/1001/1/012001

8 Jia W., Zhang M., Xu M., Shi L. Novel strategy to remove the odor in goat milk: Dynamic discovey magnetic field treatment. Food Chemistry. 2022. vol. 375. p. 131889. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131889

9 Fialkov D.M. Prospects for electromagnetic processing of raw materials in the production of dairy products. In: World scientific research and development in the era of digitalization: collection of articles of the XV International scientific and practical conference, Rostov-on-Don, November 25, 2021. Part 2. Rostov-on-Don: Southern University (IUBiP), 2021. pp. 187–190. (in Russian)

10 Dzhakhmisheva I.Sh. Investigation of the effect of magnetic treatment of milk on the quality of kefir. Bulletin of VSUET. 2019. vol. 81. no. 4. pp. 58–61. doi:10.20914/2310-1202-2019-4-58-61 (in Russian)

11 Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Artemov E.S. et al. Quality of red-motley breed milk and prospects for its use in the production of soft cheeses of combined composition. Bulletin of VSUET. 2021. vol. 83. no. 4. pp. 117–125. doi:10.20914/2310-1202-2021-4-117-125 (in Russian)

12 Kanina K.A., Krasulya O.N., Zhizhin N.A. et al. Study of the effect of high-frequency acoustic cavitation on the quality of raw milk and dairy products based on it. Bulletin of VSUET. 2019. vol. 81. no. 3. pp. 145–150. doi:10.20914/2310-1202-2019-3-145-150 (in Russian)

13 Yatskov M., Korchyk N., Besediuk V. Design of systems for integrated processing of dairy raw materials in the cheese industry. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. vol. 3. no. 11(113). pp. 111–119. doi: 10.15587/1729-4061.2021.234818

14 Falih M.A., Al-Saadi A.H.M., Al-Mohammadi A.-R. et al. Enhancing safety and quality in the global cheese industry: A review of innovative preservation techniques. Heliyon. 2024. vol. 10. no. 23. p. e40459. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40459

15 Ladyka V., Pavlenko Y., Skliar O. et al. Determining the influence of raw milk protein composition on the yield of cheese and its nutrient content. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. vol. 126. no. 11(126). pp. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2023.292445

16 Bilyi V., Kukhtyn M., Horiuk V. et al. Amino acid composition of whey and cottage cheese under various rennet enzymes. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. 2021. vol. 15. pp. 1021–1031. doi:10.5219/1693

17 Czyżak-Runowska G., Wojtowski J., Danków R. et al. Properties of rennet cheese made from whole and skimmed summer and winter milk on a traditional polish dairy farm. Animals. 2020. vol. 10. no. 10. p. 1794. doi:10.3390/ani10101794

18 Franceschi P., Sandri S., Marusi M. et al. Chemical composition, hygiene characteristics, and coagulation aptitude of milk for Parmigiano Reggiano cheese from herds yielding different milk levels. Revista Brasileira de Zootecnia. 2020. vol. 49. p. e20180113. doi: 10.37496/rbz4920180113

19 García-Gómez B., Vázquez-Oderiz L., Muñoz-Ferreiro N. et al. Rennet type and microbial transglutaminase in cheese: effect on sensory properties. European Food Research and Technology. 2020. vol. 246. no. 3. pp. 513–526. doi: 10.1007/s00217-019-03418-6

20 Li L., Bai Y., Yang X. et al. Effects of papain concentration, coagulation temperature, and coagulation time on the properties of model soft cheese during ripening. LWT - Food Science and Technology. 2022. vol. 161. p. 113404. doi: 10.1016/j.lwt.2022.113404

Сведения об авторах

Дмитрий М. Фиалков к.т.н, доцент, кафедра продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия, dm.fialkov@omgau.org
https://orcid.org/0000-0002-4834-6161

Владимир В. Пойманов к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, v-poymanov@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7274-3557

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, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнес-процессами, 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

Dmitriy M. Fialkov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, food and food biotechnology department, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya sq., 1, Omsk, 644008, Russia , dm.fialkov@omgau.org
https://orcid.org/0000-0002-4834-6161

Vladimir V. Poymanov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, food production machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, v-poymanov@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7274-3557

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, 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 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025
Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-56-65 Оригинальная статья/Research article
УДК 640 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Изменение химического состава высокобелковых бобовых культур при проращивании и технологические возможности их применения в функциональных пищевых системах

Людмила В. Антипова [1] antipova.l54@ya.ru 0000-0002-1416-0297
Оксана Т. Ибрагимова [2] ibragimova.oksana95@ya.ru 0009-0003-9256-5542
Виктор Е. Плотников [1] viktor_plotnikov_1999@mail.ru 0000-0001-6707-8337
Инесса В. Плотникова [1] plotnikova_2506@mail.ru 0000-0001-5959-6652

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, ул. Ватутина, 44–46, г. Владикавказ, 362025, Республика Северная Осетия–Алания

Аннотация. Среди источников растительного белка чечевица имеет ряд существенных преимуществ, прежде всего связанных с ботаническими свойствами, пищевой и биологической ценностью зерен, которые превосходят аналогичные показатели по сравнению с соей. Биомодификация химического состава в процессе проращивания позволяет нивелировать имеющиеся недостатки в органолептических свойствах, повысить биологическую ценность и довести до минимума содержание антиалиментарных веществ. В пророщенном зерне значительно увеличивается содержание витаминов, наиболее дефицитных аминокислот, снижается уровень содержания олигосахаридов. Настоящее исследование детально анализирует процесс биомодификации чечевицы в ходе проращивания. Установлено, что оптимальным для технологической обработки является 3-4-суточный период проращивания, при котором достигается максимальная биологическая активность зерна при улучшении его органолептических и без потери структурных свойств. Экспериментально подтверждено, что в результате проращивания происходит значительная трансформация химического состава семян: содержание белка увеличивается с 26,15 до 29,56 г/100 г, а общий пул незаменимых аминокислот возрастает на 40,5 %, при этом особенно заметно повышение концентрации незаменимых аминокислот – на 60,7 %, таких как валин, изолейцин и метионин. Параллельно снижается уровень олигосахаридов (с 5% до 3,4%), вызывающих кишечный метеоризм, что значительно улучшает переносимость продукта. Дополнительным преимуществом является возможность дальнейшего обогащения сырья микроэлементами, в частности, йодом, на стадии проращивания. На основе биомодифицированного сырья обоснованы и запатентованы режимы и параметры получения безлактозных молочных продуктов растительного происхождения: молока, сыра и замороженного десерта. Проведенная сравнительная оценка аминокислотного скора и биологической ценности (БЦ) демонстрирует превосходство разработанных продуктов из чечевицы над соевыми аналогами. Установлено, биологическая ценность чечевичного сыра составила 69,9%, значительно превысив показатель традиционного тофу (34,6%), что свидетельствует о лучшей сбалансированности аминокислотного состава и более высоком потенциале биосинтеза собственного белка в организме. Готовые продукты, характеризующиеся сбалансированным составом, низким содержанием аллергенов и отсутствием лактозы, рекомендуются для широкого круга потребителей, включая пожилых людей, детей, нуждающихся в диетотерапии, а также лиц с непереносимостью лактозы и приверженцев здорового образа жизни. Разработанные технологии открывают перспективы для создания новых ассортиментных линеек функциональных продуктов питания отечественного производства.

Ключевые слова: растения, белок, биомодификация, чечевица, зерно, проращивание, молочные продукты, здоровое питание.

Changes in the chemical composition of high-protein legumes during germination and technological possibilities of their application in functional food systems

Ludmila V. Antipova [1] antipova.l54@ya.ru 0000-0002-1416-0297
Oksana T. Ibragimova [2] ibragimova.oksana95@ya.ru 0009-0003-9256-5542
Viktor E. Plotnikov [1] viktor_plotnikov_1999@mail.ru 0000-0001-6707-8337
Inessa V. Plotnikova [1] plotnikova_2506@mail.ru 0000-0001-5959-6652

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
2 North Ossetian State University, Vatutina, 44-46, Vladikavkaz, 362025, Republic of North Ossetia-Alania

Для цитирования
Антипова Л.В., Ибрагимова О.Т., Плотников В.Е., Плотникова И.В. Изменение химического состава высокобелковых бобовых культур при проращивании и технологические возможности их применения в функциональных пищевых системах // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 56–65. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-56-65

For citation
Antipova L.V., Ibragimova O.T., Plotnikov V.E., Plotnikova I.V. Changes in the chemical composition of high-protein legumes during germination and technological possibilities of their application in functional food systems. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 56–65. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-56-65

© 2025, Антипова Л.В. и др. / Antipova L.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. Among plant protein sources, lentils offer a number of significant advantages, primarily related to the botanical properties and nutritional and biological value of the grains, which surpass those of soybeans. Biomodification of the chemical composition during the sprouting process helps mitigate existing deficiencies in organoleptic properties, increase biological value, and minimize the content of anti-nutritional substances. Sprouted grains significantly increase the content of vitamins and essential amino acids, while reducing oligosaccharide levels. This study analyzes in detail the biomodification of lentils during sprouting. It has been established that a 3-4-day sprouting period is optimal for technological processing, achieving maximum biological activity without losing the grain's structural and improvement of organoleptic properties. Experiments have confirmed that sprouting significantly transforms the chemical composition: protein content increases from 26.15 to 29.56 g/100 g, while the total amino acid pool increases from 26.15 to 29.56 g/100 g, and the total pool of essential amino acids increases by 40.5%, with a particularly noticeable increase in the concentration of essential amino acids – by 60.7%, such as valine, isoleucine and methionine. At the same time, the level of oligosaccharides responsible for flatulence decreases (from 5% to 3.4%), significantly improving product tolerability. An additional advantage is the ability to further enrich the raw material with microelements, particularly iodine, during the sprouting stage. Using biomodified raw materials, processes and parameters for producing lactose-free dairy products of plant origin, including milk, cheese, and frozen dessert, have been substantiated and patented. A comparative assessment of the amino acid rate and biological value (BC) demonstrates the superiority of the developed lentil products over their soy analogues. Installed, the biological value of lentil cheese was 69.9%, significantly exceeding that of traditional tofu (34.6%), indicating a better-balanced amino acid composition and a higher potential for the body's own protein biosynthesis. These finished products, characterized by a balanced composition, low allergen content, and lack of lactose, are recommended for a wide range of consumers, including the elderly, children requiring dietary therapy, individuals with lactose intolerance, and those committed to a healthy lifestyle. The developed technologies open up prospects for the creation of new product lines of domestically produced functional foods.

Keywords: plants, protein, biomodification, lentils, grains, germination, dairy products, healthy food.

Введение

Значение растений в жизнедеятельности и жизнеобеспечении человека трудно переоценить. Их разнообразие и функции очевидны и поразительны. Растения распространены на суше, в океанах и в пресной воде. Они существуют на нашей планете миллионы лет. Предполагается, что существует около 300000 видов, среди которых 85–90% – цветущие. Они привлекали внимание испокон веков из-за наличия в их составе функциональных биологически активных веществ, значение которых очевидно и используется человеком благодаря влиянию на организм и здоровье. В настоящее время идентифицированы и использованы такие функциональные вещества, содержащиеся в растениях, как: алкалоиды, гликозиды, полисахара, эфирные масла, органические кислоты, пектиновые вещества, антибиотики, кумарины хиноны, флавоноиды, соланины, дубильные вещества, минеральные соли, пигменты и т. п. Перечень биологически активных веществ постоянно пополняется и расширяется.



Рисунок 1. Значение растительных белков в производстве продуктов питания

Figure 1. Importance of plant proteins in food production

Относительно недавно возник и развивается интерес к растениям как к источникам белка. В настоящее время можно сформировать преимущества растительных белков в питании на основании обобщения имеющегося опыта [1–4].

Среди множества видов растений – источников белка заметное место занимают бобовые из-за высокой массовой доли белка в семени. На современном мировом рынке безусловным лидером является соя, индустриально освоенная в Америке и ряде других развитых стран. По данным разных авторов в семенах этой культуры может накапливаться от 30 до 50% белка. Белки сои неоднородны по структуре и функциям, в том числе оказывают и неблагоприятное влияние на организм человека (антиалиментарные вещества) [4–6]. Зерна и их технологические формы (мука, концентраты, изоляты) широко распространены в технологиях пищевых продуктов [7–10]. Особое внимание к белкам сои обусловлено доступностью сырья (с 1 га можно получить до 731 кг белка), уникальностью химического состава, высокой пищевой и биологической ценностью и технологической функциональностью, а также большим историческим опытом использования в питании.

Проблема обеспечения страны продуктами переработки сои имеет общегосударственную значимость, что в совокупности со значительным размерами и низкой насыщенностью российского рынка нетрадиционными источниками растительного белка создает предпосылки для развития отечественной индустрии по разработке и переработке перспективных источников с целью получения пищевых белковых добавок и препаратов. В настоящее время имеется информация о белках пшеницы, гороха, фасоли, нута, люцерны, люпина, амаранта, рапса и др. [11–16].

Среди отечественных источников растительного белка чечевица заслуживает особого внимания. Чечевица (лат. *Lens*) – род травянистых растений семейства Бобовые, включающий несколько видов из средиземноморья, Малой Азии, Закавказья и Средней Азии (всего 7 видов). В культуре – один вид: чечевица пищевая (*Lens culinaris*). Родина чечевицы – Южная Европа и Западная Азия, где ее возделывают с эпохи неолита. В России чечевица возделывается главным образом в черноземных областях, но преимущественно в юго-западном крае. Период ее развития 100–130 дней, она содержит большое количество легкоусвояемого организмом белка (86%). Ее урожайность составляет 12,2–27,6 ц с 1 га. Она богата незаменимыми аминокислотами, характерна минимумом содержания липидов [17, 18].

В настоящее время активизировались исследования по разработке белковых субстанций на основе чечевицы и их применению в различных отраслях пищевой индустрии. [17–21]. Интерес к чечевице как к отечественному источнику растительного белка, подкрепляется сравнительными данными, приведенными в таблице 1.

Из данных таблицы 2 видно, что чечевица выгодно отличается от сои меньшим количеством ингибиторов ферментов организма. В ней идентифицирован только ингибитор трипсина, в то время как в сое их 3.

В таблице 3 приведена сравнительная характеристика углеводного состава зерен обоих видов, откуда видно, что чечевица содержит незначительное количество олигосахаридов-антиалиментарного фактора, вызывающего кишечный метеоризм.

Таблица 1.

Общая сравнительная характеристика бобовых культур

Table 1.

General comparative characteristics of legumes

Показатель Index	Чечевица | Lentils	Соя | Soybeans
Высота растения Plant height	Растение высокое (40–75 см) Plant is tall (40–75 cm)	Растение от карликового (20–25 см) до высокого 9до 2 м) Plants range from dwarf (20–25 cm) to tall (9–2 m)
Форма и размеры листочков Leaf shape and size	Крупные, овальные, резко удлиненные (15–27 см) Large, oval, sharply elongated (15–27 cm)	Крупные, овальные, удлиненные Large, oval, elongated
Размеры и окраска цветков Flower size and color	Мелкие (7–8 мм), белые и реже голубые Small (7–8 mm), white and, rarely, blue	Мелкие (7–10 мм), белые или фиолетовые, собранные в соцветия Small (7–10 mm), white or purple, collected in inflorescences
Форма и размеры бобов Bean shape and size	Средней величины (15–20 мм), обычно плоские Medium-sized (15–20 mm), usually flat	От узких до широких (0,5–1,4 см), от коротких до длинных (2,6 см) From narrow to wide (0.5–1.4 cm), from short to long (2.6 cm)
Форма и размеры семян Seed shape and size	Округлые, сплюснутые, с острыми ребрами, диаметром 5–9 мм Rounded, flattened, with sharp ribs, 5–9 mm in diameter	Овально-удлиненные, реже шаровидные, длиной 5–13 см, шириной 4,0–8,5 см Oval-elongated, rarely spherical, 5–13 cm long, 4.0–8.5 cm wide
Окраска семядолей Cotyledon color	Желтые, редко оранжевые Yellow, rarely orange	Желтые, реже зеленые, коричневые и черные Yellow, rarely green, brown, and black
Масса 1000 семян, г 1000-seed weight, g	12–18	120–230
Район возделывания в России Cultivation area in Russia	Центральный, Центрально-Черноземный, Волго-Вятский районы, Поволжье и менее Западная Сибирь	В основном Дальний Восток и менее в Краснодарском и Ставропольском краях
Длительность произрастания, дней Growth period, days	90–180	75–200
Урожайность, ц/га Yield, c/ha	12–28	5–16
Массовая доля компонентов в составе семян, % | Mass fraction of components in the composition of seeds, %		
Белок | Protein	32,00	40,00
Жир | Fat	1,17	21,30
Углеводы | Carbohydrates	53,70	26,00
Зола | Ash	3,30	5,80
Влага | Moisture	12,33	7,40
Минеральные элементы, мг/100 г | Mineral elements, mg/100		
Na	55,00	6,00
K	672,00	1607,00
Ca	83,00	248,00
Mg	80,00	226,00
Fe	11,80	15,00
P	390,00	603,00
Витамины, мг/100 г | Vitamins, mg/100 g		
B-каротин	0,03	0,07
B1	0,50	0,94
B2	0,21	0,22
PP	1,80	2,20
Энергетическая ценность, ккал/100г Energy value, kcal/100g	346,00	462,00

Таблица 2.

Ингибиторы ферментов сои и чечевицы

Table 2.

Soy and lentil enzyme inhibitors

Соя | Soybeans		Чечевица | Lentils	
Ингибиторы Inhibitors	Действие Action	Ингибиторы Inhibitors	Действие Action
Ингибиторы протеазы Protease inhibitors	Протеаза снижает усвоение белков, может вызвать гипертрофию поджелудочной железы Protease reduces protein absorption and can cause pancreatic hypertrophy.	Ингибитор трипсина Trypsin inhibitor	Трипсин синтезируется в поджелудочной железе, катализирует гидролиз белков и пептидов Trypsin is synthesized in the pancreas and catalyzes the hydrolysis of proteins and peptides.
Ингибитор уреазы Urease inhibitor	Уреаза, находясь в кормах для с/х животных, осуществляет гидролиз мочевины с образованием аммиака и углекислого газа, что отравляет организм животных Urease, found in livestock feed, hydrolyzes urea to form ammonia and carbon dioxide, which poisons the animals.		
Ингибитор липоксигеназы Lipoxygenase inhibitor	Липоксигеназа при хранении в кормах образует альдегиды и кетоны, которые придают корму специфический неприятный запах и вкус. Lipoxygenase, when stored in feed, forms aldehydes and ketones, which impart a specific unpleasant odor and taste.		

Таблица 3.

Сравнительная характеристика углеводного состава зерен бобовых

Table 3.

Comparative characterization of the carbohydrate composition of legume grains

Показатель | Index	Соя Soybeans	Чечевица Lentils
Всего углеводов, % от массы Total carbohydrates, % by weight	17%	20%
Моно- и дисахариды, % от общего количества углеводов Mono- and disaccharides, % of total carbohydrates	11,4%	5%
Сахароза, % от общего количества углеводов Sucrose, % of total carbohydrates	5,1%	3,1%
Крахмал, % от общего количества углеводов Starch, % of total carbohydrates	25,5%	75%
Клетчатка, % от общего количества углеводов Fiber, % of total carbohydrates	54%	16,3%
Олигосахариды, % от общего количества углеводов Oligosaccharides, % of total carbohydrates	4%	0,6%

Наличие специфического запаха, ингибиторов пищеварительных ферментов, олигосахаридов сдерживают широкое применение в составе ряда пищевых продуктов. Вместе с тем известно, что в процессе проращивания зерен значительно активируются ферментные системы, осуществляющие биомодификацию химического состава, нивелирующие нежелательные свойства исходных объектов.

Объекты и методы

Пророщенные зерна чечевицы использовали в качестве объекта исследования при получении безлактозных молочных продуктов (молоко, сыр, десерт) растительного происхождения.

В ходе экспериментальных исследований применили современные методы исследования, нормативные документы, действующие в отраслях пищевой индустрии, а именно в молочной промышленности [22–28].

В качестве объекта исследования использовали пророщенную чечевицу в течение 3–4 суток. Зерна чечевицы приобретали в супермаркетах г. Воронеж. На первом этапе экспериментальных исследований чечевицу замачивали в воде и выдерживали в течение 8 дней при температуре +4 °С, фиксировали длину ростков, органолептические и функционально-технологические свойства. Установлено, что после 1-х суток проращивания зерна набухают, ростки не обнаружены. Через 3 суток появлялись ростки длиной 2 мм, на 6 сутки их длина достигла 6 мм, на 8 сутки – 7–8 мм. На последних стадиях проращивания зерна утрачивали твердость, ухудшались исходные органолептические и физико-химические свойства, что мало приемлемо для технологии пищевых продуктов.

Сравнительный химический состав зерен чечевицы до проращивания и после представлен в таблицах 4 и 5.

Таблица 4.

Химический состав семян до и после проращивания чечевицы

Table 4.

Chemical composition of lentil seeds before and after lentil germination

Показатели Index	Суточная потребность Суточная потребность	Содержание, в 100г продукта Contents per 100g of product	
		До проращивания Before sprouting	После проращивания After sprouting
Белок, г | Protein, g	85	26,15	29,56
Жир, rvFat, g	102	1,2	1,1
Углеводы, г в том числе глюкоза Carbohydrates, g including glucose	69,5 | 24	53,7 | 8,45	1,06 | 13,64
Олигосахариды: | Oligosaccharides:		5	3,4
Крахмал | Starch	–	33,8	24,12
Клетчатка | Fiber	–	3,65	3,04
Зола | Ash	–	3,65	3,31
Влага | Moisture	–	12,33	18,1
Минеральные вещества, мг | Mineral components, mg			
Ca	83,07	84,23	84,62
P	210	401,16	400,3
Mg	43,2	78,9	76,3
Fe	8,26	12,06	12,32
Na	359	56,12	55,91
K	572,3	659,18	659,51
Витамины, мг | Vitamins, mg			
B1	0,2	0,5	0,78
B2	0,2	0,21	0,48
PP	19,42	1,8	2,21
C	11,7	–	0,04
b-каротин	0,28	0,03	0,08

Таблица 5.

Изменение аминокислотного состава до и после проращивания чечевицы

Table 5.

Changes in amino acid composition before and after lentil germination

Аминокислота, мг/100 г Amino acid, mg/100 g	Содержание в зернах | Content	
	До проращивания Before sprouting	После проращивания After sprouting
Незаменимые | Not replaceable	10561	16971
Val	802	1560
Isol	1049	1748
Lec	2437	3045
Tyr	923	989
Lys	2398	2787
Met	451	719
Tre	1274	1847
Tri	169	298
Phe	1061	1412
Заменимые и полузаменимые Replaceable and semi-replaceable	12747	15768
Cys	923	1087
Ala	412	523
Arg	1960	2213
Hys	664	946
Аспаргиновая кислота | Aspartic acid	2237	3486
Gly	1109	1759
Глутаминовая кислота | Glutamic acid	3630	3897
Pro	822	946
Ser	987	989
Сумма аминокислот | Sum	26150	29560
Лимитирующие аминокисоты | Limit	Метионин + триптофан	Метионин + триптофан

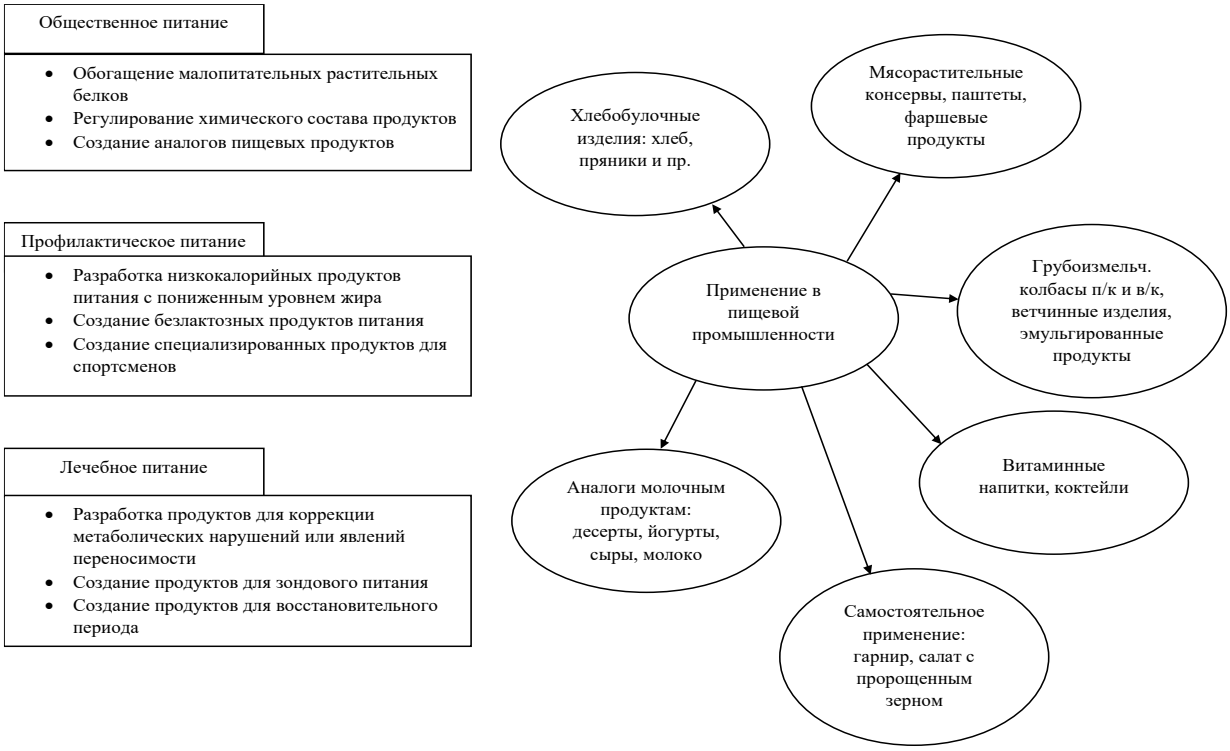


Рисунок 2. Возможные пути использования пророщенной чечевицы

Figure 2. Possible uses for sprouted lentils

Установлено, что в процессе проращивания при использовании питательных субстратов возможно усилить полезные свойства чечевицы. Например, при использовании растворов КТ возможно получение йодообогащенных белков. Технология йодирования чечевицы реализуется на стадиях:

Промывка и очистка зерен чечевицы от посторонних примесей в холодной воде, t = 4–5 °С

⇩

Замачивание зерен чечевицы в питательном растворе йода калия (концентрация соли 10г/л) при t 10–12 °С, Т = 10 ÷ 12 ч. соотношение зерна: раствор = 1 : 4

⇩

Удаление питательного раствора йодида калия, проращивание зерен в воде при t = 4–6 °С в течение 7–8 дней при периодическом орошении раствором йодида калия

⇩

Измельчение пророщенных зерен в воде, гидромодуль 1:2

⇩

Экстрагирование водой, t = 20÷22 °С, Т = 2,0–2,5 ч

⇩

Фильтрование смеси

⇩

Термообработка, t = 80 °С, Т = 2 мин

⇩

Охлаждение до t = 4–6 °С

⇩

Розлив растительного молока, хранение

Полученный продукт содержит 50–60% суточную норму йода и может использоваться для профилактики и лечения йодной недостаточности. Сравнительная оценка свойств молока растительного и коровьего представлена в таблице 6

Таблица 5.

Химический состав молока

Table 6.

Chemical composition of milk

Показатели Index	Молоко | Milk		
	чечевичное lentil	соевое soy	коровье cow
Белок, г | Protein, g	3,25	3,01	3,30
Жир, г | Fat, g	0,70	1,99	3,55
Угдеводы, г, в т.ч. Carbohydrates, g (including)	3,4	4,31	4,80
Лактоза, г | Lactose, g	–	–	4,6
Рафиноза, мг | Raffinose, mg	0,5	0,69	–
Стахиоза, мг | Stachyose, mg	2,1	3,62	–
Вербаскоза, мг | Verbascose, mg	0,8	–	–
Энергетическая ценность, кДж | Energy value, kJ	137,6	197,4	269,2

В последнее время в мире, в том числе и в России значительно возрос интерес к растительным сырам, где явные приоритеты принадлежат сырам типа «Тофу». На основе чечевичного молока авторами предложена и запатентована технология мягкого сыра:

Чечевичное молоко из пророщенных зерен

⇩

Внесение функциональных ингредиентов, перемешивание до однообразного состояния при гидромодуля 1:1,8

⇩

Приготовление раствора агар-агара (10г порошка в 200мл кипяченой воды)

⇩

Перемешивание до однородного состояния

⇩

Разлив в формы, созревание, t = 4–6 °С

⇩

Упаковка

В процессе реализации технологических этапов применяли орехи кешью, уксусную кислоту, комплексную пищевую добавку «Сырный порошок Чеддер», а также различные специи. Специфичность состава применяемых ингредиентов позволяет разнообразить органолептические свойства, а следовательно, создать ассортиментную линейку широкого потребительского спроса. Химический состав полученного продукта представлен в таблице 7.

Таблица 6.

Сравнительные показатели растительных сыров

Table 7.

Comparative performance of vegetable cheeses

Показатель Index	Растительные сыры Vegetable cheeses	
	чечевичный lentil	Продукт белковый рассол, тофу натуральный Protein product brine, natural tofu
Жир, % | Fat, %	9,5	11,2
Белок, % | Protein, %	6,0	18,0
Влага, % | Water, %	72,6	70,0
pH	5,60	6,85

Особенности рецептурного состава чечевичного молока и состава используемых ингредиентов обеспечивают достаточно низкий уровень содержания белка по сравнению с сыром «Тофу». Однако сбалансированность белков по аминокислотному составу (расчёт по акад. Линатову Н.Н.) в чечевичном сыре в сравнении с аналогом из сои говорит о преимуществах предлагаемого технологического решения (таблица 7). К тому же чечевичный сыр приближен по pH 5,6 к аналогам животного происхождения, тогда как «Тофу», имея pH 6,85, скорее воспринимается на вкус как что-то иное.

Таблица 7.

Аминокислотный состав и расчетные значения их аминокислотного скора

Table 8.

Amino acid composition and calculated values of amino acid score

Аминокислота Amino acid	Шкала ФАО/ВОЗ, г/100г белка FAO/WHO scale, g/100 g protein	Содержание незаменимых аминокислот, г/100г белка (Aj) Essential amino acid content, g/100 g protein (Aj)		Аминокислотный скор, % (Cj) Amino acid score, % (Cj)	
		Чечевичный сыр Lentil cheese	Продукт белковый РОССОЯ тофу натуральный ROSSOYA natural tofu protein product	Чечевичный сыр Lentil cheese	Продукт белковый РОССОЯ тофу натуральный ROSSOYA natural tofu protein product
Val	5,0	4,92	4,71	4,92/5 = 98	4,71/5 = 94
Isol	4,0	4,09	4,7	4,09/4 = 102	4,7/4 = 117
Ley	7,0	7,26	8,15	7,26/7 = 103	8,15/7 = 116
Lys	5,5	5,82	6,03	5,82/5,5 = 105	6,03/5,5 = 109
Met	3,5	3,08	1,25	3,08/3,5 = 88	1,25/3,5 = 35
Tre	4,0	3,54	3,83	0,6/1 = 0,6	3,83/4 = 95
Try	1,0	0,6	1,47	4,65/6 = 77	1,47/1 = 147
Phe	6,0	4,65	5,43	3,54/4 = 88	5,43/6 = 90
Различие аминокислотного скора j-той аминокислоты, % | Difference in the amino acid score of that amino acid, %					
	Чечевичный сыр | Lentil cheese			Продукт белковый РОССОЯ тофу натуральный ROSSOYA natural tofu protein product	
Isol	102 – 60 = 42			117 – 35 = 82	
Ley	103 – 60 = 43			116 – 35 = 81	
Lys	105 – 60 = 45			109 – 35 = 74	
Met	88 – 60 = 28			35 – 35 = 0	
Tre	88 – 60 = 28			95 – 35 = 60	
Try	60 – 60 = 0			147 – 35 = 112	
Phe	77 – 60 = 17			90 – 35 = 55	
Val	98 – 60 = 38			94 – 35 = 59	
КРАС, %	241 / 8 = 30,1			5223 / 8 = 65,4	
БЦ, %	100 – 30,1 = 69,9			100 – 65,4 = 34,6	

Биологическая ценность белков чечевичного сыра наиболее приближена к шкале ФАО/ВОЗ, она выше по сравнению с соевыми аналогами. Это доказывает, что новый предлагаемый отечественный продукт в наибольшей степени может обеспечить биосинтез полноценного собственного белка в организме. Десерты в современном отечественном рынке продовольствия занимают достаточно объемный сегмент. На основе чечевичного молока (в том числе йодированного), обоснована и запатентована технология производства замороженного десерта.

Сравнительный анализ десертов (чечевица и соя) показал, что чечевичный замороженный десерт обладает минимальными отклонениями по вкусу и запаху от натуральных аналогов по сравнению с соевыми продуктами, превалирующими на рынке. Анализ состава незаменимых аминокислот, расчет биологической ценности показывает очевидные преимущества отечественного продукта (таблица 8). Чечевичный замороженный продукт наиболее приближен к данным аминокислотного состава идеального белка, превышая аналогичные показатели соевого замороженного десерта на 15–16%.

Исследование микробиологических показателей и требований безопасности к пищевым продуктам позволяет сделать вывод о реальных перспективных новых ассортиментных линеек безлактозных продуктов питания отечественного производства.

Результаты и обсуждение

Учитывая корректировку химического состава и актуальность возможных и современных путей использования растительных белков в питании, сформированы перспективные направления для пророщенных зерен чечевицы (рисунок 2)

Среди продуктов здорового питания в последнее время большой популярностью пользуются безлактозные молочные продукты растительного происхождения. Исходя из данных потребительского спроса актуализированы молоко, сыры десерты.

Технология чечевичного молока реализована в опытно-промышленных условиях, характерна новизной технического решения и запатентована. В ходе экспериментальных исследований доказана возможность повышения биологической ценности и получения продукта функционального назначения путем дополнительного йодирования растительного молока на этапах технологии его получения (рисунок 3).

Заключение

Реализация разработанных технологических схем и анализ готовых изделий подтвердили преимущества отечественного источника белков растительного происхождения в создании безлактозных пищевых продуктов широкого потребительского спроса.

Литература

1 Бикбулатов П.С., Чугунова О.В., Заворохина Н.В. Анализ современного рынка растительных белков и технологических решений их получения // Вестник КрасГАУ. 2025. № 5. С. 244–260.

2 Свиридонова М.А. Дефицит йода, формирование и развитие организма // Клиническая и экспериментальная тиреондология. 2014. Т. 10. № 1.

3 Кучменко Т.А., Арустамов Я.Р., Умарханов Р.У. и др. Применение сенсорных технологий для функционального контроля дрожжей Kveik в производстве пива // Аналитика и контроль. 2025. Т. 29. № 1. С. 54–67.

4 Ловкис З.В., Моргунова Е.М., Шевченко В.И., Давыдова Е.А. Органолептический анализ качества пищевых продуктов, требования к испытаниям // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2018. Т. 11. № 1 (39). С. 13–19.

5 Мельникова Е.И., Станиславская Е.Б., Богданова Е.В. Химия и физика молока: лабораторный практикум: учебное пособие. Воронеж: Воронежский гос. ун-т инженерных технологий, 2012. 195 с.

6 Митяшин Г.Ю. Продовольственная безопасность: формы и институты обеспечения // Теоретическая экономика. 2023. № 3 (99). С. 104–116.

7 Терещук Л.В., Старовойтова К.В. Пищевая химия. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2020. 126 с. ISBN 978-5-8353-2587-0.

8 Васюкова А.Т., Кусова И.У., Кандроков Р.Х. Разработка функциональных смесей для мучных кулинарных изделий // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Т. 16. № 6. С. 455–475.

9 Sui X., Zhang T., Jiang L. Soy protein: Molecular structure revisited and recent advances in processing technologies // Annual Review of Food Science and Technology. 2021. V. 12. № 1. P. 119–147.

10 Ashaolu T.J. Applications of soy protein hydrolysates in the emerging functional foods: A review // International Journal of Food Science and Technology. 2020. V. 55. № 2. P. 421–428.

11 Основы производства продукции растениеводства / Гаспарян И.Н., Сычев В.Г., Мельников А.В., Горохов А.С. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2021. 496 с.

12 Марусенков М.П., Иванкевич Н.М. Русские бобы. Москва: Изд. Проспект, 2018. 24 с.

13 Шихалиева К. Потенциал генофонда нута и чечевицы в селекции Азербайджана. Германия (Saarbrucken): Изд. Lambert, 2018. 80 с.

14 Федосеева В.В. Роль зернобобовых культур как предшественников для зерновых // Научный журнал молодых ученых. 2020. № 4 (21). С. 48–50.

15 Храмова В.Н., Сурков Д.И., Лубчинский К.А. Обзор антинутриентов бобовых культур // Приветствие участникам конференции! 2022. С. 367.

16 Самофалова Л.А., Сафронова О.В. Методологические подходы к проращиванию семян сельскохозяйственных культур, тестирование успеха прорастания // Зернобобовые и крупяные культуры. 2017. № 3 (23).

17 Векленко В.И., Дадашев Б.А. Производство и переработка сои в России: прошлое, настоящее, будущее // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 1. С. 213–220.

18 Векленко В.И., Малахов А.В., Солошенко Р.В. Организация переработки сои // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 8. С. 184–187.

19 Костенко А.А., Ким И.Н. Разработка технологии соевого сыра с применением молок лососевых рыб и обоснование сроков его хранения // Пищевая промышленность. 2016. № 8. С. 53–57.

20 Антипова Л.В., Дарьин А.О. Разработка функционального продукта для профилактики йодонедостаточности // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3. С. 45–49.

21 Малеева Т.Л., Гончарова Ю.М. Ассортимент аптек: специализированная пищевая продукция для детского питания, диетического лечебного и диетического профилактического питания, питания беременных и кормящих женщин; минеральные воды // IX ежегодные чтения памяти доктора ФХ Граля. 2023. С. 54–59.

22 Олейник В.К., Ключко Н.Ю. Исследование по получению и применению сыра тофу в питании вегетарианцев // Известия КГТУ. 2025. № 77. С. 72–83.

23 Antipova L.V., Darin A.O. Investigation of the properties of lentil cheese as a new food source in Russia // Proceedings of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, July 21, 2021). Part 1.

References

1 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 KrasSAU. 2025. no. 5. pp. 244–260. (in Russian)

2 Sviridonova M.A. Iodine deficiency, formation and development of the organism. Clinical and experimental thyroidology. 2014. vol. 10. no. 1. (in Russian)

3 Kuchmenko T.A., Arustamov Ya.R., Umarkhanov R.U. et al. Application of sensor technologies for the functional control of Kveik yeast in beer production. Analytics and control. 2025. vol. 29. no. 1. pp. 54–67. (in Russian)

4 Lovkis Z.V., Morgunova E.M., Shevchenko V.I., Davydova E.A. Organoleptic Analysis of Food Product Quality, Testing Requirements. Food Industry: Science and Technology. 2018. vol. 11. no. 1(39). pp. 13–19. (in Russian)

5 Melnikova E.I., Stanislavskaya E.B., Bogdanova E.V. Chemistry and Physics of Milk: Laboratory Workshop: Tutorial. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2012. 195 p. (in Russian)

6 Mityashin G.Yu. Food Security: Forms and Institutions of Ensuring. Theoretical Economics. 2023. no. 3(99). pp. 104–116. (in Russian)

7 Tereshchuk L.V., Starovoitova K.V. Food Chemistry. Kemerovo: Kemerovo State University, 2020. 126 p. (in Russian)

8 Vasyukova A.T., Kusova I.U., Kandrokov R.Kh. Development of functional mixtures for flour culinary products. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. vol. 16. no. 6. pp. 455–475. (in Russian)

9 Sui X., Zhang T., Jiang L. Soy protein: Molecular structure revisited and recent advances in processing technologies. Annual Review of Food Science and Technology. 2021. vol. 12. no. 1. pp. 119–147. doi:10.1146/annurev-food-062520-093642

10 Ashaolu T.J. Applications of soy protein hydrolysates in the emerging functional foods: a review. International Journal of Food Science and Technology. 2020. vol. 55. no. 2. pp. 421–428. doi:10.1111/ijfs.14330

11 Gasparyan I.N., Sychev V.G., Melnikov A.V., Gorokhov A.S. Fundamentals of Crop Production. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2021. 496 p. (in Russian)

12 Marusenkov M.P., Ivankevich N.M. Russian Beans. Moscow: Prospect Publishing House, 2018. 24 p. (in Russian)

13 Shikhaliyeva K. Potential of the Chickpea and Lentil Gene Pool in Azerbaijani Breeding. Germany (Saarbrucken): Lambert Publishing House, 2018. 80 p. (in Russian)

14 Fedoseyeva V.V. The Role of Leguminous Crops as Predecessors for Cereals. Scientific Journal of Young Scientists. 2020. no. 4(21). pp. 48–50. (in Russian)

15 Khramova V.N., Surkov D.I., Lubchinsky K.A. Review of antinutrients in legumes. Welcome to the conference participants! 2022. p. 367. (in Russian)

16 Samofalova L.A., Safronova O.V. Methodological approaches to the germination of agricultural crop seeds, testing of germination success. Grain legumes and cereal crops. 2017. no. 3(23). (in Russian)

17 Veklenko V.I., Dadashev B.A. Soybean production and processing in Russia: past, present, future. Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2024. no. 1. pp. 213–220. (in Russian)

18 Veklenko V.I., Malakhov A.V., Soloshenko R.V. Organization of soybean processing. Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2024. no. 8. pp. 184–187. (in Russian)

19 Kostenko A.A., Kim I.N. Development of soy cheese technology using salmon milt and justification of its shelf life. Food industry. 2016. no. 8. pp. 53–57. (in Russian)

20 Antipova L.V., Dar'in A.O. Development of a functional product for the prevention of iodine deficiency. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 45–49. (in Russian)

21 Maleeva T.L., Goncharova Yu.M. Pharmacy assortment: specialized food products for baby food, dietary therapeutic and dietary preventive nutrition, nutrition for pregnant and lactating women; mineral waters. IX Annual Readings in Memory of Dr. F. H. Grahl. 2023. pp. 54–59. (in Russian)

22 Oleynik V.K., Klyuchko N.Yu. Study on the production and use of tofu cheese in vegetarian nutrition. Bulletin of KSTU. 2025. no. 77. pp. 72–83. (in Russian)

23 Antipova L.V., Darin A.O. Investigation of the properties of lentil cheese as a new food source in Russia. Proceedings of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, July 21, 2021). Part 1. (in Russian)

Сведения об авторах

Людмила В. Антипова д.т.н., профессор, НОЦ «Живые системы», Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, antipova.l54@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-1416-0297

Оксана Т. Ибрагимова к.т.н., доцент, кафедра технологии продуктов питания, Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, ул. Ватутина, 44–46, г. Владикавказ, 362025, Республика Северная Осетия–Алания, ibragimova.oksana95@ya.ru
https://orcid.org/0009-0003-9256-5542

Виктор Е. Плотников аспирант, ассистент, 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

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

Information about authors

Ludmila V. Antipova Dr. Sci. (Engin.), professor, Living Systems Research Center, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, antipova.l54@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-1416-0297

Oksana T. Ibragimova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, Department of Food Technology, North Ossetian State University, Vatutina, 44-46, Vladikavkaz, 362025, Republic of North Ossetia-Alania, ibragimova.oksana95@ya.ru
https://orcid.org/0009-0003-9256-5542

Viktor E. Plotnikov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, 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

Inessa V. Plotnikova candidate of technical sciences, assistant, 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

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 11/08/2025	**После редакции** 02/09/2025	**Принята в печать** 18/09/2025
Received 11/08/2025	**Accepted in revised** 02/09/2025	**Accepted** 18/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-66-77 Обзорная статья/Review article
УДК 664.64.016 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Биологически активные пептиды хлеба: источники, пути образования, свойства (мини-обзор)

Ирина М. Жаркова [1] zharir@mail.ru 0000-0001-8662-4559
Данил С. Иванчиков [1] ivanchikov_99@mail.ru 0000-0001-9814-6005

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

Аннотация. Развитие биоинформационных методов исследования способствует глубокому изучению различных биологических объектов, в том числе животного и растительного происхождения, с целью получения из них препаратов, которые могут эффективно применяться в медицине и различных отраслях пищевой промышленности. Можно предположить, что результаты многочисленных исследований, демонстрирующих преимущества хлеба «на закваске» перед «дрожжевым» по ряду показателей (снижение гликемической нагрузки и аллергенных свойств белков, более высокая антиоксидантная активность, лучшая усвояемость минеральных веществ и др.), обусловлены наряду с другими факторами и наличием определенных биологических активных пептидов. Цель исследования – поиск, систематизация и анализ научно-технической информации, связанной с изучением протеолиза в полуфабрикатах хлебопекарного производства и высвобождением пептидов, их биологической активности. Проведенный анализ научно-технической литературы свидетельствует о том, что биологически активные пептиды находятся в центре внимания ученых всего мира. По-прежнему сохраняют актуальность исследования, направленные на способы их извлечения из разнообразного сырья, условия, от которых зависит количество и свойства высвободившихся или синтезированных биологически активных пептидов. Общим в патогенезе большинства хронических воспалительных заболеваний является участие окислительного стресса, связанного с продукцией активных форм кислорода. Поэтому пищевые антиоксиданты, содержащиеся в продуктах питания, в настоящее время представляют собой новую эффективную стратегию противодействия такому состоянию. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление роли пептидов, содержащихся в пищевых продуктах, в том числе хлебобулочных изделиях на закваске, в профилактике ряда социально-значимых заболеваний, в первую очередь, заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Ключевые слова: молочнокислые бактерии, биологически активные пептиды, хлебопекарная закваска, антиоксидантные свойства, противомикробное действие.

Biologically active bread peptides: sources, routes of formation, properties (mini review)

Irina M. Zharkova [1] zharir@mail.ru 0000-0001-8662-4559
Danil S. Ivanchikov [1] ivanchikov_99@mail.ru 0000-0001-9814-6005

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

Abstract. The development of bioinformatics research methods facilitates the in-depth study of various biological objects, including those of animal and plant origin, with the goal of producing products from them that can be effectively used in medicine and various sectors of the food industry. It can be assumed that the results of numerous studies demonstrating the advantages of sourdough bread over yeast bread in a number of respects (reduced glycemic load and allergenic properties of proteins, higher antioxidant activity, better digestibility of minerals, etc.) are due, among other factors, to the presence of certain biologically active peptides. The purpose of this study was to identify, systematize, and analyze scientific and technical information related to the study of proteolysis in semi-finished bakery products, the release of peptides, and their biological activity. The conducted analysis of the scientific and technical literature indicates that biologically active peptides are the focus of attention of scientists worldwide. Research into methods for extracting them from a variety of raw materials and the conditions that determine the quantity and properties of released or synthesized biologically active peptides remains relevant. Oxidative stress, associated with the production of reactive oxygen species, is a common factor in the pathogenesis of most chronic inflammatory diseases. Therefore, dietary antioxidants currently represent a new, effective strategy for counteracting this condition. Therefore, research aimed at identifying the role of peptides contained in food products, including sourdough bakery products, in the prevention of a number of socially significant diseases, primarily cardiovascular diseases, is particularly relevant.

Keywords: lactic acid bacteria, biologically active peptides, bakery sourdough, antioxidant properties, antimicrobial action.

Введение

Развитие биоинформационных методов исследования способствует глубокому изучению различных биологических объектов, в том числе животного и растительного происхождения, с целью получения из них препаратов, которые могут эффективно применяться в медицине и различных отраслях пищевой промышленности. Одной из групп таких препаратов являются биологически активные пептиды, представляющие собой соединения из нескольких остатков α-аминокислот, связанных пептидной связью (–C(O)NH–) и обладающие способностью оказывать положительное влияние на организм человека (рисунок 1) [1, 2]. Пептиды отличаются по размеру, т. е. по количеству аминокислотных остатков и в зависимости от входящих в них аминокислот, имеют различную полярность и растворимость. Для медицинских целей пептиды выделяют из сырья в «чистом» виде и производят фармацевтические препараты с доказанными свойствами и эффективностью [1]. Биологически активные пептиды обладают и технологической значимостью для производства пищевых продуктов, поскольку способны предотвращать их окислительную порчу, выполнять функцию эмульгатора, антимикробного агента. Пептидам, богатым глутаминовой кислотой приписывают эффект кокуми, когда возникает ощущение более гармоничного вкуса продукта [3].

Для цитирования
Жаркова И.М., Иванчиков Д.С. Биологически активные пептиды хлеба: источники, пути образования, свойства (мини-обзор) // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 66–77. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-66-77

For citation
Zharkova I.M., Ivanchikov D.S. Biologically active bread peptides: sources, routes of formation, properties (mini review). Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 66–77. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-66-77

© 2025, Жаркова И.М.и др. / Zharkova I.M. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

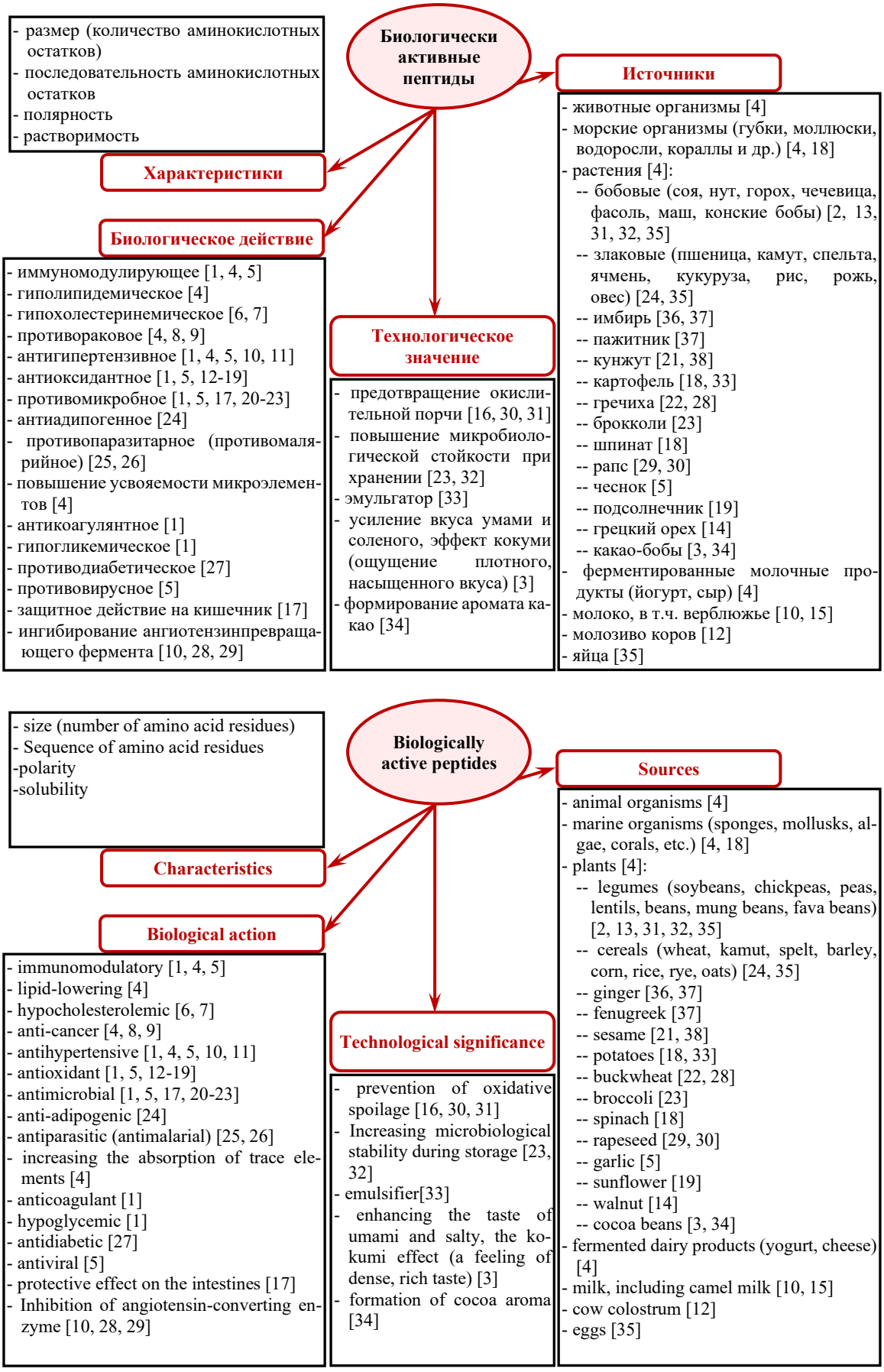


Рисунок 1. Источники и свойства биологически активных пептидов

Figure 1. Sources and properties of biologically active peptides

Биологически активные пептиды зашиты в белковой матрице и одним из путей их высвобождения служит ее ферментативный гидролиз под воздействием протеолитических ферментов, содержащихся в исходном сырье или дополнительно вносимых для достижения определенного технологического эффекта. Поэтому можно с уверенностью предположить, что в пищевых продуктах, в технологическом цикле производства которых имеет место протеолиз белковых веществ, будут содержаться разнообразные пептиды, отдельные из которых, вероятно, способны проявлять биологическую активность. Например, в технологии хлеба протеолиз, следовательно, и образование пептидов наблюдаются на этапе брожения полуфабрикатов (закваски, теста). Способов приготовления хлебобулочных изделий, в том числе из пшеничной муки, существует множество. Они отличаются не только перечнем используемого сырья, но и способом биологического разрыхления. Так, в качестве источника технологической микрофлоры могут выступать хлебопекарные дрожжи (прессованные, сушеные), закваски (естественного брожения или приготовленные с помощью «чистых» культур). В зависимости от выбранного источника технологической микрофлоры, режимов и параметров приготовления полуфабрикатов хлебопекарного производства существенно различается длительность технологического процесса и, как следствие, глубина протекающих микробиологических и биохимических процессов, в том числе, и гидролиза белков.

Можно предположить, что результаты многочисленных исследований, демонстрирующих преимущества хлеба «на закваске» перед «дрожжевым» по ряду показателей (снижение гликемической нагрузки и аллергенных свойств белков, более высокая антиоксидантная активность, лучшая усвояемость минеральных веществ и др.), обусловлены наряду с другими факторами и наличием определенных биологических активных пептидов.

В связи с этим, поиск, систематизация и анализ научно-технической информации, связанной с изучением протеолиза в полуфабрикатах хлебопекарного производства и высвобождением пептидов, их биологической активности является актуальным и служит **целью** настоящего исследования.

Объекты и методы

Поиск информации на русском и английском языках вели по базам PubMed и e-library с помощью ключевых слов «пептиды хлеба» и «peptides in bread» без ограничения по году издания.

Результаты и обсуждение

Злаковые и бобовые культуры составляют основу ежедневного рациона питания не только в России, но и практически во всех странах мира. Этим обусловлена их потенциальная важность в качестве источника пептидов, образуемых при ферментации [35].

Приготовление теста на закваске является наиболее традиционным (пришедшим из глубины веков) и эффективным инструментом не только для обеспечения реологических свойств теста и структуры мякиша разнообразных хлебобулочных изделий, богатой вкусо-ароматической палитры, но также для увеличения длительности срока годности и повышения их пищевой ценности [39, 40].

В общем смысле под хлебопекарной закваской понимают полуфабрикат, состоящий из муки и воды, который подвергается ферментативному воздействию молочнокислых бктерий и дрожжей [40, 41]. Распад нативных белков злаков в процессе ферментации закваски зависит от активности нативных ферментов злаков (первичный протеолиз) и метаболической активности бактерий (вторичный протеолиз) [42]. Углубленное изучение протеолиза в заквасках, появление новых знаний о деталях этого процесса позволяет целенаправленно оптимизировать процесс брожения для улучшения качества хлеба. Доказано наличие взаимосвязи между метаболизмом микробиоты закваски и активностью нативных ферментов злаков: увеличение концентрации кислот, продуцируемых молочнокислыми бактериями, вызывает разрушение дисульфидных связей в глютене, повышая растворимость глютеновых белков и, следовательно, их восприимчивость к ферментативному расщеплению. Снижение pH закваски до значений, оптимальных для нативных протеаз злаков (для эндогенных пшеничных протеиназ оптимум находится в зоне pH 3,0–4,0 [43]), способствует их активизации и, следовательно, высвобождению из белковой матрицы пептидов различных размеров. Пептидазы молочнокислых бактерий закваски осуществляют полный протеолиз (вторичный протеолиз), в результате которого образуются свободные аминокислоты, которые, в свою очередь, подвергаются различным катаболическим реакциям под действием тех же микроорганизмов [42, 44]. В результате в закваске происходит накопление низкомолекулярных соединений, разрушение антипитательных факторов (фитиновой кислоты), образуются пептиды различной молекулярной массы [39, 35]. Пептиды и аминокислоты являются важными предшественниками летучих ароматических соединений, которые формируют характерный вкус хлеба, приготовленного с помощью закваски.

Опубликовано большое количество результатов исследований, доказывающих, что разные лактобациллы не одинаково гидролизуют белки злаковых культур, продуцируя множество разнообразных пептидов. Например, Galli с соавт. изучен 131 штамм гомо- и гетероферментативных бактерий рода *Lactobacillus*, изолированных из итальянских заквасок [42, 45]. Из них только 3 штамма – *L. farciminis* H3 и A11 и *L. sanfranciscensis* I4, накапливали пептиды, обладающие высокой антиоксидантной и противовоспалительной активностью. Luti S. с соавт. исследовали состав, свойства этих пептидов и сохраняемость их биологической активности в хлебе [35]. Они установили, что большинство образовавшихся пептидов состоит из 20–39 аминокислот, присутствуют и более коротки пептиды. Основная часть идентифицированных Luti S. с соавт. пептидов образовалась в результате гидролиза глиадинов, глютенинов, серпинов и β-амилазы пшеницы. Они обнаружили различия в последовательностях и составе аминокислотных остатков, образующих пептиды в тесте и в готовом хлебе, однако биологическая активность пептидов в хлебе сохраняется. Причем пептиды, выделенные из теста и из хлеба обладали практически одинаковой антиоксидантной (обусловлена снижением уровня внутриклеточных активных форм кислорода) и противовоспалительной активностью, подтвержденной на макрофагах. Особый интерес представляет штамм L. rossiae Gd40, который был способен снижать уровень активных форм кислорода сильнее, чем аскорбиновая кислота, во всех клеточных линиях, рассмотренных в исследовании [42]. Авторы делают вывод о целесообразности выработки хлеба на закваске, содержащей один или несколько штаммов лактобацилл, активно образующих пептиды, и о необходимости дальнейшего изучения их способности противодействовать воспалению, предотвращать развитие хронических дегенеративных заболеваний, в частности синдрома раздраженного кишечника и диабета 1 типа [35].

Проблема микробиологической порчи хлебобулочных изделий в процессе хранения, обусловленной развитием плесневых грибов, – одна из актуальнейших проблем хлебопекарной отрасли. В связи с появлением неоспоримых результатов исследований, демонстрирующих потенциал негативного воздействия высоких доз консервантов (сорбата и пропионата кальция) на здоровье потребителей, Европейская директива по консервантам снизила допустимые концентрации сорбата до 0,2%, а пропионата до 0,3% [46]. В связи с этим остро стоит задача поиска природных консервантов с выраженной противогрибковой активностью.

В свете все возрастающего стремления потребителей к более здоровому образу жизни, приготовление хлебобулочных изделий на закваске способно заменить традиционно используемые химические консерванты экологически безопасными альтернативами с «чистой этикеткой», поскольку молочнокислые бактерии заквасок способны синтезировать или высвобождать противомикробные вещества in situ [47].

На сегодняшний день антимикробное и особенно противогрибковое действие молочнокислых бактерий в заквасках связывают с продукцией ими широкого спектра органических кислот, как алифатических, так и с гидроксильными и фенильными заместителями, а также бензойных кислот, которые часто действуют синергетически и способствуют гидролизу белков муки с образованием противогрибковых пептидов. Более того, такие пептиды были идентифицированы как в пшеничных заквасках, так и в заквасках на основе нетрадиционных субстратов, представляя собой последовательности, встроенные в специфические белки различных видов муки. Однако данные о противогрибковых пептидах заквасок на основе различных видов муки пока крайне ограничены; их изучение является перспективным направлением. Механизмы действия противогрибковых соединений в заквасках до сих пор недостаточно изучены. [43]

Garofalo C. с соавт. протестировали 216 культур молочнокислых бактерий, выделенных из заквасок и теста для хлеба и панеттоне, на ингибирующую активность против *Aspergillus japonicus*, *Eurotium repens* и *Penicillium roseopurpureum* [48]. Наиболее перспективными штаммами признаны *Lactobacillus rossiae* LD108 и *Lactobacillus paralimentarius* PB127, благодаря их способности гидролизовать α-глиадин пшеницы с высвобождением активных противогрибковых пептидов. То есть функция глютеновых белков не сводится лишь к образованию сетчатого каркаса теста, формирующего впоследствии структуру мякиша хлеба, но также заключается в способности высвобождать активные ппиды при гилролизе, в том числе обладающие противогрибковой активностью. С учётом вышеизложенного можно предположить, что отсутствие белков, способных гидролизоваться до противогрибковых пептидов, может быть одной из возможных причин ускоренной порчи безглютенового хлеба [47], а также недостаточный гидролиз или его отсутствие при ускоренных технологиях приготовления пшеничных хлебобулочных изделий.

Rizzello C.G. с соавт. проанализирована ингибирующая активность пептидов, высвобождаемых при ферментативном гидролизе белков семян сои (*Glycine max*), чечевицы (*Lens culinaris*), гороха (*Pisum sativum*), бобов (*Vicia faba*) и нута (*Cicer arietinum*), в отношении грибов *Penicillium roqueforti* DPPMAF1 (являются одними из наиболее устойчивых к химическим консервантам грибов). Наивысшие уровни ингибирования индикаторного гриба были обнаружены у гидролизатов из чечевичной (22%), гороховой (59%) и бобовой муки (73%). При этом лишь гидролизат гороха был эффективен в отношении 13 из 15 штаммов плесневых грибов, выделенных на хлебопекарных предприятиях (ингибирующая активность от 10 до 95%), тогда как гидролизаты чечевицы и конских бобов препятствовали росту лишь 4 штамма [32]. Была выявлена противогрибковая активность пяти пептидов, содержащихся в гидролизате гороха: введение 1,6% лиофилизированного горохового гидролизата в хлеб, приготовленный с использованием хлебопекарных дрожжей, позволило замедлить плесневение упакованной в полиэтиленовые пакеты продукции до 21 дня, что сравнимо с введением в рецептуру 0,3% пропионата кальция. Авторами показана возможность усиления противомикробного эффекта при введении лиофильно высушенного горохового гидролизата (1,6%) в тесто с закваской, содержащей молочнокислые бактерии штамма *L. plantarum* 1A7 (ранее этот штамм показал свою эффективность для продленияя срока годности хлеба): в условиях высокой концентрации искусственного заражения рост плесневых грибов задерживался, по крайней мере, до 21 дня хранения при комнатной температуре (ингибирующая активность была выше, чем у пропионата кальция в дозировке 0,3%) [32].

Исследования Hernández-Figueroa R.H. с соавт. подтверждают эффективность закваски с *Lb. plantarum* в качестве альтернативы пропионату натрия, благодаря выраженным противогрибковым свойствам [49]. Ström K. с соавт. показали способность *L. plantarum* MiLAB 393 продуцировать противогрибковые циклические дипептиды цикло(L-Phe–L-Pro) и цикло(LPhe-транс-4-OH-L-Pro) [50], а Dal Bello F. с соавт. идентифицировали среди противогрибковых пептидов *L. plantarum* FST1.7 дипептиды цикло (L-Leu-L-Pro) и цикло (L-Phe-L-Pro) [51]. При этом авторы считают, что противогрибковая активность циклических дипептидов молочнокислых бактерий является вторичным эффектом, а основная причина кроется в чувстве кворума или других неизвестных механизмах [50]. Система чувства кворума молочнокислых бактерий еще полностью не изучена [52].

Молочнокислые бактерии *L. brevis* также исследованы на способность высвобождения противогрибковых пептидов. Так, *Axel C.* с соавт. исследовали штамм *L. brevis* R2Δ и установили, что он синтезирует дипептиды цикло(Leu-Pro), цикло(ProPro) и цикло(Phe-Pro) [53]. *Nionelli L.* с соавт. идентифицировали 9 противогрибковых пептидов при гидролизе остатков хлеба *L. brevis* AM7 [54]. Причем, все эти пептиды были зашифрованы в последовательностях белков пшеницы.

Выявлена эффективность сочетания водных экстрактов из фасоли пинто с приготовлением теста на закваске с *Lactobacillus brevis* AM7: рост плесневых грибов на ломтиках хлеба не наблюдался в течение как минимум 14 дней хранения при комнатной температуре (уровень защиты сопоставим с использованием 0,3% пропионата кальция) [55].

Противогрибковые метаболиты *P. pentosaceus*, выделенного из пшеничной закваски, представлены циклическим дипептидом, эфиром жирной кислоты, гидроксилированным эфиром жирной кислоты и 3-изобутил 2,5 – пиперазиндион [56].

Противогрибковые пептиды обнаружены в гидролизате белков зародышей пшеницы [57].

Verni M. с соавт. показали, что в конских бобах противогрибковые пептиды зашифрованы в вицилине и легумине [58]. Wang P. и Ma T. исследовали влияние условий ферментации гречихи татарской бактериями *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC 14917 и установили, что максимальное количество пептидов в среде (22,18 ± 1,02 мг/мл) накапливается при 30 °C за 48 ч в водно-мучной смеси влажностью 60% с долей инокулята 12,87% [22].

Установлено, что низкомолекулярные пептиды могут индуцировать определенные защитные реакции в клетке молочнокислых бактерий, в частности, продукцию бактериоцинов [59]. В результате скрининга 34 штаммов молочнокислых бактерий из коллекции НИЦ «Курчатовский институт» Беловой А.М. с соавт. выделены четыре (*Latilactobacillus sakei* B-8952 и *Lactiplantibacillus plantarum* B-5337, B-5002, B-4487), проявляющие антагонизм по отношению к условно-патогенным бактериям *S. aureus* и *E. coli* [60]. Авторы установили, что данный эффект достигается благодаря синтезу бактериоцинов, представляющих собой белки с молекулярной массой 4–14 кДа. Yilmaz B. с соавт. изучена способность бактерий *Lactiplantibacillus plantarum* (ранее их называли *Lactobacillus plantarum*) способствовать образованию двухпептидного бактериоцина – плантарицина, активного в отношенияя грамположительных бактерий рода *Bacillus* и плесневых грибов родов *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor* и *Penicillium* [61].

Поскольку, как показано выше, различные соединения, продуцируемые и выделяемые молочнокислыми бактериями в матрице закваски, могут оказывать синергетический эффект, успешное сочетание различных видов и штаммов молочнокислых бактерий является ключом к проявлению противогрибкового эффекта [43].

Cicchi C. с соавт. исследовали водные экстракты, полученных из хлеба, приготовленного из разных видов муки (спельты и пшеницы) с использованием двух вариантов разрыхления теста: с помощью закваски (штаммы *Companilactobacillus farciminis* A11 и H3 и *Fructilactobacillus sanfranciscensis* I4 были отобраны ранее из-за способности усиливать антиоксидантные и противовоспалительные свойства закваски) или хлебопекарных дрожжей (штамм *Saccharomyces cerevisiae* LV8) [17]. Пептиды из пшеничной и спельтовой муки демонстрировали схожие хроматографические профили. Основные различия были обусловлены типом ферментации: ферментация с помощью закваски способствовала накоплению большего количества пептидов. В водном экстракте из спельтового хлеба, приготовленного на закваске, было обнаружено более высокое содержание пептидов, что, вероятно, обусловлено более высоким содержанием белка в спельте по сравнению с пшеницей. Масс-спектрометрическим методом установлено, что ферментация на закваске увеличивает количество уникальных пептидов в пшеничной муке по сравнению с ферментацией на хлебопекарных дрожжах. Напротив, количество пептидов, высвобождаемых из муки спельты, оставалось постоянным независимо от метода разрыхления. Выявлена более высокая биологическая активность пептидов, высвобожденных из белков спельты, независимо от выбранного способа разрыления (дрожжи или закваска). Эксперименты, проведенные на органоидах кишечника мышей, дополнительно подтвердили повышенную биологическую активность пептидов (антимикробную, антиоксидантную), полученных из спельты, ферментированной молочнокислыми бактериями.

Coda R. с соавт. исследовали активность антиоксидантных пептидов, образованных в заквасках из различных зерновых культур (пшеница, рожь, спельта, полба, овес, рис, камут, ячмень, кукуруза), приготовленных с помощью комбинации молочнокислых бактерий (*Lactobacillus alimentarius* 15 M, L. brevis 14G, *L. sanfranciscensis* 7A, LS3, LS10, LS19, LS23, LS38, LS47 и L. hilgardii 51B) [16]. Контролем в данной серии экспериментов служил образец теста без бактериального инокулята, который химически подкисляли до pH 3,5 смесью молочной и уксусной кислот (молярное соотношение 4:1) и выдерживали в тех же условиях, что и опытные образцы. Концентрации пептидов в водном экстракте из химически подкисленного теста были примерно в 2–3 раза ниже, чем в соответствующих заквасках. Несмотря на активацию эндогенных ферментов злаков вследствие подкисления, антиоксидантная активность химически подкисленного теста (контроль) была очень низкой. Активность удаления радикалов в отношении стабильного радикала DPPH у водных экстрактов из химически подкисленного теста находилась в диапазоне от 0,2% до 5,5%. Почти все образцы водных экстрактов из заквасок показали заметное увеличение активности удаления радикалов по сравнению с образцами из химически подкисленного теста. Наибольшая активность удаления радикалов была обнаружена у заквасок из пшеницы (48,0± 0,4%), камута (39,0± 0,2%), спельты (37,3± 0,4%) и ржи (35,4± 0,5%).

В водных экстрактах, полученных из заквасок, идентифицировали 25 пептидов длиной от 8 до 57 аминокислотных остатков: почти все из них имели общие структурные особенности, типичные для антиоксидантных пептидов. Все очищенные фракции пептидов продемонстрировали антиоксидантную активность в условиях ex vivo на мышиных фибробластах, искусственно подвергнутых окислительному стрессу [16].

В гидролизате белков нута Гаравири М. с соавт. идентифицировали гидрофобный пептид, способный связываться с радикалами Fe^{3-}–TPTZ, DPPH и ABTS, что обуславливает перспективность его применения в качестве антиоксиданта в пищевой промышленности [31].

В гидролизатах конских бобов Samaei S.P. с соавт. с помощью пептидомного анализа идентифицировали 2031 пептид, среди которых 9 показали 100% гомологию с ранее известными антиоксидантными пептидами [13]. По мнению авторов, перспективно применение таких гидролизатов в качестве функциональных пищевых ингредиентов при производстве продуктов питания.

Заключение

Проведенный анализ научно-технической литературы свидетельствует о том, что биологически активные пептиды находятся в центре внимания ученых всего мира. По-прежнему сохраняют актуальность исследования, направленные на способы их извлечения из разнообразного сырья, условия, от которых зависит количество и свойства высвободившихся или синтезированных биологически активных пептидов.

Общим в патогенезе большинства хронических воспалительных заболеваний является участие окислительного стресса, связанного с продукцией активных форм кислорода. Поэтому пищевые антиоксиданты, содержащиеся в продуктах питания, в настоящее время представляют собой новую эффективную стратегию противодействия такому состоянию [62]. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление роли пептидов, содержащихся в пищевых продуктах, в том числе хлебобулочных изделиях на закваске, в профилактике ряда социально-значимых заболеваний, в первую очередь, заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00275, https://rscf.ru/project/24-26-00275/.

Литература

1 Nasri M. Protein hydrolysates and biopeptides: production, biological activities, and applications in foods and health benefits. A review // Advances in Food and Nutrition Research. 2017. V. 81. P. 109–159. doi: 10.1016/bs.afnr.2016.10.003.

2 Ахангаран М., Афанасьев Д.А., Чернуха И.М., Машенцева Н.Г., Гаравири М. Биоактивные пептиды и антипитательные вещества нута: характеристика и свойства (обзор) // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2022. Т. 183. № 1. С. 214–223. doi: 10.30901/2227-8834-2022-1-214-223.

3 Salger M., Stark T.D., Hofmann T. Taste modulating peptides from overfermented cocoa beans // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2019. V. 67. № 15. P. 4311–4320. doi: 10.1021/acs.jafc.9b00905.

4 Cicero A.F.G., Fogacci F., Colletti A. Potential role of bioactive peptides in prevention and treatment of chronic diseases: a narrative review // British Journal of Pharmacology. 2017. V. 174. № 11. P. 1378–1394. doi: 10.1111/bph.13608.

5 Chidike Ezeorba T.P., Ezugwu A.L., Chukwuma I.F., Anaduaka E.G., Udenigwe C.C. Health-promoting properties of bioactive proteins and peptides of garlic (Allium sativum) // Food Chemistry. 2024. V. 435. P. 137632. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137632.

6 Nagaoka S. Structure–function properties of hypolipidemic peptide // Journal of Food Biochemistry. 2019. V. 43. № 1. e12539. doi: 10.1111/jfbc.12539.

7 Zhong F., Liu J., Ma J.J., Shoemaker C.F. Preparation of hypocholesterol peptides from soy protein and their hypocholesterolemic effect in mice // Food Research International. 2007. V. 40. № 6. P. 661–667. doi: 10.1016/j.foodres.2007.01.005.

8 Díaz-Gómez J.L., Castorena-Torres F., Preciado-Ortiz R.E., García-Lara S. Anti-cancer activity of maize bioactive peptides // Frontiers in Chemistry. 2017. V. 5. P. 44. doi: 10.3389/fchem.2017.00044.

9 Barati M., Javanmardi F., Mousavi Jazayeri S.M.H., Jabbari M., Rahmani J., Barati F. et al. Techniques, perspectives, and challenges of bioactive peptide generation: A comprehensive systematic review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020. V. 19. № 4. P. 1488–1520. doi: 10.1111/1541-4337.12578.

10 Seppo L., Jauhiainen T., Poussa T., Korpela R. A fermented milk high in bioactive peptides has a blood pressure-lowering effect in hypertensive subjects // American Journal of Clinical Nutrition. 2003. V. 77. № 2. P. 326–330. doi: 10.1093/ajcn/77.2.326.

11 Bhat Z.F., Kumar S., Bhat H.F. Antihypertensive peptides of animal origin: A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. V. 57. № 3. P. 566–578. doi: 10.1080/10408398.2014.898241.

12 Тихонов С.Л., Тихонова Н.В., Ожгихина А.С., Пестова И.Г. Новый антиоксидантный пептид и механизм биологической активности // Дальневосточный аграрный вестник. 2023. Т. 17. № 3. С. 148–156. doi: 10.22450/19996837_2023_3_148.

13 Samaei S.P., Ghorbani M., Tagliazucchi D., Martini S., Gotti R., Themelis T. et al. Functional, nutritional, antioxidant, sensory properties and comparative peptidomic profile of faba bean (Vicia faba L.) seed protein hydrolysates and fortified apple juice // Food Chemistry. 2020. V. 330. P. 127120. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127120.

14 Wang M., Sun X., Luo W., Božović S., Gong C., Ren J. Characterization and analysis of antioxidant activity of walnut-derived pentapeptide PW5 via nuclear magnetic resonance spectroscopy // Food Chemistry. 2021. V. 339. P. 128047. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128047.

15 Al-Shamsi K.A., Mudgil P., Hassan H.M., Maqsood S. Camel milk protein hydrolysates with improved technofunctional properties and enhanced antioxidant potential in in vitro and in food model systems // Journal of Dairy Science. 2018. V. 101. № 1. P. 47–60. doi: 10.3168/jds.2017-13194.

16 Coda R., Rizzello C.G., Pinto D., Gobbetti M. Selected lactic acid bacteria synthesize antioxidant peptides during sourdough fermentation of cereal flours // Applied and Environmental Microbiology. 2012. V. 78. № 4. P. 1087–1096. doi: 10.1128/AEM.06837-11.

17 Cicchi C., Leri M., Bucciantini M., Galli V., Guerrini S., Jiménez-Ortas Á., Ceacero-Heras D. et al. Sourdough Breads Made with Selected Lactobacillus Strains and Spelt Flour Contain Peptides That Positively Impact Intestinal Barrier // Foods. 2025. V. 14. № 18. P. 3184. doi: 10.3390/foods14183184.

18 Yesiltas B., García-Moreno P.J., Gregersen S., Olsen T.H., Jones N.C., Hoffmann S.V., Marcatili P. et al. Antioxidant peptides derived from potato, seaweed, microbial and spinach proteins: Oxidative stability of 5% fish oil-in-water emulsions // Food Chemistry. 2022. V. 385. P. 132699. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.132699.

19 Tonolo F., Coletta S., Fiorese F., Grinzato A., Albanesi M., Folda A., Ferro S. et al. Sunflower seed-derived bioactive peptides show antioxidant and anti-inflammatory activity: From in silico simulation to the animal model // Food Chemistry. 2024. V. 439. P. 138124. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.138124.

20 Miao J., Liu G., Ke C., Fan W., Li C., Chen Y. et al. Inhibitory effects of a novel antimicrobial peptide from kefir against Escherichia coli // Food Control. 2016. V. 65. P. 63–72. doi: 10.1016/j.foodcont.2016.01.023.

21 Zhu Z., Pan F., Wang O., Zhao L., Zhao L. Antibacterial Effect of Sesame Protein-Derived Peptides against Escherichia coli and Staphylococcus aureus: In Silico and In Vitro Analysis // Nutrients. 2024. V. 16. № 1. P. 175. doi: 10.3390/nu16010175.

22 Wang P., Ma T. Production of Bioactive Peptides from Tartary Buckwheat by Solid-State Fermentation with Lactiplantibacillus plantarum ATCC 14917 // Foods (Basel, Switzerland). 2024. V. 13. № 19. P. 3204. doi: 10.3390/foods13193204.

23 Andrés C.M.C., Pérez de la Lastra J.M., Munguira E.B., Juan C.A., Pérez-Lebeña E. The Multifaceted Health Benefits of Broccoli-A Review of Glucosinolates, Phenolics and Antimicrobial Peptides // Molecules (Basel, Switzerland). 2025. V. 30. № 11. P. 2262. doi: 10.3390/molecules30112262.

24 Ruiz-López F.J., Espinosa-Rodríguez B.A., Silva-Mares D.A., González-Martínez B.E., López-Cabanillas Lomelí M., Méndez-López L.F., Vázquez-Rodríguez J.A. In Silico Identification of Peptides with PPARγ Antagonism in Protein Hydrolysate from Rice (Oryza sativa) // Pharmaceuticals (Basel, Switzerland). 2023. V. 16. № 3. P. 440. doi: 10.3390/ph16030440.

25 Zhang D., He X., Cao J. Zhongguo xue xi chong bing fang zhi za zhi // Chinese Journal of Schistosomiasis Control. 2023. V. 35. № 2. P. 191–198. doi: 10.16250/j.32.1374.2023011.

26 Lou J., Zhang D., Wu J., Zhu G., Zhang M., Tang J., Fang Y. et al. Antimalarial activity of cecropin antimicrobial peptides derived from Anopheles mosquitoes // Antimicrobial Agents and Chemotherapy. 2024. V. 68. № 7. e0031124. doi: 10.1128/aac.00311-24.

27 Admassu H., Gasmalla M.A.A., Yang R., Zhao W. Bioactive peptides derived from seaweed protein and their health benefits: antihypertensive, antioxidant, and antidiabetic properties // Journal of Food Science. 2018. V. 83. № 1. P. 6–16. doi: 10.1111/1750-3841.14011.

28 Li Y., Yang N., Shi F., Ye F., Huang J. Isolation and identification of angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides from Tartary buckwheat albumin // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2023. V. 103. № 10. P. 5019–5027. doi: 10.1002/jsfa.12573.

29 Duan X., Dong Y., Zhang M., Li Z., Bu G., Chen F. Identification and molecular interactions of novel ACE inhibitory peptides from rapeseed protein // Food Chemistry. 2023. V. 422. P. 136085. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136085.

30 Beaubier S., Durand E., Lenclume C., Fine F., Aymes A., Framboisier X., Kapel R. et al. Chelating peptides from rapeseed meal protein hydrolysates: identification and evaluation of their capacity to inhibit lipid oxidation // Food Chemistry. 2023. V. 422. P. 136187. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136187.

31 Гаравири М., Дегтярев И.А., Фоменко И.А., Чернуха И.М., Машенцева Н.Г. Структурный анализ и молекулярный докинг нового антиоксидантного пептида из гидролизата белков нута (Cicer arietinum L.) // Пищевая промышленность. 2025. № 9. С. 153–158. doi: 10.52653/PPI.2025.9.9.026.

32 Rizzello C.G., Lavecchia A., Gramaglia V., Gobbetti M. Long-term fungal inhibition by Pisum sativum flour hydrolysate during storage of wheat flour bread // Applied and Environmental Microbiology. 2015. V. 81. № 12. P. 4195–4206. doi: 10.1128/AEM.04088-14.

33 Bashash M., Wang-Pruski G., He Q.S., Sun X. The emulsifying capacity and stability of potato proteins and peptides: A comprehensive review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2024. V. 23. № 5. e70007. doi: 10.1111/1541-4337.70007.

34 John W.A., Böttcher N.L., Aßkamp M., Bergounhou A., Kumari N., Ho P.W., D'Souza R.N. et al. Forcing fermentation: Profiling proteins, peptides and polyphenols in lab-scale cocoa bean fermentation // Food Chemistry. 2019. V. 278. P. 786–794. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.108.

35 Luti S., Mazzoli L., Ramazzotti M. et al. Antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdoughs containing selected Lactobacilli strains are retained in breads // Food Chemistry. 2020. V. 322. P. 126710. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126710.

36 Purohit K., Pathak R., Hayes E., Sunna A. Novel bioactive peptides from ginger rhizome: Integrating in silico and in vitro analysis with mechanistic insights through molecular docking // Food Chemistry. 2025. V. 484. P. 144432. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.144432.

37 Siddiqui I., Owais M., Husain Q. Antimicrobial effects of peptides from fenugreek and ginger proteins using Fe3O4@PDA-MWCNT conjugated trypsin by improving enzyme stability & applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. V. 282. Pt 5. P. 137197. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137197.

38 Wang X., Ai X., Zhu Z., Zhang M., Pan F., Yang Z., Wang O. et al. Pancreatic lipase inhibitory effects of peptides derived from sesame proteins: In silico and in vitro analyses // International Journal of Biological Macromolecules. 2022. V. 222. Pt A. P. 1531–1537. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.09.259.

39 Gobbetti M., De Angelis M., Di Cagno R., Calasso M., Archetti G., Rizzello C.G. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation // International Journal of Food Microbiology. 2019. V. 302. P. 103–113. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018.

40 Жаркова И.М., Росляков Ю.Ф., Иванчиков Д.С. Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 525–544. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2455.

41 De Vuyst L., Van Kerrebroeck S., Leroy F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation // Advances in Applied Microbiology. 2017. V. 100. P. 49–160. doi: 10.1016/bs.aambs.2017.02.003.

42 Galli V., Mazzoli L., Luti S. et al. Effect of selected strains of lactobacilli on the antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdough // International Journal of Food Microbiology. 2018. V. 286. P. 55–65. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.07.018.

43 Oleinikova Y., Amangeldi A., Zhaksylyk A., Saubenova M., Sadanov A. Sourdough Microbiota for Improving Bread Preservation and Safety: Main Directions and New Strategies // Foods. 2025. V. 14. № 14. P. 2443. doi: 10.3390/foods14142443.

44 Gänzle M.G., Loponen J., Gobbetti M. Proteolysis in sourdough fermentations: mechanisms and potential for improved bread quality // Trends in Food Science & Technology. 2008. V. 19. № 10. P. 513–521. doi: 10.1016/j.tifs.2008.04.002.

45 Galli V., Venturi M., Pini N., Guerrini S., Granchi L., Vincenzini M. Liquid and firm sourdough fermentation: microbial robustness and interactions during consecutive backsloppings // LWT - Food Science and Technology. 2019. V. 105. P. 9–15. doi: 10.1016/j.lwt.2019.02.004.

46 European Parliament and Council Directive No 95/2/EC of 20 February 1995 on food additives other than colours and sweeteners // Official Journal of the European Communities. 1995. L 61. P. 1–40.

47 Axel C., Zannini E., Arendt E.K. Mold spoilage of bread and its biopreservation: A review of current strategies for bread shelf life extension // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. V. 57. № 16. P. 3528–3542. doi: 10.1080/10408398.2016.1147417.

48 Garofalo C., Zannini E., Aquilanti L. et al. Selection of sourdough lactobacilli with antifungal activity for use as biopreservatives in bakery products // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2012. V. 60. № 31. P. 7719–7728. doi: 10.1021/jf301173u.

49 Hernández-Figueroa R.H., Mani-López E., López-Malo A. Antifungal capacity of poolish-type sourdough supplemented with Lactiplantibacillus plantarum and its aqueous extracts in vitro and bread // Antibiotics (Basel, Switzerland). 2022. V. 11. № 12. P. 1813. doi: 10.3390/antibiotics11121813.

50 Ström K., Sjögren J., Broberg A., Schnürer J. Lactobacillus plantarum MiLAB 393 produces the antifungal cyclic dipeptides cyclo(L-Phe-L-Pro) and cyclo(L-Phe-trans-4-OH-L-Pro) and 3-phenyllactic acid // Applied and Environmental Microbiology. 2002. V. 68. № 9. P. 4322–4327. doi: 10.1128/AEM.68.9.4322-4327.2002.

51 Dal Bello F., Clarke C.I., Ryan L.A.M., Ulmer H., Schober T.J., Ström K., Sjögren J. et al. Improvement of the quality and shelf life of wheat bread by fermentation with the antifungal strain Lactobacillus plantarum FST 1.7 // Journal of Cereal Science. 2007. V. 45. № 3. P. 309–318. doi: 10.1016/j.jcs.2006.09.004.

52 Chai Y., Ma Q., Nong X., Mu X., Huang A. Dissecting LuxS/AI-2 quorum sensing system-mediated phenyllactic acid production mechanisms of Lactiplantibacillus plantarum L3 // Food Research International. 2023. V. 166. P. 112582. doi: 10.1016/j.foodres.2023.112582.

53 Axel C., Zannini E., Arendt E.K., Waters D.M., Czerny M. Quantification of cyclic dipeptides from cultures of Lactobacillus brevis R2D by HRGC/MS using stable isotope dilution assay // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2014. V. 406. № 9-10. P. 2433–2444. doi: 10.1007/s00216-014-7620-3.

54 Nionelli L., Wang Y., Pontonio E., Immonen M., Rizzello C.G., Maina H.N., Katina K., Coda R. Antifungal effect of bioprocessed surplus bread as ingredient for bread-making: Identification of active compounds and impact on shelf-life // Food Control. 2020. V. 118. P. 107437. doi: 10.1016/j.foodcont.2020.107437.

55 Coda R., Rizzello C.G., Nigro F., De Angelis M., Arnault P., Gobbetti M. Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extracts of Phaseolus vulgaris cv. Pinto and sourdough lactic acid bacteria during bread storage // Applied and Environmental Microbiology. 2008. V. 74. № 23. P. 7391–7398. doi: 10.1128/AEM.01420-08.

56 Ebrahimi M., Sadeghi A., Mortazavi S.A. The use of cyclic dipeptide producing LAB with potent anti-aflatoxigenic capability to improve techno-functional properties of clean-label bread // Annals of Microbiology. 2020. V. 70. № 1. P. 24. doi: 10.1186/s13213-020-01571-y.

57 Rizzello C.G., Cassone A., Coda R., Gobbetti M. Antifungal activity of sourdough fermented wheat germ used as an ingredient for bread making // Food Chemistry. 2011. V. 127. № 3. P. 952–959. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.01.063.

58 Verni M., Wang Y., Clement H., Koirala P., Rizzello C.G., Coda R. Antifungal peptides from faba bean flour fermented by Levilactobacillus brevis AM7 improve the shelf-life of composite faba-wheat bread // International Journal of Food Microbiology. 2023. V. 407. P. 110403. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110403.

59 Kareb O., Aïder M. Quorum Sensing Circuits in the Communicating Mechanisms of Bacteria and Its Implication in the Biosynthesis of Bacteriocins by Lactic Acid Bacteria: A Review // Probiotics and Antimicrobial Proteins. 2020. V. 12. № 1. P. 5–17. doi: 10.1007/s12602-019-09555-4.

60 Белова А.М., Каниковская А.А., Машенцева Н.Г. Скрининг молочнокислых бактерий – продуцентов антимикробных пептидов // Поландовские чтения: сборник материалов VI Международной научно-практической молодежной конференции. Москва, 2024. С. 233–240.

61 Yilmaz B., Bangar S.P., Echegaray N. et al. The Impacts of Lactiplantibacillus plantarum on the Functional Properties of Fermented Foods: A Review of Current Knowledge // Microorganisms. 2022. V. 10. № 4. P. 826. doi: 10.3390/microorganisms10040826.

62 Şanlier N., Gökcen B.B., Sezgin A.C. Health benefits of fermented foods // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. V. 59. № 3. P. 506–527. doi: 10.1080/10408398.2017.1383355.

References

1 Nasri M. Protein hydrolysates and biopeptides Production, biological activities, and applications in foods and health benefits. A review. Advances in Food and Nutrition Research. 2017. vol. 81. pp. 109–159. doi:10.1016/bs.afnr.2016.10.003

2 Ahangaran M., Afanasev D.A., Chernukha I.M., Mashentseva N.G., Gharaviri M. Bioactive peptides and antinutrients in chickpea: description and properties (a review). Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2022. vol. 183. no. 1. pp. 214–223. doi:10.30901/2227-8834-2022-1-214-223 (in Russian)

3 Salger M., Stark T.D., Hofmann T. Taste Modulating Peptides from Overfermented Cocoa Beans. Journal of agricultural and food chemistry. 2019. vol. 67. no. 15. pp. 4311–4320. doi:10.1021/acs.jafc.9b00905

4 Cicero A.F.G., Fogacci F., Colletti A. Potential role of bioactive peptides in prevention and treatment of chronic diseases: a narrative review. British journal of pharmacology. 2017. vol. 174. no. 11. pp. 1378–1394. doi:10.1111/bph.13608

5 Chidike Ezeorba T.P., Ezugwu A.L., Chukwuma I.F., Anaduaka E.G., Udenigwe C.C. Health-promoting properties of bioactive proteins and peptides of garlic (Allium sativum). Food chemistry. 2024. vol. 435. p. 137632. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137632

6 Nagaoka S. Structure–function properties of hypolipidemic peptide. Journal of Food Biochemistry. 2019. vol. 43. no. 1. p. e12539. doi:10.1111/jfbc.12539

7 Zhong F., Liu J., Ma J.J., Shoemaker C.F. Preparation of hypocholesterol peptides from soy protein and their hypocholesterolemic effect in mice. Food Research International. 2007. vol. 40. pp. 661–667. doi:10.1016/j.foodres.2006.11.011

8 Díaz-Gómez J.L., Castorena-Torres F., Preciado-Ortiz R.E., GarcíaLara S. Anti-cancer activity of maize bioactive peptides. Frontiers in Chemistry. 2017. no. 5. p. 44. doi:10.3389/fchem.2017.00044

9 Barati M., Javanmardi F., Mousavi Jazayeri S.M.H., Jabbari M., Rahmani J., Barati F. et al. Techniques, perspectives, and challenges of bioactive peptide generation: A comprehensive systematic review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020. no. 19(4). pp. 1488–1520. doi:10.1111/1541-4337.12578

10 Seppo L., Jauhiainen T., Poussa T., Korpela R. A fermented milk high in bioactive peptides has a blood pressure-lowering effect in hypertensive subjects. The American journal of clinical nutrition. 2003. vol. 77. no. 2. pp. 326–330. doi:10.1093/ajcn/77.2.326

11 Bhat Z.F., Kumar S., Bhat H.F. Antihypertensive peptides of animal origin: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. vol. 57. no. 3. pp. 566–578. doi:10.1080/10408398.2014.898241

12 Tikhonov S.L., Tikhonova N.V., Ozhgikhina A.S., Pestova I.G. New antioxidant peptide and mechanism of biological activity. Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin. 2023. vol. 17. no. 3. pp. 148–156. doi: 10.22450/19996837_2023_3_148 (in Russian)

13 Samaei S.P., Ghorbani M., Tagliazucchi D., Martini S., Gotti R., Themelis T. et al. Functional, nutritional, antioxidant, sensory properties and comparative peptidomic profile of faba bean (Vicia faba L.) seed protein hydrolysates and fortified apple juice. Food Chemistry. 2020. vol. 330. p. 127120. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127120

14 Wang M., Sun X., Luo W., Božović S., Gong C., Ren J. Characterization and analysis of antioxidant activity of walnut-derived pentapeptide PW5 via nuclear magnetic resonance spectroscopy. Food Chemistry. 2021. vol. 339. p. 128047. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128047

15 Al-Shamsi K.A., Mudgil P., Hassan H.M., Maqsood S. Camel milk protein hydrolysates with improved technofunctional properties and enhanced antioxidant potential in in vitro and in food model systems. Journal of Dairy Science. 2018. vol. 101. no. 1. pp. 47–60. doi:10.3168/jds.2017-13194

16 Coda R., Rizzello C.G., Pinto D., Gobbetti M. Selected lactic acid bacteria synthesize antioxidant peptides during sourdough fermentation of cereal flours. Applied and environmental microbiology. 2012. vol. 78. no. 4. pp. 1087–1096. doi:10.1128/AEM.06837-11

17 Cicchi C., Leri M., Bucciantini M., Galli V., Guerrini S., Jiménez-Ortas Á., Ceacero-Heras D. et al. Sourdough Breads Made with Selected Lactobacillus Strains and Spelt Flour Contain Peptides That Positively Impact Intestinal Barrier. Foods. 2025. no. 14. p. 3184. doi:10.3390/foods14183184

18 Yesiltas B., García-Moreno P.J., Gregersen S., Olsen T.H., Jones N.C., Hoffmann S.V., Marcatili P. et al. Antioxidant peptides derived from potato, seaweed, microbial and spinach proteins: Oxidative stability of 5% fish oil-in-water emulsions. Food chemistry. 2022. vol. 385. p. 132699. doi:10.1016/j.foodchem.2022.132699

19 Tonolo F., Coletta S., Fiorese F., Grinzato A., Albanesi M., Folda A., Ferro S. et al. Sunflower seed-derived bioactive peptides show antioxidant and anti-inflammatory activity: From in silico simulation to the animal model. Food chemistry. 2024. vol. 439. p. 138124. doi:10.1016/j.foodchem.2023.138124

20 Miao J., Liu G., Ke C., Fan W., Li C., Chen Y. et al. Inhibitory effects of a novel antimicrobial peptide from kefir against Escherichia coli. Food Control. 2016. vol. 65. pp. 63–72. doi:10.1016/j.foodcont.2016.01.023

21 Zhu Z., Pan F., Wang O., Zhao L., Zhao L. Antibacterial Effect of Sesame Protein-Derived Peptides against Escherichia coli and Staphylococcus aureus: In Silico and In Vitro Analysis. Nutrients. 2024. vol. 16. no. 1. p. 175. doi:10.3390/nu16010175

22 Wang P., Ma T. Production of Bioactive Peptides from Tartary Buckwheat by Solid-State Fermentation with Lactiplantibacillus plantarum ATCC 14917. Foods (Basel, Switzerland). 2024. vol. 13. no. 19. p. 3204. doi:10.3390/foods13193204

23 Andrés C.M.C., Pérez de la Lastra J.M., Munguira E.B., Juan C.A., Pérez-Lebeña E. The Multifaceted Health Benefits of Broccoli-A Review of Glucosinolates, Phenolics and Antimicrobial Peptides. Molecules (Basel, Switzerland). 2025. vol. 30. no. 11. p. 2262. doi:10.3390/molecules30112262

24 Ruiz-López F.J., Espinosa-Rodríguez B.A., Silva-Mares D.A., González-Martínez B.E., López-Cabanillas Lomelí M., Méndez-López L.F., Vázquez-Rodríguez J.A. In Silico Identification of Peptides with PPARγ Antagonism in Protein Hydrolysate from Rice (Oryza sativa). Pharmaceuticals (Basel, Switzerland). 2023. vol. 16. no. 3. p. 440. doi:10.3390/ph16030440

25 Zhang D., He X., Cao J. Zhongguo xue xi chong bing fang zhi za zhi. Chinese journal of schistosomiasis control. 2023. vol. 35. no. 2. pp. 191–198. doi:10.16250/j.32.1374.2023011

26 Lou J., Zhang D., Wu J., Zhu G., Zhang M., Tang J., Fang Y. et al. Antimalarial activity of cecropin antimicrobial peptides derived from Anopheles mosquitoes. Antimicrobial agents and chemotherapy. 2024. vol. 68. no. 7. p. e0031124. doi:10.1128/aac.00311-24

27 Admassu H., Gasmalla M.A.A., Yang R., Zhao W. Bioactive peptides derived from seaweed protein and their health benefits: Antihypertensive, antioxidant, and antidiabetic properties. Journal of Food Science. 2018. vol. 83. no. 1. pp. 6–16. doi: 10.1111/1750-3841.14011

28 Li Y., Yang N., Shi F., Ye F., Huang J. Isolation and identification of angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides from Tartary buckwheat albumin. Journal of the science of food and agriculture. 2023. vol. 103. no. 10. pp. 5019–5027. doi: 10.1002/jsfa.12573

29 Duan X., Dong Y., Zhang M., Li Z., Bu G., Chen F. Identification and molecular interactions of novel ACE inhibitory peptides from rapeseed protein. Food chemistry. 2023. vol. 422. p. 136085. doi:10.1016/j.foodchem.2023.136085

30 Beaubier S., Durand E., Lenclume C., Fine F., Aymes A., Framboisier X., Kapel R. et al. Chelating peptides from rapeseed meal protein hydrolysates: identification and evaluation of their capacity to inhibit lipid oxidation. Food chemistry. 2023. vol. 422. p. 136187. doi:10.1016/j.foodchem.2023.136187

31 Garaviri M., Degtyarev I.A., Fomenko I.A., Chernukha I.M., Mashentseva N.G. Structural analysis and molecular docking of a new antioxidant peptide from chickpea protein hydrolysate (Cicer arietinum L.). Food processing industry. 2025. no. 9. pp. 153–158. doi: 10.52653/PPI.2025.9.9.026 (in Russian)

32 Rizzello C.G., Lavecchia A., Gramaglia V., Gobbetti M. Long-term fungal inhibition by Pisum sativum flour hydrolysate during storage of wheat flour bread. Applied and environmental microbiology. 2015. no. 81. pp. 4195–4206. doi:10.1128/AEM.04088-14

33 Bashash M., Wang-Pruski G., He Q.S., Sun X. The emulsifying capacity and stability of potato proteins and peptides: A comprehensive review. Comprehensive reviews in food science and food safety. 2024. vol. 23. no. 5. p. e70007. doi:10.1111/1541-4337.70007

34 John W.A., Böttcher N.L., Aßkamp M., Bergounhou A., Kumari N., Ho P.W., D'Souza R.N. et al. Forcing fermentation: Profiling proteins, peptides and polyphenols in lab-scale cocoa bean fermentation. Food chemistry. 2019. vol. 278. pp. 786–794. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.108

35 Luti S., Mazzoli L., Ramazzotti M. et al. Antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdoughs containing selected Lactobacilli strains are retained in breads. Food chemistry. 2020. no. 322. p. 126710. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126710

36 Purohit K., Pathak R., Hayes E., Sunna A. Novel bioactive peptides from ginger rhizome: Integrating in silico and in vitro analysis with mechanistic insights through molecular docking. Food chemistry. 2025. vol. 484. p. 144432. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.144432

37 Siddiqui I., Owais M., Husain Q. Antimicrobial effects of peptides from fenugreek and ginger proteins using Fe3O4@PDA-MWCNT conjugated trypsin by improving enzyme stability & applications. International journal of biological macromolecules. 2024. vol. 282 (Pt 5). p. 137197. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137197

38 Wang X., Ai X., Zhu Z., Zhang M., Pan F., Yang Z., Wang O. et al. Pancreatic lipase inhibitory effects of peptides derived from sesame proteins: In silico and in vitro analyses. International journal of biological macromolecules. 2022. vol. 222 (Pt A). pp. 1531–1537. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.09.259

39 Gobbetti M., De Angelis M., Di Cagno R., Calasso M., Archetti G., Rizzello C.G. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. International journal of food microbiology. 2019. no. 302. pp. 103–113. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018

40 Zharkova I.M., Roslyakov Yu.F., Ivanchikov D.S. Sourdoughs of Spontaneous (Natural) Fermentation in Modern Bakery Production. Food Processing: Techniques and Technology. 2023. vol. 53. no. 3. pp. 525–544. doi:10.21603/2074-9414-2023-3-2455 (in Russian)

41 de Vuyst L., van Kerrebroeck S., Leroy F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation. Advances in Applied Microbiology. 2017. no. 100. pp. 49–160. doi: 10.1016/bs.aambs.2017.02.003

42 Galli V., Mazzoli L., Luti S. et al. Effect of selected strains of lactobacilli on the antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdough. International Journal of Food Microbiology. 2018. no. 286. pp. 55–65. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.07.018

43 Oleinikova Y., Amangeldi A., Zhaksylyk A., Saubenova M., Sadanov A. Sourdough Microbiota for Improving Bread Preservation and Safety: Main Directions and New Strategies. Foods. 2025. no. 14. p. 2443. doi:10.3390/foods14142443

44 Gänzle M.G., Loponen J., Gobbetti M. Proteolysis in sourdough fermentations: Mechanisms and potential for improved bread quality. Trends in Food Science & Technology. 2008. no. 19. pp. 513–521. doi: 10.1016/j.tifs.2008.04.002

45 Galli V., Venturi M., Pini N., Guerrini S., Granchi L., Vincenzini M. Liquid and firm sourdough fermentation: Microbial robustness and interactions during consecutive backsloppings. LWT. 2019. no. 105. pp. 9–15. doi: 10.1016/j.lwt.2019.02.004

46 European Parliament and Council Directive No 95/2/EC of 20 February 1995 on food additives other than colours and sweeteners. Official Journal of the European Communities L 61. 1995.

47 Axel C., Zannini E., Arendt E.K. Mold spoilage of bread and its biopreservation: A review of current strategies for bread shelf life extension. Critical reviews in food science and nutrition. 2017. vol. 57. no. 16. pp. 3528–3542. doi: 10.1080/10408398.2016.1147417

48 Garofalo C., Zannini E., Aquilanti L. et al. Selection of sourdough lactobacilli with antifungal activity for use as biopreservatives in bakery products. Journal of agricultural and food chemistry. 2012. vol. 60. no. 31. pp. 7719–7728. doi:10.1021/jf301173u

49 Hernández-Figueroa R.H., Mani-López E., López-Malo A. Antifungal Capacity of Poolish-Type Sourdough Supplemented with Lactiplantibacillus plantarum and Its Aqueous Extracts In Vitro and Bread. Antibiotics (Basel, Switzerland). 2022. no. 11. p. 1813. doi:10.3390/antibiotics11121813

50 Ström K., Sjögren J., Broberg A., Schnürer J. Lactobacillus plantarum MiLAB 393 Produces the Antifungal Cyclic Dipeptides Cyclo(L-Phe-L-Pro) and Cyclo(L-Phe-trans 4 OH-L-Pro) and 3 Phenyllactic Acid. Applied and environmental microbiology. 2002. no. 68. pp. 4322–4327. doi:10.1128/AEM.68.9.4322-4327.2002

51 Dal Bello F., Clarke C.I., Ryan L.A.M., Ulmer H., Schober T.J., Ström K., Sjögren J. et al. Improvement of the quality and shelf life of wheat bread by fermentation with the antifungal strain Lactobacillus plantarum FST 1.7. Journal of Cereal Science. 2007. no. 45. pp. 309–318. doi: 10.1016/j.jcs.2006.09.004

52 Chai Y., Ma Q., Nong X., Mu X., Huang A. Dissecting LuxS/AI 2 quorum sensing system-mediated phenyllactic acid production mechanisms of Lactiplantibacillus plantarum L3. Food Research International. 2023. no. 166. p. 112582. doi: 10.1016/j.foodres.2023.112582

53 Axel C., Zannini E., Arendt E.K., Waters D.M., Czerny M. Quantification of cyclic dipeptides from cultures of Lactobacillus brevis R2D by HRGC/MS using stable isotope dilution assay. Analytical and bioanalytical chemistry. 2014. no. 406. pp. 2433–2444. doi: 10.1007/s00216-014-7620-3

54 Nionelli L., Wang Y., Pontonio E., Immonen M., Rizzello C.G., Maina H.N., Katina K., Coda R. Antifungal effect of bioprocessed surplus bread as ingredient for bread-making: Identification of active compounds and impact on shelf-life. Food Control. 2020. no. 118. p. 107437. doi: 10.1016/j.foodcont.2020.107437

55 Coda R., Rizzello C.G., Nigro F., De Angelis M., Arnault P., Gobbetti M. Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extracts of Phaseolus vulgaris cv. Pinto and sourdough lactic acid bacteria during bread storage. Applied and environmental microbiology. 2008. no. 74. pp. 7391–7398. doi: 10.1128/AEM.01420-08

56 Ebrahimi M., Sadeghi A., Mortazavi S.A. The use of cyclic dipeptide producing LAB with potent anti-aflatoxigenic capability to improve techno-functional properties of clean-label bread. Annals of Microbiology. 2020. no. 70. p. 24. doi: 10.1186/s13213-020-01571-y

57 Rizzello C.G., Cassone A., Coda R., Gobbetti M. Antifungal activity of sourdough fermented wheat germ used as an ingredient for bread making. Food chemistry. 2011. vol. 127. pp. 952–959. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.01.063

58 Verni M., Wang Y., Clement H., Koirala P., Rizzello C.G., Coda R. Antifungal peptides from faba bean flour fermented by Levilactobacillus brevis AM7 improve the shelf-life of composite faba-wheat bread. International journal of food microbiology. 2023. no. 407. p. 110403. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110403

59 Kareb O., Aïder M. Quorum Sensing Circuits in the Communicating Mechanisms of Bacteria and Its Implication in the Biosynthesis of Bacteriocins by Lactic Acid Bacteria: A Review. Probiotics and Antimicrobial Proteins. 2020. no. 12. pp. 5–17. doi: 10.1007/s12602-019-09555-4

60 Belova A.M., Kanikovskaya A.A., Mashentseva N.G. Screening of lactic acid bacteria – producers of antimicrobial peptides. In: Poland Readings. Collection of Proceedings of the VI International Scientific and Practical Youth Conference. Moscow, 2024. pp. 233–240. (in Russian)

61 Yilmaz B., Bangar S.P., Echegaray N. et al. The Impacts of Lactiplantibacillus plantarum on the Functional Properties of Fermented Foods: A Review of Current Knowledge. Microorganisms. 2022. vol. 10. no. 4. p. 826. doi:10.3390/microorganisms10040826

62 Şanlier N., Gökcen B.B., Sezgin A.C. Health benefits of fermented foods. Critical reviews in food science and nutrition. 2017. no. 25. pp. 1–22. doi:10.1080/10408398.2017.1383355

Сведения об авторах

Ирина М. Жаркова 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, zharir@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8662-4559

Данил С. Иванчиков аспирант, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ivanchikov_99@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9814-6005

Вклад авторов

Ирина М. Жаркова написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Данил С. Иванчиков обзор литературных источников по исследуемой проблеме

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Irina M. Zharkova 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, zharir@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8662-4559

Danil S. Ivanchikov graduate student, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ivanchikov_99@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9814-6005

Contribution

Irina M. Zharkova wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Danil S. **Ivanchikov** review of the literature on an investigated problem

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 18/08/2025	**После редакции** 03/09/2025	**Принята в печать** 18/09/2025
Received 18/08/2025	**Accepted in revised** 03/09/2025	**Accepted** 18/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-78-86 Обзорная статья/Review article
УДК 640 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Оценка антиоксидантной, антимикробной активности растительного сырья и применение в пищевой промышленности

Собхи А.А. Аль-Сухайми [1] elsohaimys@gmail.com 0000-0002-1657-5162
Зилолахон А. Тошева [1] toshevaza@susu.ru 0000-0001-8517-2888
Валерия А. Воробьева [1] valeriavorbeva@gmail.com 0009-0007-4854-1788
Лада Д. Коломиец [1] kolomiets.lada22@ya.ru 0000-0001-5760-6159
София П. Горшенина [1] gorshenina.sofia@mail.ru 0009-0007-0676-2355
Анастасия А. Лямина [1] nlyamina2002@gmail.com 0009-0009-6877-1526

1 Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), проспект Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

Аннотация. Актуальной темой для пищевой промышленности является продление срока годности продукции с сохранением всех её свойств. Осуществление этой цели достигается на данное время в основном с помощью синтетических консервантов. Но при этом они имеют негативное воздействие на здоровье человека, и это привело к тому, что потребители стали искать продукты с более экологичным и «чистым» составом. Натуральные консервирующие вещества могут стать решением данной проблемы, ведь даже при больших концентрациях по сравнению с синтетическими они безопасны для людей. Для их создания можно использовать отходы после производства такой продукции из растительного сырья, как соки, пюре, овощные консервы, томатной пасты. Это делает натуральные консерванты и более экономичными, и экологичными. Благодаря высокому содержанию биологически активных веществ, в особенности фенольных соединений, растительные экстракты могут проявлять антиоксидантные, антимикробные способности, продлевая срок годности продукции и замедляя рост микроорганизмов. Фенолы и флавоноиды являются вторичными метаболитами, которые содержатся во фруктах, семенах и листьях растений и обладают широким спектром полезных свойств для здоровья благодаря их защитным свойствам против окисления и роста нежелательных микроорганизмов. Так, экстракты апельсиновой корки, облепихового сока и зеленого чая показали высокую антиоксидантную и антимикробную активность. Положительный эффект и польза растительных биологически активных соединений откроют перспективы для создания полезных, недорогих и безвредных для здоровья пищевых консервантов. В будущем возможно продолжение изучения экономических и экологических выгод от использования биоактивных соединений растительного происхождения при производстве натуральных консервантов для пищевой промышленности

Ключевые слова: антиоксидантная активность, антимикробной активности, растительное сырьё, продукты переработки, фенольные соединения, натуральные консерванты.

Evaluation of the antioxidant, antimicrobial activity of plant raw materials and products of their processing

Sobhy A.A. El-Suhaimy [1] elsohaimys@gmail.com 0000-0002-1657-5162
Zilolakhon A. Tosheva [1] toshevaza@susu.ru 0000-0001-8517-2888
Valeria A. Vorobieva [1] valeriavorbeva@gmail.com 0009-0007-4854-1788
Lada D. Kolomiets [1] kolomiets.lada22@ya.ru 0000-0001-5760-6159
Sofya P. Gorshenina [1] gorshenina.sofia@mail.ru 0009-0007-0676-2355
Anastasia A. Lyamina [1] nlyamina2002@gmail.com 0009-0009-6877-1526

1 South Ural State University (National Research University, 76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia

Abstract. An urgent topic for the food industry is the extension of the shelf life of products while preserving all their properties. The realization of this goal is achieved at this time mainly with the help of synthetic preservatives. But at the same time, they have a negative impact on human health, and this has led consumers to look for products with a more environmentally friendly and "clean" composition. Natural preservatives can be a solution to this problem, because even at high concentrations compared to synthetic ones, they are safe for humans. To create them, waste can be used after the production of such products from vegetable raw materials as juices, mashed potatoes, canned vegetables, tomato paste. This makes natural preservatives both more economical and environmentally friendly. Due to the high content of biologically active substances, especially phenolic compounds, plant extracts can exhibit antioxidant, antimicrobial properties, prolonging the shelf life of products and slowing the growth of microorganisms. Phenols and flavonoids are secondary metabolites found in fruits, seeds and leaves of plants and have a wide range of health benefits due to their protective properties against oxidation and the growth of undesirable microorganisms. Thus, extracts of orange peel, sea buckthorn juice and green tea showed high antioxidant and antimicrobial activity. The positive effect and benefits of plant biologically active compounds will open up prospects for the creation of useful, inexpensive and harmless food preservatives. In the future, it is possible to continue studying the economic and environmental benefits of using bioactive compounds of plant origin in the production of natural preservatives for the food industry.

Keywords: antioxidant activity, antimicrobial activity, vegetable raw materials, processed products, phenolic compounds, natural preservatives.

Для цитирования
Аль-Сухайми С.А., Тошева З.А., Воробьева В.А., Коломиец Л.Д., Горшенина С.П., Лямина А.А. Оценка антиоксидантной, антимикробной активности растительного сырья и применение в пищевой промышленности // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 78–86. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-78-86

For citation
Al-Suhaimi S.A., Tosheva Z.A., Vorobyova V.A., Kolomiets L.D., Gorshenina S.P., Lyamina A.A. Evaluation of the antioxidant, antimicrobial activity of plant raw materials and products of their processing. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 78–86. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-78-86

© 2025, Аль-Сухайми С.А. и др. / Al-Suhaimi S.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

На сегодняшний день в пищевой промышленности активно используют пищевые добавки для улучшения разных характеристик продукта, таких как текстура, запах, цвет, вкус, а также для предотвращения порчи, слеживания, прогоркания и других нежелательных процессов. Очень важной добавкой является консервант, который не позволяет вредным микроорганизмам распространяться в продукте, а также ингибирует процессы окисления жиров и белков, а в мясных продуктах иногда используется для создания и удержания красного цвета. Консервант должен иметь высокую антиоксидантную, антимикробную активность, не влиять на органолептические показатели продукции и на естественные микробиологические процессы, протекающие внутри неё, быть безопасным для человека [1].

Физические способы консервации (пастеризация, заморозка, стерилизация и другие) используются повсеместно, но не всегда достаточно только их для продолжительного и безопасного хранения пищевых продуктов, помимо этого не всегда возможно их применение. Также имеют место быть биологические методы, заключающиеся в добавлении определённых культур микроорганизмов, например, в кисломолочные продукты. Таким образом, они подавляют рост патогенных бактерий, производя в ходе своей жизнедеятельности органические кислоты [2]. Но наиболее распространённый способ консервации – химический, где широко используют как природные вещества (сахар, соль), так и пищевые добавки.

В настоящее время в пищевой промышленности чаще всего применяются синтетические консерванты. Их довольно легко и недорого производить, а при добавлении в продукт требуется небольшая концентрация. Но они помимо своей эффективности против порчи продукта имеют оборотную сторону медали – могут быть токсичным и вызывать аллергические реакции [3].

В раннем исследовании о влиянии синтетических добавок на организм выяснили, что бензонат натрия и бензонат калия вызывают нарушение развития плода во время беременности у мышей [4]. Среди других синтетических консервантов нитрит натрия, добавляемый в мясные продукты, способен вызывать рак, в частности рак головного мозга, лейкемию, опухоли носоглотки вследствие злоупотребления [5]. В другой работе описаны эффекты от употребления BHA (бутилированный гидроксианизол) и BHT (бутилированный гидрокситолуол), которые считаются очень токсичными добавками. К таким воздействиям от употребления относятся: возникновение неврологических проблем, эндокринные заболевания, метаболические дисфункции [6].

Вследствие этого потребители стали скептично относиться к продукции с «химией», и появилась необходимость создания натуральных добавок, в частности консервантов. Помимо этого, преимуществом использования таких добавок является повторное применение отходов после производства овощной, фруктовой продукции, специй. Семена, кожура, листья также включают в себя фенольные соединения, эфирные масла, органические кислоты, фитостеролы, что делает их не менее ценным сырьём по биологическим показателям [7–9].

Также такие натуральные консерванты могут, наоборот, оказывать положительный эффект на здоровье за счёт активных природных соединений, органических кислот, полифенолов, витаминов-антиоксидантов. В ряде исследований выявили их противовоспалительное, противогрибковое, антибактериальное, антикоронавирусное действия, они способствуют здоровью коже, защите от нейрозаболеваний и возникновения рака [10, 11]. Также есть перспективы применения антиоксидантов в лечении бесплодия женищн [12].

Для создания натурального консерванта помимо высокого содержания полифенольных соединений в растительном сырье нужно ещё учитывать методы и условия их экстрагирования, растворители [13]. Традиционные способы экстракции (отваривание, перколяция, Сокслета) уже не так эффективны, как современные. На данный момент лучшими и перспективными методами являются экстракция жидкостью повышенным давлением, в частности сверхкритическая флюидная; ультразвуковой метод; микроволновая и ферментативная экстракции. Они требуют меньше затрат энергии и растворителя, повышают выход необходимого выделяемого компонента, а также они более экологичные [14].

В текущем обзоре обсуждаются биологически-активные соединения растительного происхождения и их антиоксидантная и антимикробная активность, которые могут быть полезны при разработке натуральных пищевых консервантов.

Материалы и методы

В исследовании применялись методы анализа, систематизации, сравнения, обобщения.

Поиск источников данных осуществлялся в научных электронных библиотеках и поисковых системах eLIBRARY.ru, PubMed, Web of Science, Scopus and на портале Cyberleninka.

Объектом исследования является оценка антиоксидантной и антимикробной активности биохимических соединений источников растительного сырья

Глубина поиска источников: 25 лет.

Результаты и обсуждения

Фенольных соединений и флавоноидов. «Как указано в учебнике: фенольные соединения – вещества ароматической природы, содержащие одну или несколько гидроксильных групп. Именно благодаря ароматической группе фенольные соединения являются прекрасными антиоксидантами, нейтрализуя свободные радикалы. Окисление продуктов может происходить под воздействием кислорода, металлов, освещения или радиации. Вступая в реакцию, фенольные антиоксиданты становятся донорами водорода или электрона и тем самым ингибируют процесс. В отличие от свободных радикалов, радикал фенола в дальнейшем не продолжает участие в окислении из-за того, что заместители в ароматическом кольце создают кинетическую стабильность [15].

Ранее были написаны исследования по изучению структуры фенольных соединений, а также была произведена их оценка антиоксидантной, антимикробной активности у разных растений в качестве пищевых добавок [16,17]. Их вторичные метаболиты, отвечающие за окислительно-восстановительные процессы, привлечение насекомых-опылителей, защиту от вредителей, ингибирование или усиление роста, обуславливающие аромат, цвет, запах плодов и цветков, включают в себя необходимые антиоксиданты и противомикробные вещества [18]. Именно поэтому они могут стать отличным материалом для разработки натуральных добавок. Причем они могут применяться не только для пищевой промышленности, но и для косметической, фармацевтической отраслях.

Антиоксиданты входят в состав не только фруктов, овощей и ягод, а также специй и зерна. Исследования химического состава цельнозерновых культур показало, что ценность их состоит не только в клетчатке, крахмале и минералах, но они содержат и органические кислоты, фенольные соединения, причем в отрубях их намного выше, чем в эндосперме [19]. В состав цельнозерновых риса и пшеницы входят такие органические соединения, как ферулловая, синаповая, сиринговая, кофейная, галловая, р-гидроксибензойная кислоты [20].

Исходя из анализа содержания фенольных соединений в некоторых плодах, их продуктах переработки и других частей растений из ранних исследований, можно сделать вывод, что наибольшее содержание, как фенольных соединений, так и флаваноидов у облепихового сока и водного экстракта розмарина (таблица 1).

Таблица 1.

Содержание фенолов и флавоноидов в растительном сырье

Table 1.

The content of phenols and flavonoids in plant materials

Сырье Raw material	Растворители Solvents	Общее содержание фенолов в мг GAE*/г Total phenol content in mg GAE*/g	Общее содержание флаваноидов в мг QE**/г Total flavanoid content in mg QE**/g	Источники Sources
Розмарин | Rosemary	Вода | Water	271,66	112,71	[22]
Имбирь | Ginger	Этанол 70% Ethanol 70%	201,31	44,06	[22]
Сок облепихи | Sea buckthorn juice	–	283,58	118,42	[23]
Жмых облепихи | Sea buckthorn cake	Этанол 50% Ethanol 50%	32,55	50,52	[9]
Листья годжи (садовые) | Goji leaves (garden)	–	1,68	-	[24]
Кожура апельсина | Orange peel	Вода Water	2,56	0,52	[21]
Кожура апельсина | Orange peel	Этанол 70% Ethanol 70%	3,45	0,80	[21]
Кожура лимона | Lemon peel	Вода Water	2,10	0,37	[21]
Кожура грейпфрута | Grapefruit peel	Этанол 70% Ethanol 70%	2,13	0,39	[21]
Кожура персика | Peach peel		5,84	1,02	[7]
Кожура сливы | Plum peel		4,81	0,96	[7]
Кожура нектарина | Nectarine peel		1,53	0,09	[7]
Кожура абрикоса | Apricot peel		5,60	1,22	[7]
Семена сливы | Plum seeds		0,94	0,34	[8]
Семена персика | Peach Seeds		0,47	0,18	[8]
Семена нектарина | Nectarine seeds		0,31	0,16	[8]
Семена абрикоса | Apricot Seeds		0,65	0,23	[8]

* – эквивалент в галловой кислоте. the equivalent in gallic acid.
** – эквивалент в катехине. the equivalent in catechin

Можно заметить, что не всегда экстрагирование этанолом имело лучшие результаты по сравнению с водой. Например, в лимоне и розмарине общее количество фенолов больше экстрагируется в воде, чем в этаноле на 61,05 мг GAE/г экстракта розмарина и 11,34 мг GAE/100 г. кожуры лимона [20, 21]. Но сравнивая результаты по другим плодам и растениям, этанол
является лучшим растворителем. Так, разница между количеством фенолов в растворе этанола и воды у имбиря составляет больше 100 мг GAE/г экстракта, у кожуры апельсина в 0,89 мг GAE/г сухого вещества [21, 22]. В целом, самые

большие показатели по обоим значениям у сока облепихи, розмарина, перечной мяты и имбиря.

Антиоксидантная активность фенольных соединений растительного сырья. Антиоксидантная и антимикробная активность обусловлена высокими показателями содержания общего количества фенольных соединений и флаваноидов, а также их состава. Особенно большое количество их находится в растительномсырье и продуктах их переработки (кожуре, семенах) в качестве вторичных метаболитов.

Антиоксидантная активность используемых консервантов показывает, насколько долго продукты не будут становиться прогорклыми, как долго они будут сохранять свой естественный цвет. В ходе окисления жиров и белков образуются вторичные продукты, такие как кетоны, альдегиды, спирты и карбонильные соединения. Они могут проявлять себя в качестве мутагенов и негативно влиять на здоровье. Именно за счёт содержания фенольных соединений, витаминов А, С и Е, ликопинов в продуктах, свободные радикалы меньше влияют на структуру белков и жиров в пищевом сырье [25].

Для определения данного показателя чаще всего используется метод DPPH, основанный на нейтрализации устойчивых свободных радикалов 1,1 – дифенил-2-пикрилгидразила при взаимодействии с веществом, обладающим антиоксидантной активностью. FRAP используется при оценке антиоксидантной способности восстанавливать ионы трёхвалентного железа [26]. В данной работе будут сравниваться два этих показателя (таблица 2).

Можно заметить из работ по исследованию антиоксидантной активности разных растений, что, например, результаты кожуры цитрусовых не сильно отличались друг от друга в зависимости от растворителя, но результаты экстракта жмыха облепихи имели большую разницу в зависимости от методы экстрагирования биологически-активных соединений [9, 21]. При сравнении данного показателя у зеленого чая антиоксидантная способность была выше, чем у облепихового сока и экстрактов кожуры цитрусовых. Сами показатели среди разных сортов чая варьировались от 18% у черного чая до 90% у зеленого. В основном результаты зависели от сорта чая, но важным фактором являлся регион произрастания [27].

Проанализировав антиоксидантную среди продуктов переработки фруктов оказалось, что большее значение было у кожуры абрикоса, сливы и персика (3,73 мг AAE/г, 1,01 мг AAE/г, 1,33 мг AAE/г) чем у семян (1,47 мг AAE/г, 0,94 мг AAE/г, 0,98 мг AAE/г). Показатели семян и кожуры нектарина сильно не отличались (1,42 мг AAE/г и 1,29 мг AAE/г соответственно). У облепихового же жмыха она равнялась значениям 89 (мг Trolox/г) и 101 (мг/г Fe2+), определенных методами CURRAC и FRAP II (таблица 2). Ещё одним нетрадиционным источником биологически активных веществ являются почки растений. Они проявляют и антиоксидантную и антимикробную активность. Так, экстракт почек малины с растворителем глицерол-вода, показали способность нейтрализовать радикал DPPH в значении 0,60 мкмоль trolox [29].

Таблица 2.

Антиоксидантная активность растительного сырья

Table 2.

Antioxidant activity of plant materials

Растение Plant	Метод оценки DPPH Evaluation method DPPH	Метод оценки FRAP Evaluation method FRAP	Источники Sources
Сок облепихи | Sea buckthorn juice	76%	–	[21]
Жмых облепихи | Sea buckthorn cake	–	mg/g Fe^{2}+	[7]
Зеленый чай | Green tea	89,76%	–	[27]
Кожура апельсина | Orange peel	67,90%	–	[19]
Кожура лимона | Lemon peel	53,44%	–	[19]
Кожура грейпфрута | Grapefruit peel	60,83%	–	[19]
Ягоды годжи Goji berries	7,61 ммоль Trolox / 100 г. 7,61 mmol Trolox / 100 g	3,93 ммоль Trolox / 100 г. 3,93 mmol Trolox / 100 g	[22]
Листья годжи (садовые) Goji leaves (garden)	4,25 ммоль Trolox / 100 г. 4,25 mmol Trolox / 100 g	5,89 ммоль Trolox / 100 г. 5,89 mmol Trolox / 100 g	[22]
Кожура яблока | Apple peel	0,142 мг/мл | 0,142 mg/ml	95,99 мг/мл | 95,99 mg/ml	[26]
Кожура персика | Peach peel	1,33 мг AAE/г | 1,33 mg AAE/g	0,89 мг AAE/г | 0,89 mg AAE/g	[5]
Кожура сливы | Plum peel	1,01 мг AAE/г | 1,01 mg AAE/g	0,71 мг AAE/г | 0,71 mg AAE/g	[5]
Кожура нектарина | Nectarine peel	1,29 мг AAE/г | 1,29 mg AAE/g	0,91 мг AAE/г | 0,91 mg AAE/g	[5]
Кожура абрикоса | Apricot peel	3,73 мг AAE/г | 3,73 mg AAE/g	3,27 мг AAE/г | 3,27 mg AAE/g	[5]
Семена сливы | Plum seeds	0,94 мг AAE/г | 0,94 mg AAE/g	0,63 мг AAE/г | 0,63 mg AAE/g	[6]
Семена персика | Peach Seeds	0,98 мг AAE/г | 0,98 mg AAE/g	0,54 мг AAE/г | 0,54 mg AAE/g	[6]
Семена нектарина | Nectarine seeds	1,42 мг AAE/г | 1,42 mg AAE/g	0,98 мг AAE/г | 0,98 mg AAE/g	[6]
Семена абрикоса | Apricot Seeds	1,47 мг AAE/г | 1,47 mg AAE/g	0,93 мг AAE/г | 0,93 mg AAE/g	[6]

Антимикробной активность фенольных соединений растительного сырья. Наличие фенольных соединений, таких как простые фенолы, хиноны, флавоны, флавононы, флаваноиды танины и другие, предотвращает не только окисление продукта, но и рост патогенных микроорганизмов [30]. Антимикробная активность биологически активных соединений также зависит от типа микроорганизма, питательной среды. Антимикробные растительные агенты влияют на жизнедеятельность клетки микроорганизма, нарушая её мембрану, лишая субстрата, связываясь с ней, взаимодействуя с ДНК [31].

Для сравнения использовались данные антимикробной активности экстракта кожуры апельсина, розмарина, листьев годжи и облепиховый сок, влияющие на такие микроорганизмы, как *Bacillus cereus, Escherichia coli, Listeria monocytogenes, Staphylococcus aureus, Yersinia enterocolitica, Salmonella senftenberg, Bacillus subtilis, Staphylococcus pyogenes, Klebsiella pneumoniae, Candida albicans*. Экстракт кожуры апельсина проявил лучшую антимикробную активность, чем облепиховый сок в отношении всех штаммов, особенно большая зона ингибирования была у образца с *Bacillus cereus* (22,33 мм). Самый низкий показатель был у образца облепихового сока с *Listeria monocytogenes* (9,13 мм). Тем не менее, все растения показали хорошую способность к защите от пищевых патогенов (таблица 3). Также антибактериальным эффектом обладают абрикосы, персики, сливы против *L. monocytogenes, E. coli* и *S. Gaminara* в ингибирующей концентрации 2,6% за счёт содержания в основном яблочной кислоты. Этой способностью обладает большинство ягод (клюква, брусника, голубика, ежевика, малина, черноплодная рябина, красная смородина) против *S. Typhimurium* в минимальной ингибирующей концентрации 0,312–1,25% [32].

Разные фенольные соединения проявляют себя по-разному к различным типам микроорганизмов. Так, танины, содержащиеся в большом количестве в чае, лучше ингибируют рост *Pseudomonas aeruginosa* and *Klebsiella pneumonia*; антоцианы, которых много в смородине, хорошо защищают от *Salmonella enteritidis, Listeria monocytogenes, Vibrio parahaemolyticus, Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*; а фенольные кислоты и стильбены проявляют высокую активность также против *Escherichia coli, Staphylococcus aureus*, and *Salmonella typhi* [33]

Таблица 3.

Диаметр зоны ингибирования патогенных микроорганизмов

Table 3.

Diameter of the inhibition zone of pathogenic microorganisms

Микроорганизм Microorganism	Облепиховый сок, мм Sea buckthorn juice, mm	Кожура апельсина, мм Orange peel, mm	Розмарин, мм Rosemary, mm	Листья годжи, мм Goji leaves, mm
Bacillus cereus	12,40	22,33	–	–
Bacillus subtilis	–	–	17,0	16,7
Escherichia coli	17,46	18,50	13,0	10,5
Listeria monocytogenes	9,13	16,50	–	10,9
Staphylococcus aureus	16,26	18,50	12,0	9,6
Yersinia enterocolitica	14,33	15,90	–	–
Salmonella senftenberg	15,13	16,76	–	–
Staphylococcus pyogenes	–	–	21,0	–
Klebsiella pneumoniae	9,66	–	–	–
Candida albicans	10,60	–	ND	–
Источники	[21]	[19]	[20]	[22]

Применение в пищевой промышленности в качестве натуральных консервантов. В пищевой промышленности редко используют все части растительного сырья для производства продуктов. После изготовления соков пюре из мякоти для детского питания, такой сладкой консервации, как варенье, конфитюры, желе, пищевые отходы после производства не используются и просто утилизируются. Тем не менее, продукты переработки также содержат множество биологически-активных веществ [7–9].

Наличие фенольных соединений, флаваноидов, показатели антиоксидантной активности не только в соке, но и кожуре, семян, жмыхе, предоставляют перспективы в изготовлении дешевых и безопасных натуральных консервантов из вторичных продуктов растительного происхождения. За счет содержания таких полифенольных соединений, как органические кислоты (кумаровая, аскорбиновая, хлорогеновая, галловая), катехины, кверцетины, дельфинидины и многие другие, они действуют как восстановители, доноры водорода и подавители кислорода, что проявляется в высокой противомикробной и противоокислительной способности и может применяться в пищевых продуктах [34].

Для выделения биологически-активных элементов и создания натурального консерванта необходимо правильно подобрать экстрагирующие смеси, чтобы их можно было использовать для дальнейшего изготовления пищевых продуктов, а также способы и условия экстракции. Помимо высокой антиоксидантной и антимикробной активности, растительные экстракты обладают полезными эффектами на здоровье человека и не являются такими опасными для частого употребления, как синтетические консерванты [35]. А использование отходов производства улучшает состояние экологии и не вредит окружающей среде.

Заключение

В текущем обзоре выяснили, что растительное сырьё, а именно фрукты, специи, травы, в особенности ягоды, в том числе продукты их переработки, – является отличным источником фенольных соединений, органических кислот, витаминов, проявляющих высокую способность против окисления жиров и белков и предотвращения порчи от патогенных микроорганизмов. Экстракт кожуры апельсина показал высокую антиоксидантную активность 68%, в сравнении с облепиховым соком и настоем зеленого чая. Также экстракт имеет хорошую защиту против различных патогенных микроорганизмов (> 15 мм зоны ингибирования).

Большое содержание фенольных соединений было установлено у специй (розмарин, мята, имбирь), облепихового сока и жмыха. Но фенолы и флаваноиды также в небольшом количестве обнаруживались в кожуре, семенах плодов, листьях апельсина, облепихи, годжи, лимона, грейпфрута, что означает перспективы в создании натурального консерванта, который будет безопасным для здоровья человека, недорогим в производстве и который не будет негативно влиять на окружающую среду. В дальнейшем можно продолжить исследование экономической и экологической выгоды от применения вторичных растительных продуктов в производстве консерванта.

Литература

1 Никифорова Т.А., Меледина Т.В. Пищевые добавки и ароматизаторы: учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2009. 217 с. ISBN 978-5-89565-191-9.

2 Teneva D., Denev P. Biologically Active Compounds from Probiotic Microorganisms and Plant Extracts Used as Biopreservatives // Microorganisms. 2023. V. 11. № 8. P. 1896. doi: 10.3390/microorganisms11081896.

3 Юркова А.А. Пищевые добавки в составе популярных продуктов // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2021. V. 5. № 1 (56). P. 91–94. doi: 10.24412/2500-1000-2021-5-1-91-94.

4 Sambu S., Hemalatha R., Mishra U. Toxicological and Teratogenic Effect of Various Food Additives: An Updated Review // BioMed Research International. 2022. V. 2022. P. 6829409. doi: 10.1155/2022/6829409.

5 Hamdan A.M., Kuter S.A., Alzahrani A.R., Almasmoum H.A., Gbaj A.M., El-Taweel F.M., Shehab N.G., El-Ela F.I.A. Thymoquinone therapy remediates elevated brain tissue inflammatory mediators induced by chronic administration of food preservatives // Scientific Reports. 2019. V. 9. P. 7026. doi: 10.1038/s41598-019-43568-x.

6 Rathee P., Sehrawat R., Kumari A., Kumar S., Kumar V. Polyphenols: Natural Preservatives with Promising Applications in Food, Cosmetics and Pharma Industries; Problems and Toxicity Associated with Synthetic Preservatives; Impact of Misleading Advertisements; Recent Trends in Preservation and Legislation // Materials. 2023. V. 16. № 13. P. 4793. doi: 10.3390/ma16134793.

7 Suleria H.A.R., Barrow C.J., Dunshea F.R. Screening and Characterization of Phenolic Compounds and Their Antioxidant Capacity in Different Fruit Peels // Foods. 2020. V. 9. № 9. P. 1206. doi: 10.3390/foods9091206.

8 Hong Y., Wang Z., Barrow C.J., Dunshea F.R., Suleria H.A.R. High-Throughput Screening and Characterization of Phenolic Compounds in Stone Fruits Waste by LC-ESI-QTOF-MS/MS and Their Potential Antioxidant Activities // Antioxidants. 2021. V. 10. № 2. P. 234. doi: 10.3390/antiox10020234.

9 Luntraru C.M., Oancea A.-C., Matei E., Dinu-Pirvu C.-E., Oancea F., Velescu B.S., Buca B.-R., Paun I., Stefanescu R., Anuta V., Tatu A.L. Reclaim and Valorization of Sea Buckthorn (Hippophae rhamnoides) By-Product: Antioxidant Activity and Chemical Characterization // Foods. 2022. V. 11. № 3. P. 462. doi: 10.3390/foods11030462.

10 Sun W., Shahrajabian M.H. Therapeutic Potential of Phenolic Compounds in Medicinal Plants – Natural Health Products for Human Health // Molecules. 2023. V. 28. № 4. P. 1845. doi: 10.3390/molecules28041845.

11 Costa de Camargo A., Biasoto A.C.T., Schwember A.R., Granato D., Rasera G.B., Franchin M., Rosalen P.L., Alencar S.M., Shahidi F. Opinion on the Hurdles and Potential Health Benefits in Value-Added Use of Plant Food Processing By-Products as Sources of Phenolic Compounds // International Journal of Molecular Sciences. 2018. V. 19. № 11. P. 3498. doi: 10.3390/ijms19113498.

12 Showell M.G., Mackenzie-Proctor R., Jordan V., Hart R.J. Antioxidants for female subfertility (Review) // Cochrane Database of Systematic Reviews. 2020. № 8. Art. No.: CD007807. doi: 10.1002/14651858.CD007807.pub4.

13 Plaskova A., Mlcek J. New insights of the application of water or ethanol-water plant extract rich in active compounds in food // Frontiers in Nutrition. 2023. V. 10. P. 1118761. doi: 10.3389/fnut.2023.1118761.

14 Sridhar A., Ponnuchamy M., Kumar P.S., Kapoor A., Vo D.-V.N., Prabhakar S. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: a review // Environmental Chemistry Letters. 2021. V. 19. P. 3409–3443. doi: 10.1007/s10311-021-01217-8.

15 Кандалинцева Н.В. Гидрофильные халькогенсодержащие производные алкилированных фенолов: синтез, свойства, антиокислительная и биологическая активность: диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук: 02.00.03. Новосибирск: Новосибирский государственный педагогический университет, 2020. 381 с.

16 Pateiro M., Barba F.J., Domínguez R., Sant'Ana A.S., Khaneghah A.M., Gavahian M., Gómez B., Lorenzo J.M. Effect of Addition of Natural Antioxidants on the Shelf-Life of "Chorizo", a Spanish Dry-Cured Sausage // Antioxidants. 2015. V. 4. № 1. P. 42–67. doi: 10.3390/antiox4010042.

17 Sohaib M., Anjum F.M., Sahar A., Arshad M.S., Rahman U.U., Imran M., Hussain S. Oxidative stability and lipid oxidation flavoring volatiles in antioxidants treated chicken meat patties during storage // Lipids in Health and Disease. 2017. V. 16. P. 27. doi: 10.1186/s12944-017-0426-5.

18 Abdel-Daim M.M. Alleviation of Drugs and Chemicals Toxicity: Biomedical Value of Antioxidants // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2018. V. 2018. P. 6276438. doi: 10.1155/2018/6276438.

19 Călinoiu L.F., Vodnar D.C. Whole Grains and Phenolic Acids: A Review on Bioactivity, Functionality, Health Benefits and Bioavailability // Nutrients. 2018. V. 10. № 11. P. 1615. doi: 10.3390/nu10111615.

20 Shahidi F. Wheat and Rice beyond Phenolic Acids: Genetics, Identification Database, Antioxidant Properties, and Potential Health Effects // Plants. 2022. V. 11. № 23. P. 3283. doi: 10.3390/plants11233283.

21 Shehata G.M., Elsebaie E.M., El Newary S.A., Ibrahim M.E., Nour Eldin T.A. Antioxidant and antimicrobial activities and UPLC-ESI-MS/MS polyphenolic profile of sweet orange peel extracts // Current Research in Food Science. 2021. V. 4. P. 326–335. doi: 10.1016/j.crfs.2021.05.001.

22 El-Naggar M.N., El-Dougdoug K.A., Abdel-Fattah A.M., El-Khateeb A.Y., Eweis E.A., Elsayed M. Antimicrobial and antioxidant activities of some plant Extracts // Zagazig Journal of Agricultural Research. 2017. V. 44. № 3. P. 1241–1256.

23 El-Sohaimy A.S., Shehata M.G., Alsanea R.A., Alqattan O.A., Zeitoun A.M.A. Nutritional Evaluation of Sea Buckthorn "Hippophae rhamnoides" Berries and the Pharmaceutical Potential of the Fermented // Fermentation. 2022. V. 8. № 8. P. 391. doi: 10.3390/fermentation8080391.

24 Kruczek A. Health-Promoting Capacities of In Vitro and Cultivated Goji (Lycium chinense Mill.) Fruit and Leaves; Polyphenols, Antimicrobial Activity, Macro – and Microelements and Heavy Metals // Molecules. 2020. V. 25. № 22. P. 5314. doi: 10.3390/molecules25225314.

25 Manessis G., Kalogianni A.I., Lazou T., Moschovas M., Bossis I., Gelasakis A.I. Plant-Derived Natural Antioxidants in Meat and Meat Products // Antioxidants. 2020. V. 9. № 12. P. 1215. doi: 10.3390/antiox9121215.

26 Яшин А.Я. Методология определения антиоксидантной активности пищевых продуктов и биологических жидкостей // Аналитика. 2021. Т. 11. № 5. С. 232–247.

27 Klepacka J., Górecka E., Pachołek B. Tea as a Source of Biologically Active Compounds in the Human Diet // Molecules. 2021. V. 26. № 5. P. 1487. doi: 10.3390/molecules26051487.

28 Kalinowska M., Gryko K., Wróblewska A.M., Jabłońska-Trypuć A., Karpowicz D. Phenolic content, chemical composition and anti-/pro-oxidant activity of Gold Milenium and Papierowka apple peel extracts // Scientific Reports. 2020. V. 10. P. 14951. doi: 10.1038/s41598-020-71351-w.

29 Krzepiłko A., Prazak R., Świeciło A. Chemical Composition, Antioxidant and Antimicrobial Activity of Raspberry, Blackberry and Raspberry-Blackberry Hybrid Leaf Buds // Molecules. 2021. V. 26. № 2. P. 327. doi: 10.3390/molecules26020327.

30 Teshome E., Tola Y.B., Mohammed A., Astatkie T. Potentials of Natural Preservatives to Enhance Food Safety and Shelf Life: A Review // The Scientific World Journal. 2022. V. 2022. P. 9901018. doi: 10.1155/2022/9901018.

31 Cowan M.M. Plant Products as Antimicrobial Agents // Clinical Microbiology Reviews. 1999. V. 12. № 4. P. 564–582. doi: 10.1128/CMR.12.4.564.

32 Suriyaprom S., Mosoni P., Leroy S., Kaewkod T., Desvaux M., Tragoolpua Y. Antioxidants of Fruit Extracts as Antimicrobial Agents against Pathogenic Bacteria // Antioxidants. 2022. V. 11. № 3. P. 602. doi: 10.3390/antiox11030602.

33 Ullah H., Wilfred C.D., Shaharun M.S. Natural Polyphenols for the Preservation of Meat and Dairy Products // Molecules. 2022. V. 27. № 6. P. 1906. doi: 10.3390/molecules27061906.

34 Pruteanu L.L., Bailey D.S., Grădinaru A.C., Jäntschi L. The Biochemistry and Effectiveness of Antioxidants in Food, Fruits, and Marine Algae // Antioxidants. 2023. V. 12. № 4. P. 860. doi: 10.3390/antiox12040860.

35 Sotler R., Poljšak B., Dahmane R., Jukić T., Pavan Jukić D., Rotim C., Trebše P., Starc A. Prooxidant activities of antioxidants and their impact on health // Acta Clinica Croatica. 2019. V. 58. № 4. P. 726–736. doi: 10.20471/acc.2019.58.04.20.

References

1 Nikiforova T.A., Meledina N.V. Food additives and flavorings: an educational and methodical manual. St. Petersburg: SPbGUNiPT, 2009. 217 p. ISBN 978-5-89565-191-9 (in Russian)

2 Teneva D., Denev P. Biologically Active Compounds from Probiotic Microorganisms and Plant Extracts Used as Biopreservatives. Microorganisms. 2023. vol. 11. no. 8. p. 1896. doi: 10.3390/microorganisms11081896

3 Yurkova A.A. Food additives in the composition of popular products. International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2021. vol. 5-1 (56). pp. 91–94. doi: 10.24412/2500-1000-2021-5-1-91-94 (in Russian)

4 Sambu S. et al. Toxicological and Teratogenic Effect of Various Food Additives: An Updated Review. BioMed Research International. 2022. vol. 2022. p. 6829409. doi: 10.1155/2022/6829409

5 Hamdan A.M. et al. Thymoquinone therapy remediates elevated brain tissue inflammatory mediators induced by chronic administration of food preservatives. Scientific Reports. 2019. vol. 9. p. 7026. doi: 10.1038/s41598-019-43568-x

6 Rathee P. et al. Polyphenols: Natural Preservatives with Promising Applications in Food, Cosmetics and Pharma Industries; Problems and Toxicity Associated with Synthetic Preservatives; Impact of Misleading Advertisements; Recent Trends in Preservation and Legislation. Materials. 2023. vol. 16. no. 13. p. 4793. doi: 10.3390/ma16134793

7 Suleria H.A.R., Barrow C.J., Dunshea F.R. Screening and Characterization of Phenolic Compounds and Their Antioxidant Capacity in Different Fruit Peels. Foods. 2020. vol. 9. no. 9. p. 1206. doi: 10.3390/foods9091206

8 Hong Y., Wang Z., Barrow C.J., Dunshea F.R., Suleria H.A.R. High-Throughput Screening and Characterization of Phenolic Compounds in Stone Fruits Waste by LC-ESI-QTOF-MS/MS and Their Potential Antioxidant Activities. Antioxidants. 2021. vol. 10. no. 2. p. 234. doi: 10.3390/antiox10020234

9 Luntraru C.M. et al. Reclaim and Valorization of Sea Buckthorn (Hippophae rhamnoides) By-Product: Antioxidant Activity and Chemical Characterization. Foods. 2022. vol. 11. no. 3. p. 462. doi: 10.3390/foods11030462

10 Sun W., Shahrajabian M.H. Therapeutic Potential of Phenolic Compounds in Medicinal Plants – Natural Health Products for Human Health. Molecules. 2023. vol. 28. no. 4. p. 1845. doi: 10.3390/molecules28041845

11 Costa de Camargo A. et al. Opinion on the Hurdles and Potential Health Benefits in Value-Added Use of Plant Food Processing By-Products as Sources of Phenolic Compounds. International Journal of Molecular Sciences. 2018. vol. 19. no. 11. p. 3498. doi: 10.3390/ijms19113498

12 Showell M.G., Mackenzie-Proctor R., Jordan V., Hart R.J. Antioxidants for female subfertility. Cochrane Database of Systematic Reviews. 2020. no. 8. Art. No.: CD007807. doi: 10.1002/14651858.CD007807.pub4

13 Plaskova A., Mlcek J. New insights of the application of water or ethanol-water plant extract rich in active compounds in food. Frontiers in Nutrition. 2023. vol. 10. p. 1118761. doi: 10.3389/fnut.2023.1118761

14 Sridhar A. et al. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: a review. Environmental Chemistry Letters. 2021. vol. 19. pp. 3409–3443. doi: 10.1007/s10311-021-01217-8

15 Kandalintseva N.V. Hydrophilic chalcogen-containing derivatives of alkylated phenols: synthesis, properties, antioxidant and biological activity: dissertation for the degree of Doctor of Chemical Sciences. Novosibirsk: Novosibirsk State Pedagogical University, 2020. 381 p. (in Russian)

16 Pateiro M. et al. Effect of Addition of Natural Antioxidants on the Shelf-Life of "Chorizo", a Spanish Dry-Cured Sausage. Antioxidants. 2015. vol. 4. no. 1. pp. 42–67. doi: 10.3390/antiox4010042

17 Sohaib M. et al. Oxidative stability and lipid oxidation flavoring volatiles in antioxidants treated chicken meat patties during storage. Lipids in Health and Disease. 2017. vol. 16. p. 27. doi: 10.1186/s12944-017-0426-5

18 Abdel-Daim M.M. Alleviation of Drugs and Chemicals Toxicity: Biomedical Value of Antioxidants. Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2018. vol. 2018. p. 6276438. doi: 10.1155/2018/6276438

19 Călinoiu L.F., Vodnar D.C. Whole Grains and Phenolic Acids: A Review on Bioactivity, Functionality, Health Benefits and Bioavailability. Nutrients. 2018. vol. 10. no. 11. p. 1615. doi: 10.3390/nu10111615

20 Shahidi F. Wheat and Rice beyond Phenolic Acids: Genetics, Identification Database, Antioxidant Properties, and Potential Health Effects. Plants. 2022. vol. 11. no. 23. p. 3283. doi: 10.3390/plants11233283

21 Shehata G.M. et al. Antioxidant and antimicrobial activities and UPLC-ESI-MS/MS polyphenolic profile of sweet orange peel extracts. Current Research in Food Science. 2021. vol. 4. pp. 326–335. doi: 10.1016/j.crfs.2021.05.001

22 El-Naggar M.N. et al. Antimicrobial and antioxidant activities of some plant extracts. Zagazig Journal of Agricultural Research. 2017. vol. 44. no. 3.

23 El-Sohaimy A.S. et al. Nutritional Evaluation of Sea Buckthorn "Hippophae rhamnoides" Berries and the Pharmaceutical Potential of the Fermented. Fermentation. 2022. vol. 8. no. 8. p. 391. doi: 10.3390/fermentation8080391

24 Kruczek A. Health-Promoting Capacities of In Vitro and Cultivated Goji (Lycium chinense Mill.) Fruit and Leaves; Polyphenols, Antimicrobial Activity, Macro – and Microelements and Heavy Metals. Molecules. 2020. vol. 25. no. 22. p. 5314. doi: 10.3390/molecules25225314

25 Manessis G. et al. Plant-Derived Natural Antioxidants in Meat and Meat Products. Antioxidants. 2020. vol. 9. no. 12. p. 1215. doi: 10.3390/antiox9121215

26 Yashin A.Ya. Methodology for determining the antioxidant activity of foods and biological fluids. Analytics. 2021. vol. 11. no. 5. (in Russian)

27 Klepacka J. Tea as a Source of Biologically Active Compounds in the Human Diet. Molecules. 2021. vol. 26. no. 5. p. 1487. doi: 10.3390/molecules26051487

28 Kalinowska M. Phenolic content, chemical composition and anti-/pro-oxidant activity of Gold Milenium and Papierowka apple peel extracts. Scientific Reports. 2020. vol. 10. p. 14951. doi: 10.1038/s41598-020-71351-w

29 Krzepiłko A., Prażak R., Świeciło A. Chemical Composition, Antioxidant and Antimicrobial Activity of Raspberry, Blackberry and Raspberry-Blackberry Hybrid Leaf Buds. Molecules. 2021. vol. 26. no. 2. p. 327. doi: 10.3390/molecules26020327

30 Teshome E. et al. Potentials of Natural Preservatives to Enhance Food Safety and Shelf Life: A Review. The Scientific World Journal. 2022. vol. 2022. p. 9901018. doi: 10.1155/2022/9901018

31 Cowan M.M. Plant Products as Antimicrobial Agents. Clinical Microbiology Reviews. 1999. vol. 12. no. 4. pp. 564–582.

32 Suriyaprom S. et al. Antioxidants of Fruit Extracts as Antimicrobial Agents against Pathogenic Bacteria. Antioxidants. 2022. vol. 11. no. 3. p. 602. doi: 10.3390/antiox11030602

33 Ullah H. et al. Natural Polyphenols for the Preservation of Meat and Dairy Products. Molecules. 2022. vol. 27. no. 6. p. 1906. doi: 10.3390/molecules27061906

34 Pruteanu L.L. et al. The Biochemistry and Effectiveness of Antioxidants in Food, Fruits, and Marine Algae. Antioxidants. 2023. vol. 12. no. 4. p. 860. doi: 10.3390/antiox12040860

35 Sotler R. et al. Prooxidant activities of antioxidants and their impact on health. Acta Clinica Croatica. 2019. vol. 58. no. 4. pp. 726–736. doi: 10.20471/acc.2019.58.04.20

Сведения об авторах

Собхи А.А. Аль-Сухайми д.б.н., профессор, кафедра технология продукции и организация общественного питания, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 454080, Уральский федеральный округ, Челябинская область, г. Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76, elsohaimys@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1657-5162

Зилолахон А. Тошева д.т.н., профессор, кафедра технология продукции и организация общественного питания , Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 454080, Уральский федеральный округ, Челябинская область, г. Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76, toshevaza@susu.ru
https://orcid.org/0000-0001-8517-2888

Валерия А. Воробьева студент, кафедра технология продукции и организация общественного питания, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 454080, Уральский федеральный округ, Челябинская область, г. Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76, valeriavorbeva@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-4854-1788

Лада Д. Коломиец студент, кафедра технология продукции и организация общественного питания, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 454080, Уральский федеральный округ, Челябинская область, г. Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76, kolomiets.lada22@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5760-6159

София П. Горшенина студент, кафедра технология продукции и организация общественного питания, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 454080, Уральский федеральный округ, Челябинская область, г. Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76, gorshenina.sofia@mail.ru
https://orcid.org/0009-0007-0676-2355

Анастасия А. Лямина студент, кафедра технология продукции и организация общественного питания, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 454080, Уральский федеральный округ, Челябинская область, г. Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76, nlyamina2002@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-6877-1526

Information about authors

Sobhy A.A. El-Suhaimy Dr. Sci. (Bio..), professor, product technology and catering organization department, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Ural Federal District, Chelyabinsk Region, elsohaimys@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1657-5162

Zilolakhon A. Tosheva Dr. Sci. (Tech.), professor, product technology and catering organization department, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Ural Federal District, Chelyabinsk Region, toshevaza@susu.ru
https://orcid.org/0000-0001-8517-2888

Valeria A. Vorobieva student, product technology and catering organization department , South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Ural Federal District, Chelyabinsk Region, valeriavorbeva@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-4854-1788

Lada D. Kolomiets student, product technology and catering organization department , South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Ural Federal District, Chelyabinsk Region, kolomiets.lada22@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5760-6159

Sofya P. Gorshenina student, product technology and catering organization department, South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Ural Federal District, Chelyabinsk Region, gorshenina.sofia@mail.ru
https://orcid.org/0009-0007-0676-2355

Anastasia A. Lyamina student, product technology and catering organization department, Ural State University (National Research University), 76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Ural Federal District, Chelyabinsk Region, nlyamina2002@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-6877-1526

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 11/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025

Received 11/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-87-95 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.3 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка и определение показателей качества и безопасности сливочно-растительного спреда в сублимированной форме для специализированного питания

Ирина А. Ивкова [1] ia.ivkova@omgau.org 0000-0002-8233-2177
Сергей А. Коновалов [1] sa.konovalov@omgau.org 0000-0003-3537-8081
Анастасия А. Екимова [1] aa.ekimova20z35@omgau.org 0009-0000-2650-6390
Анна А. Дерканосова [2] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Владимир В. Пойманов [2] v-poymanov@yandex.ru 0000-0001-7274-3557
Константин К. Полянский [2,3] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466

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, ул. Карла Маркса, 67А, г. Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. Технология обычных спредов довольно хорошо апробирована благодаря работам ВНИИ Жиров (Санкт-Петербург), ВНИИС (Вышемирский Ф.А. с учениками.), ВНИМИ (Москва), ВГУИТ (г. Воронеж) и др. Результаты исследований довольно успешно внедрены в промышленность (Землянский молочный завод воронежской обл.), г. Санкт-Петербург, Москва и другие. Что касается сублимированного спреда, то пока не отработаны оптимальные режимы, требующие уточнения. Импортозамещение, а России – это процесс замены иностранных товаров отечественными, то есть произведенными внутри страны. Этот процесс направлен на уменьшение зависимости от импорта и стимулирование развития собственной промышленности и производства. Создание продукта на молочной основе (сухого сливочно-растительного спреда) с повышенной пищевой ценностью и улучшенными характеристиками качества осуществляется в Омском ГАУ совместно с ФГБУНУ «Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины» (ФИЦ ФТМ) г. Новосибирска в рамках гранта РНФ (№ 23-26-10019 «Новые биотехнологии получения специализированной молочной продукции повышенной пищевой ценности и хранимоспособности для отдалённых районов Омской области и регионов с ограниченными ресурсами натурального молочного сырья») на период 2023-2024 гг. На сегодняшний день чрезмерно актуальны разработки научных принципов, приемов и методов создания технологий сухих молочных консервов повышенной хранимоспособности и пищевой ценности для общего и специализированного питания отдаленных районов РФ с ограниченными ресурсами молока, в том числе Арктик. В соответствии с задачами научного проекта были проведены исследования, научная концепция которая заключалась в направленном формировании показателей качества сливочно-растительного спреда, повышенной пищевой ценности и хранимоспособности, путем разработки инновационных технологий с заменой части животного жира на жиры растительного происхождения, богатые ненасыщенными жирными кислотами, а также антиокислительных комплексов для стабилизации продукта в процессе длительного хранения с целью пролонгирования их сроков годности. Объектом исследования являлся сухой сливочно-растительный спред. Проведены исследования по определению показателей качества и безопасности сухого сливочно-растительного спреда в сублимированной форме. Выработанный продукт отвечает заданным требованиям и относится к категории органических продуктов, вырабатываемых из экологически чистого сырья, имеет высокую пищевую ценность, устойчивость при длительном хранении, хорошую транспортабельность и высокие качественные показатели.

Ключевые слова: сублимационная сушка, растительные жиры, антиокислители, сухой сливочно-растительный спред, показатели качества, показатели безопасности.

Development and determination of quality and safety indicators of a creamy vegetable spread in freeze-dried form for specialized nutrition

Irina A. Ivkova [1] ia.ivkova@omgau.org 0000-0002-8233-2177
Sergey A. Konovalov [1] sa.konovalov@omgau.org 0000-0003-3537-8081
Anastasia A. Ekimova [1] aa.ekimova20z35@omgau.org 0009-0000-2650-6390
Anna A. Derkanosova [2] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Vladimir V. Poymanov [2] v-poymanov@yandex.ru 0000-0001-7274-3557
Konstantin K. Polyansky [2,3] mto.vrn@mail.ru 0000-0002-8817-1466

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, Karl Marx. 67A. Voronezh, 394030, Russia

Для цитирования
Ивкова И.А., Коновалов С.А., Екимова А.А., Дерканосова А.А., Пойманов В.В., Полянский К.К. Разработка и определение показателей качества и безопасности сливочно-растительного спреда в сублимированной форме для специализированного питания // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 87–95. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-87-95

For citation
Ivkova I.A., Konovalov S.A., Ekimova A.A., Derkanosova A.A., Poymanov V.V., Polyansky K.K. Development and determination of quality and safety indicators of a creamy vegetable spread in freeze-dried form for specialized nutrition. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 87–95. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-87-95

© 2025, Ивкова И.А. и др. / Ivkova I.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. The technology of conventional spreads is quite well tested due to the works: Research Institute of Fats (St. Petersburg), VNIIS (Vyshemirsky F.A. with students.), VNIMI (Moscow), VGUIT (Voronezh), etc., the practical part is quite successfully carried out in the industry (Zemlyansky dairy plant of the Voronezh region), St. Petersburg, Moscow and others. As for the sublimated spread, it is not yet worked out and requires great efforts. Import substitution in Russia is the process of replacing foreign goods with domestic ones, that is, those produced within the country. This process is aimed at reducing dependence on imports and stimulating the development of domestic industry and production. The creation of a milk-based product (dry creamy-vegetable spread) with increased nutritional value and improved quality characteristics is carried out at the Omsk State Agrarian University together with the Federal Research Center for Basic and Translational Medicine (FRC FTM) in Novosibirsk within the framework of a grant from the Russian Science Foundation (No. 23 -26-10019 "New biotechnologies for producing specialized dairy products with increased nutritional value and storage capacity for remote areas of the Omsk region and regions with limited resources of natural dairy raw materials") for the period 2023-2024. Today, the development of scientific principles, techniques and methods for creating technologies for canned dry milk with increased storage capacity and nutritional value for general and specialized nutrition in remote areas of the Russian Federation with limited milk resources, including the Arctic, is extremely relevant. In accordance with the objectives of the scientific project, research was carried out, the scientific concept of which consisted in the targeted formation of quality indicators of a creamy-vegetable spread, increased nutritional value and storage capacity, through the development of innovative technologies with the replacement of part of animal fat with fats of vegetable origin, rich in unsaturated fatty acids, and as well as antioxidant complexes to stabilize the product during long-term storage in order to prolong their shelf life. The objects of the study were a dry creamy vegetable spread. Research has been conducted to determine the quality and safety indicators of dry creamy vegetable spread in freeze-dried form. The produced product meets the specified requirements and belongs to the category of organic products produced from environmentally friendly raw materials, having high nutritional value, long-term storage stability, good transportability and high organoleptic, quality and safety results.

Keywords: freeze drying, vegetable fats, antioxidants, dry creamy vegetable spread, quality indicators, safety indicators..

Введение

В современных условиях, где увеличивается психический и физический стресс, здоровое питание превращается в глобальную тенденцию, зависимую от общественных и экологических факторов. Больше 65% людей планеты сосредоточены на своем здоровом образе и питании [1, 6]. Главной спецификой сбалансированного питания, типичного для всех стран мира, взаимосвязанной с избыточным употреблением высококалорийных питательных веществ и постоянным недостатком важных физиологических функциональных компонентов [3].

Производство функциональных продуктов здорового питания, в том числе молочных, совершенствование традиционных продуктов общего питания - основные направления при переработке сырья для получения продуктов здорового питания.

Чтобы удовлетворить потребности в питательных веществах, в рационе людей должно содержаться более 20 000 т. компонентов всех типов, в том числе растительного и животного происхождения [2,20].

Значения употребления молока и молочных продуктов в питании трудно переоценить. Трудности, связанные с их производством и потреблением, всегда остаются актуальными. Одной из важнейших задач является создание молочной продукции с заменого молочного жира на растительный жир с длительным сроком хранения, и улучшенными показателями качества, разработка инновационных технологий [9], использование современного оборудования и улучшение культуры производства. Новые технологии в пищевой промышленности способствуют повышению качества, безопасности и конкурентоспособности данной продукции [1].

На фоне недостатка и больших цен на натуральное молочное сырье идет расширение на производство консервов на молочной основе, где частично заменяется молочный жир на жиры растительного происхождения, что гарантирует получение молочных продуктов с высокой пищевой ценностью.

Внесение растительного жира меняет состав жировой основы продукта в требуемом направлении и создает продукт с функциональными свойствами для специального назначения. В связи с чем определена цель исследования – разработка и исследование показателей качества и безопасности сухого сливочно-растительного спреда в сублимированной форме.

Материалы и методы

Объект исследования: сухой сливочно-растительный спред в сублимированной форме. Исследования готового продукта проводили на кафедре Ветеринарно-санитарной экспертизы продуктов животноводства и гигиены сельскохозяйственных животных ФГБОУ ВО «Омский ГАУ» и в аккредитованном центре Бюджетное учреждение Омской области «Омская областная ветеринарная лаборатория» по показателям, регламентированным стандартами и характеризующим состав его основных частей. При работе использовалась стандартные и общепринятые методы исследований. Для обработки полученных данных использовали статистические методы анализа.

Результаты

Для обеспечения стабильности продукта в течение длительного хранения мы провели исследования для определения оптимального вида и количества антиоксидантов, таких как флавоноиды и аминокислоты, для использования в рецептуре нового продукта.

Были изучены биофлавоноиды, включая кверцетин, дигидрокверцитин, а также различные аминокислоты, такие как цистин, цистеин, метионин, триптофан и другие, в качестве ингибиторов окислительных процессов [4].

Изучались концентрации аминокислот на уровне 0,2–0,3% от массы продукта. Использовалась аскорбиновая кислота и витамин «С».

Информация об антиоксидантных свойствах, изученных для трех различных концентраций аминокислот после выдержки в термостате в течение 48 ч при температуре 102 °С, приведена в таблице 1.

Таблица 1.

Антиокислительный эффект аминокислот

Table 1.

Antioxidant effect of amino acids

№ испытания | Test number	Наименование аминокислоты | Amino acid	Антиокислительный эффект, ед. АОА | Antioxidant effect, units of antioxidant activity		
1	Лизин | Lysine	дозировка, % | dosage, %		
2	Метионин | Methionine	0,1	0,2	0,3
3	Триптофан | Tryptophan	2,19±0,12	2,28±0,12	2,33±0,11
4	Цистеин | Cysteine	4,42±0,15	4,57±0,19	4,60±0,21

Таким образом, можно сделать вывод, что антиокислители, добавленные в молочный жир, оказывают ингибирующее воздействие на процессы окисления жира. Среди них наиболее эффективным является цистеин - серосодержащая аминокислота [9,16]. При добавлении данной аминокислоты устойчивость молочного жира увеличивается более чем в 5 раз, в то время как при добавлении лизина - всего в 2 раза. Показатели окисленности в образцах с добавлением аминокислоты в дозировке 0,3% незначительно отличались от показателей с массовой долей аминокислоты, равной 0,2% от массы жира [7,18,19]. Поэтому для стабилизации продукта при хранении рекомендуется использовать оптимальную концентрацию аминокислоты, равную 0,2% от веса жира.

Рисунок 1А и рисунок 1Б показывают эффективность антиокислительных комплексов биофлавоноида ДКВ с витамином «С» в зависимости от дозировки их внесения. Динамика показателей окисленности показана на рисунках.

Оптимальной дозировкой для стабилизации продукта в хранении выбран образец, содержащий 0,02% ДКВ в композиции с 0,02% витамина С.

Обсуждение

На основании проведенных исследований были разработаны рецептуры сухого сливочно-растительного спреда для различных массовых долей молочного жира в применяемых в качестве сырья молочных сливках (жирностью 25,30 и 40%) [5,17], а также различного количества растительной добавки “Эколакт” (от 30 до 50 %). Данные представлены в таблицы 2.

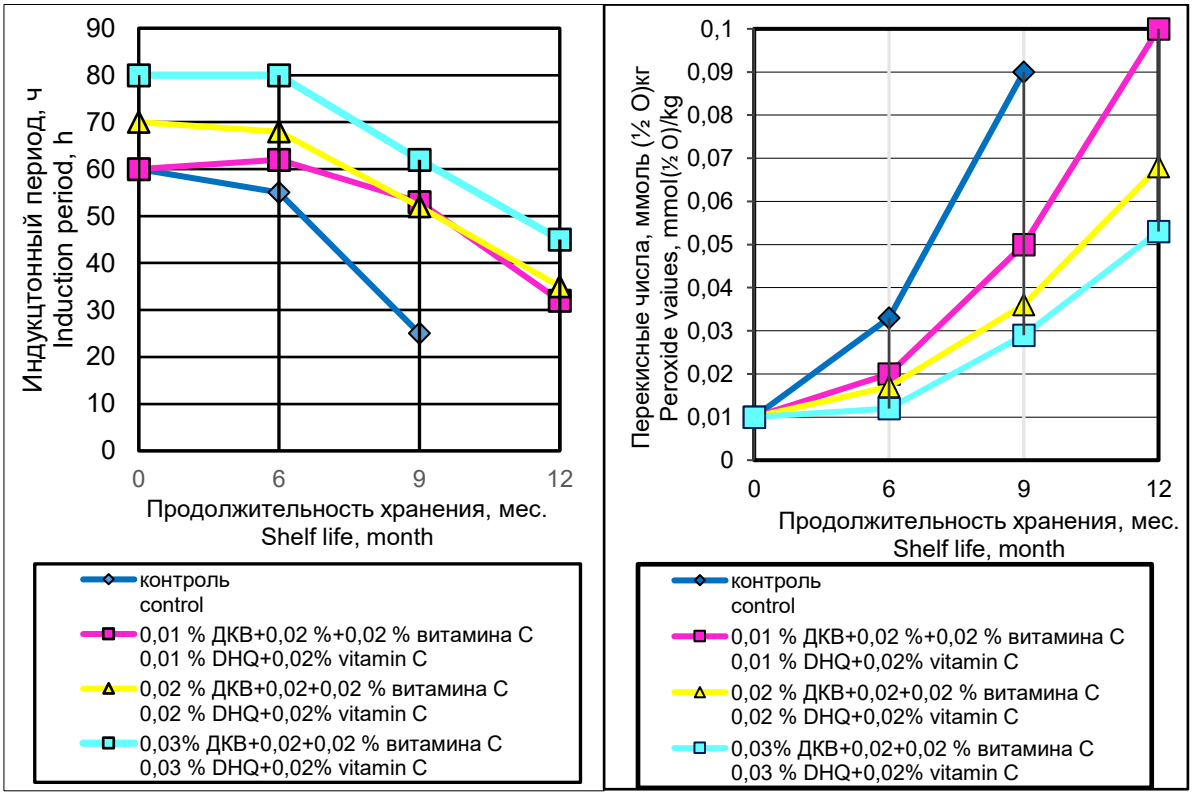


Таблица 2.

Рецептуры сухого высокожирного молокосодержащего продукта

Table 2.

Formulations for dry high-fat milk-containing product

Наименование компонентов Name of components	Расчет рецептуры от 100% | Formulation calculation from 100%		
Сливки с массовой долей жира 25% | Cream with a fat content of 25%	Рецептура 1 | Formulation 1	Рецептура 2 | Formulation 2	Рецептура 3 | Formulation 3
Сливки с массовой долей жира 30% |Cream with a fat content of 30%	69,913	-	-
Сливки с массовой долей жира 40% | Cream with a fat content of 40%	-	59,903	-
Заменитель молочного жира “Эколакт” | Milk fat substitute "Ekolakt"	-	-	49,893
Спиртовой раствор дигидрокверцетина | Alcohol solution of dihydroquercetin	30	40	50
Витамин С | Vitamin C	0,01	0,02	0,03
Культура бактериальная пробиотическая AiBi серии B 6.10 mix | Probiotic bacterial culture AiBi series B 6.10 mix	0,075	0,075	0,075

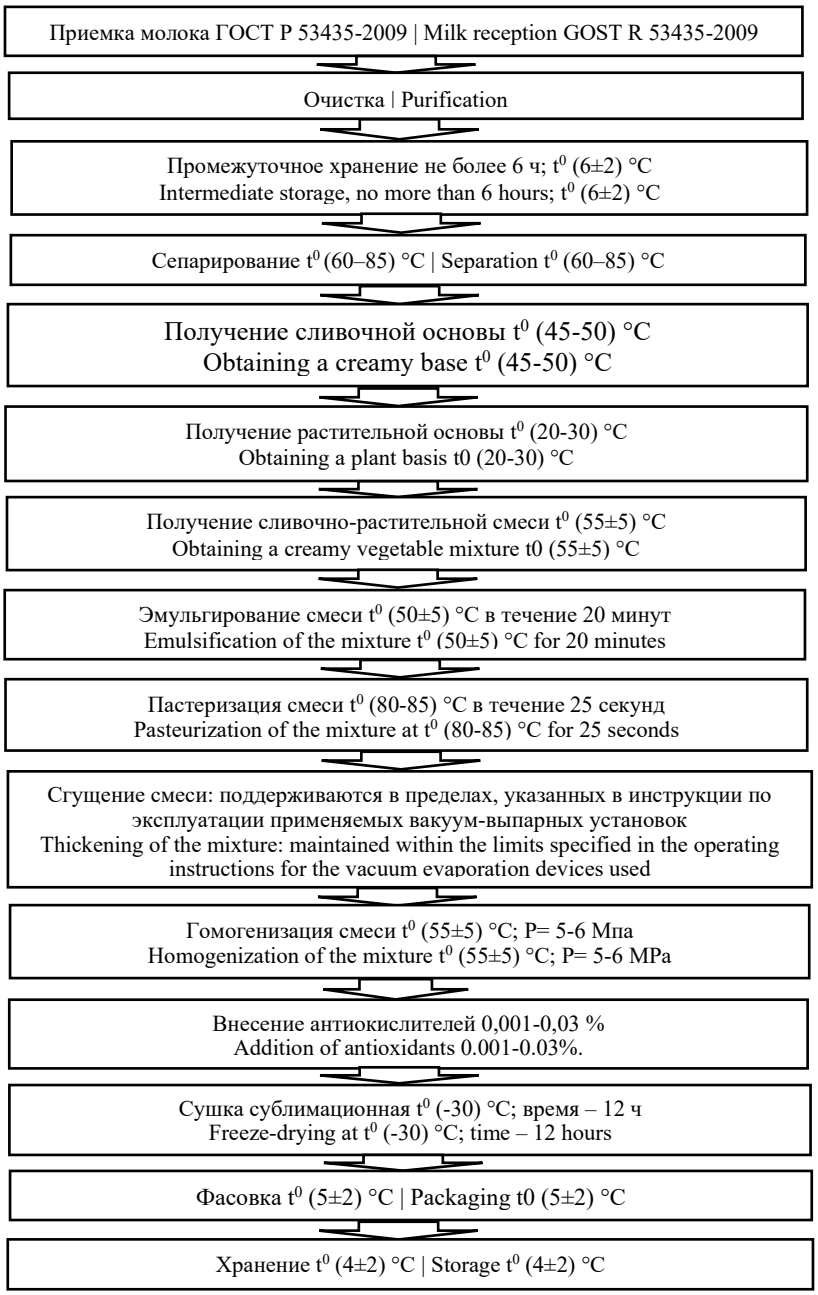


Рисунок 1. Технологическая схема 1 процесса производства сухого сливочно-растительного спреда.
Flowchart 1 of the process of production of dry creamy-vegetable spread.

На основе анализа, проведенного в ходе исследований, была составлена схема технологического процесса получения сублимированного продукта, который имеет высокую пищевую ценность и может быть использован в качестве специализированного продукта. На технологической схеме 1 представлена последовательность технологических операций, которые необходимы для изготовления сухого сливочно-растительного спреда в сублимационной форме [8,10].

Для сушки сливочно-растительной смеси был использован прогрессивный метод сублимации, как наиболее щадящий и сохраняющий все нативные первоначальные свойства молока-сырья (витамины, ферменты и т.п.). Именно продукт в сублимированной форме имеет способность легко и быстро восстанавливаться и приобретать требуемую консистенцию при восстановлении [6,14,21]. Связи с этим выработка сублимированного сливочно-растительного спреда производилась на сушилке LP30(SXX) [11].

В готовом продукте было проведено определение жирнокислотного состава методом газовой хроматографии; результаты представлены в таблице 3 [12,16]. Использовали газовый хроматограф, колонка SP-2560 100 m×0,25 mm× ×0,2 um [4,8,14]. В процессе исследования и точного определения использовался метод процентной нормализации по площади.

Также были рассчитаны соотношения метиловых эфиров жирных кислот (табл. 4).

Таблица 3.

Жирнокислотный состав сухого сливочно-растительного спреда

Table 3.

Fatty acid composition of dry creamy vegetable spread

№ п\п | Nos	Наименование показателя | Name of the indicator	Количество, % |Quantity, %
1	Арахиновая кислота | Arachidic acid	0,2
2	Бегеновая кислота | Behenic acid	менее 0,1 | less than 0,1
3	Деценовая кислота | Decene acid	0,3
4	Каприловая кислота | Caprylic acid	1,2 ± 0,4
5	Каприновая кислота | Capric acid	2,9 ± 0,4
6	Капроновая кислота | Caproic acid	1,9 ± 0,4
7	Лауриновая кислота | Lauric acid	3,2 ± 0,4
8	Линолевая кислота | Linoleic acid	3,3 ± 0,4
9	Линоленовая кислота | Linolenic acid	0,4
10	Масляная кислота | Butyric acid	2,6 ± 0,4
11	Миристиновая кислота | Myristic acid	10,8 ± 2,2
12	Миристолеиновая кислота | Myristoleic acid	0,9 ± 0,4
13	Олеиновая кислота | Oleic acid	25,8 ± 2,2
14	Пальмитиновая кислота | Palmitic acid	29,9 ± 2,2
15	Пальмитолеиновая кислота | Palmitoleic acid	1,7 ± 0,4
16	Стеариновая кислота | Stearic acid	11,0 ± 2,2
17	Прочие кислоты | Other acids	3,9 ± 0,4

Таблица 4.

Соотношение жирных кислот в сухом сливочно-растительного спреде

Table 4.

Fatty acid composition of dry creamy vegetable spread

№ п\п | Nos	Наименование показателя | Name of the indicator	Количество, % Quantity, %
1	Соотношение метиловых эфиров жирных кислот молочного жира стеариновой к лауриновой | The ratio of methyl esters of fatty acids of milk fat stearic to lauric	3,4 ± 0,4
2	Соотношение массовых долей суммы олеиновой и линолевой к сумме лауриновой, миристиновой, пальмитиновой и стеариновой | The ratio of the mass fractions of the sum of oleic and linoleic to the sum of lauric, myristic, palmitic and stearic	0,5
3	Соотношение метиловых эфиров жирных кислот молочного жира линолевой к миристиновой | The ratio of methyl esters of fatty acids of milk fat linoleic to myristic	0,3
4	Соотношение метиловых эфиров жирных кислот молочного жира олеиновой к миристиновой | The ratio of methyl esters of fatty acids of milk fat oleic to myristic	2,4 ± 0,4
5	Соотношение метиловых эфиров жирных кислот молочного жира пальмитиновой к лауриновой | The ratio of methyl esters of fatty acids of milk fat palmitic to lauric	9,3 ± 2,2

В лабораторных условиях аккредитованного исследовательского центра проведены также исследования на содержание бактерий, вирусов, токсинов и др., представляющих потенциальную опасность для человека.

В рамках испытаний показателей безопасности продукта были исследованы следующие показатели, представленные в таблице 5.

Таблица 5.

Результаты испытаний показателей безопасности сухого сливочно-растительного спреда

Table 5.

Test results of safety indicators of dry creamy vegetable spread

№ п/п| Nos	Наименование показателя | Name of the indicator	Ед. изм.| UoM.	Результат испытаний| Test result
Антибиотики (амфениколы) | Antibiotics (amphenicols)			
1	Левомицетин(Хлорамфеникол) | Levomycetin (Chloramphenicol)	мг/кг | mg/kg	менее 0,000012| less than 0,000012
Токсичные элементы | Toxic elements			
2	Кадмий | Cadmium	мг/кг | mg/kg	менее 0,0015 | less than 0,0015
3	Мышьяк | Arsenic	мг/кг | mg/kg	менее 0,04 | less than 0,04
4	Ртуть | Mercury	мг/кг | mg/kg	менее 0,004 | less than 0,004
5	Свинец | Lead	мг/кг | mg/kg	менее 0,01 | less than 0,01
Микотоксины | Mycotoxins			
6	Афлатоксин М1| Aflatoxin M1	мг/кг| mg/kg	менее 0,0005 | less than 0,01
Пестициды | Pesticides			
7	ГХЦГ (α, β, γ-изомеры) | HCH (α, β, γ-isomers) |	мг/кг | mg/kg	менее 0,005 | less than 0,005
8	ДДТ и его метаболиты| DDT and its metabolites	мг/кг | mg/kg	менее 0,005 | less than 0,005
Микробиологические показатели | Microbiological indicators			
9	S. aureus | S. aureus	г | g	не обнаружено в 0,1| not found in 0,1
10	БГКП (колиформы) | coliform bacteria	г| g	не обнаружено в 0,01 | not found in 0,01
11	Дрожжи и плесени (сумма) | Yeast and mold (sum)	КОЕ/см^3| CFU/cm^3	менее 1,0x10^{-1}| less than 1,0x10-1
12	КМАФАнМ | Number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms	КОЕ/г| CFU/g	3,6x10^{-1}| 3,6x10^{-1}
13	Патогенные микроорганизмы, в т.ч. сальмонеллы| Pathogenic microorganisms, including salmonella	г | g	не обнаружено в 25 | not found in 25

Исходя из данных таблицы 5 видно, что количество антибиотика левомицетина в продукте составляет менее 0,000012 мг/кг. Данное значение показателя является допустимым (должно быть менее 0,0003 мг/кг) [5,10,12].

Наряду с антибиотиками исследовали содержание таких опасных веществ как микотоксины и пестициды. При исследовании сухого спреда количества данных веществ не превышают допустимой концентрации [6,10].

Содержание токсичных элементов (кадмий = менее 0,0015 мг/кг; мышьяк = менее 0,04 мг/кг; ртуть = менее 0,004 мг/кг; свинец = менее 0,01 мг/кг) в сухом высокожирном молокосодержащем продукте, согласно исследованию, не превышает нормы [10,12].

Микробиологическая безопасность сухих молочных продуктов – важный аспект, означающий отсутствие опасных для здоровья микроорганизмов в готовой продукции. Определяли следующие микробиологические показатели: S. aureus, БГКП (колиформы), Дрожжи и плесени (сумма), КМАФАнМ, патогенные микроорганизмы, в т.ч. сальмонеллы.

Показатель КМАФАнМ предоставляет информацию о возможном загрязнении продукта микроорганизмами, вызывающими пищевые отравления и порчу продуктов. КМАФАнМ в исследуемом сухом молочном продукте 3,6 х 10^{-1} КОЕ/г. Дрожжей и плесеней - 3,6x10^{-1} КОЕ/г [5,10,12].

S. aureus не обнаружено в 0,1 г продукта. Бактерий группы кишечной палочки (БГКП) не обнаружено в 0,01 г продукта. Патогенных микроорганизмов не обнаружено в 25 г сухого молочного продукта [6,110,12].

Органолептические показатели сухого сливочно-растительного спреда в сублимированной форме представлены в таблице 6:

Таблица 6.

Органолептические показатели сухого сливочно-растительного спреда

Table 6.

Organoleptic properties of dry creamy vegetable spread

Консистенция | Consistency	Вкус | Taste
Сухой порошок с наличием комочков, рассыпающихся при незначительном усилии | Dry powder with lumps that crumble under slight force |	Чистый, слегка сладковатый, свойственный высокожирному молокосодержащему продукту, без посторонних вкусов и запахов | Clean, slightly sweet, typical of a high-fat milk-containing product, without foreign tastes or odors

Восстановление продукта осуществляется водой с t = 60 ± 5 ^{0}C в течение 10-15 мин.

При восстановлении продукт приобретает способность к намазыванию и использованию в восстановленном виде для целей общего и специализированного питания.

Заключение

1. Разработана технология производства сливочно-растительного спреда в сублимированной форме с увеличенной пищевой ценностью и длительным сроком годности для специализированного назначения.

2. Определены типы и количества натуральных антиоксидантов для обеспечения стабильности продукта в течение длительного хранения: биофлавоноид дигидрокверцетин и аминокислота цистеин.

3. Разработаны антиокислительные комплексы для продления сроков годности, включающие в себя следующие компоненты: дигидрокверцетин (0,02%) + витамин С (0,02%), цистеин (0,2%) + витамин С (0,02%) к содержанию жира в продукте.

4. Для увеличения пищевой ценности и продления срока годности продукции проведена замена части нестабильного молочного жира животного происхождения на растительные заменители, содержащие значительное количество ненасыщенных жирных кислот в соотношении 50:50. Был использован ЗМЖ «Эколакт», произведенный из натурального растительного сырья компанией «ООО» Эфко-Ингредиент.

5. Для увеличения пищевой ценности продукта добавляли консорциум бифидобактерий: AiBi серии B 6.10 mix.

6. С цель сохранения пищевой и витаминной ценности продукта, его сушку следует осуществлять методом сублимации.

Разработанный продукт рекомендуется для регионов с ограниченными ресурсами натурального молочного сырья, решения проблем питания Арктической зоны РФ, людей, находящихся в автономных и экстремальных условиях существования.

Литература

1 Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 29 июня 2016 г. № 1364-р. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201607040001 (дата обращения: 30.06.2023).

2 Волков А.В., Григорьева И.Ф. Мировой тренд на развитие производства продукции на растительной основе как инструмент достижения Целей устойчивого развития ООН // Управление и политика. 2023. Т. 2. № 2. С. 8–26. doi: 10.24833/2782-7062-2023-2-2-8-26

3 Данкверт А., Джапаридзе Т. Уровень потребления молока — здоровье нации // Молочное и мясное скотоводство. 2010. № 2. С. 2–5.

4 Panchal B., Bhandari B. Butter and dairy fat spreads // Dairy Fat Products and Functionality: Fundamental Science and Technology / Ed. by T. Truong, B. Bhandari, N. Prakash. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 509–532. doi: 10.1007/978-3-030-41661-4_21

5 Ивкова И.А., Гелеверя О.Д., Быченко А.А. Совершенствование ветеринарно-санитарного контроля качества молока и молочной продукции для детского питания // Современные тенденции развития ветеринарной науки и практики: сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции (Омск, 2022 г.). Омск, 2022. С. 156–159.

6 Ивкова И.А., Надточий А.Ю., Екимова А.А. Способ получения растительно-жировой эмульсии при производстве молокосодержащей продукции // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2025. № 1 (57). С. 110–114.

7 Моргунова Е.М., Кондратенко С.А. Методологические подходы и принципы повышения качества и конкурентоспособности пищевых продуктов // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2023. Т. 16. № 2. С. 19–30.

8 Berdikulov M.A., Kenzhebayeva S.S., Omarova A.T. et al. Determination of the residual content of veterinary drugs in raw materials of animal origin by enzyme immunoassay method // Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University. Veterinary sciences. 2024. № 3 (007). С. 37–44. doi: 10.51452/kazatuvc.2024.3(007).1727

9 Молочная промышленность в России переходит на выпуск дешевых продуктов // Dairy news. 2025. URL: https://dairynews.today/news/molochnaya-promyshlennost-v-rossii-perekhodit-na-v.html (дата обращения: 30.09.2025).

10 Овсянников Ю.А. Основные направления улучшения питания населения России // Агропромышленный вестник Урала. 2017. № 6 (156). С. 77–81.

11 Семенов Г.В., Ермаков С.А., Краснова И.С. Вакуумная сублимационная сушка пищевых продуктов: температурные границы для рационального использования в промышленном производстве // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2022. № 2-3 (386-387). С. 51–57.

12 Санитарно-бактериологические исследования методом разделенного импеданса: методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 76 с.

13 Павлова Т.А., Дунаев А.В., Топникова Е.В. и др. Спред как продукт здорового питания // Переработка молока. 2020. № 5 (247). С. 6–11.

14 Топникова Е.В. Подробнее о методах оценки натуральности сливочного масла // Сыроделие и маслоделие. 2021. № 2. С. 52–56.

15 Chen C., Chaudhary A., Mathys A. Dietary change scenarios and implications for environmental, nutrition, human health and economic dimensions of food sustainability // Nutrients. 2019. V. 11. № 4. P. 856.

16 Onyeaka H., Jalata D.D., Mekonnen S.A. Mitigating physical hazards in food processing: Risk assessment and preventive strategies // Food Science & Nutrition. 2023. V. 11. № 12. P. 7515–7522.

17 Shchegolkov N.F., Ivanov S.V., Petrov A.A. et al. The quality and safety of cottage cheese depending on the milk of cows of different breeds and the use of rennet // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 1. С. 45–52.

18 Najmitdinova G.K. Scientific study of the chemical composition of dairy products // Open Access Repository. 2023. V. 4. № 02. P. 11–18.

19 Gavrilova N., Chernjpolskaya N., Rebezov M. et al. Advanced biotechnology of specialized fermented milk product // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. V. 8. № 2. P. 2718–2722.

20 Elagizi A., Lavie C.J., O'keefe E. et al. An update on omega-3 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular health // Nutrients. 2021. V. 13. № 1. P. 204. doi: 10.3390/nu13010204

21 Poymanov V.V., Nazarov S.A., Toroptsev V.V. et al. Study of freeze-drying process of bacterial concentrates in the apparatus using thermoelectric modules // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 640. P. 072027. doi: 10.1088/1755-1315/640/7/072027

References

1 Strategy for improving the quality of food products in the Russian Federation until 2030 (approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated June 29, 2016 No. 1364-r). Available at: https://docs.cntd.ru/document/420363999 (accessed June 30, 2023). (in Russian)

2 Volkov A.V., Grigoryeva I.F. World trend in the development of plant-based products as a tool for achieving the UN Sustainable Development Goals. Management and Policy. 2023. vol. 2. no. 2. pp. 8–26. doi: 10.24833/2782-7062-2023-2-2-8-26 (in Russian)

3 Dankvert A., Japaridze T. The level of milk consumption is the health of the nation. Dairy and Beef Cattle Farming. 2010. no. 2. pp. 2–5. (in Russian)

4 Panchal B., Bhandari B. Butter and dairy fat spreads. Dairy Fat Products and Functionality: Fundamental Science and Technology. Ed. by T. Truong, B. Bhandari, N. Prakash. Cham: Springer International Publishing, 2020. pp. 509–532. doi: 10.1007/978-3-030-41661-4_21

5 Ivkova I.A., Geleverya O.D., Bychenko A.A. Improvement of veterinary and sanitary quality control of milk and dairy products for baby food. Modern trends in the development of veterinary science and practice: collection of materials of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference (Omsk, 2022). Omsk, 2022. pp. 156–159. (in Russian)

6 Ivkova I.A., Nadtochiy A.Yu., Ekimova A.A. Method for obtaining a vegetable-fat emulsion in the production of milk-containing products. Bulletin of Omsk State Agrarian University. 2025. no. 1 (57). pp. 110–114. (in Russian)

7 Morgunova E.M., Kondratenko S.A. Methodological approaches and principles for improving the quality and competitiveness of food products. Food Industry: Science and Technology. 2023. vol. 16. no. 2. pp. 19–30. (in Russian)

8 Berdikulov M.A., Kenzhebayeva S.S., Omarova A.T. et al. Determination of the residual content of veterinary drugs in raw materials of animal origin by enzyme immunoassay method. Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University. Veterinary sciences. 2024. no. 3 (007). pp. 37–44. doi: 10.51452/kazatuvc.2024.3(007).1727

9 Dairy industry in Russia is switching to the production of cheap products. Dairy News. 2025. Available at: https://dairynews.today/news/molochnaya-promyshlennost-v-rossii-perekhodit-na-v.html (accessed September 30, 2025). (in Russian)

10 Ovsyannikov Yu.A. Main directions for improving the nutrition of the Russian population. Agro-industrial Bulletin of the Urals. 2017. no. 6 (156). pp. 77–81. (in Russian)

11 Semenov G.V., Ermakov S.A., Krasnova I.S. Vacuum freeze-drying of food products: temperature limits for rational use in industrial production. Proceedings of Universities. Food Technology. 2022. no. 2-3 (386-387). pp. 51–57. (in Russian)

12 Sanitary and bacteriological studies by the method of divided impedance: methodological guidelines. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2010. 76 p. (in Russian)

13 Pavlova T.A., Dunayev A.V., Topnikova E.V. et al. Spread as a healthy food product. Milk Processing. 2020. no. 5 (247). pp. 6–11. (in Russian)

14 Topnikova E.V. More about methods for assessing the naturalness of butter. Cheese Making and Butter Making. 2021. no. 2. pp. 52–56. (in Russian)

15 Chen C., Chaudhary A., Mathys A. Dietary change scenarios and implications for environmental, nutrition, human health and economic dimensions of food sustainability. Nutrients. 2019. vol. 11. no. 4. p. 856. doi: 10.3390/nu11040856

16 Onyeaka H., Jalata D.D., Mekonnen S.A. Mitigating physical hazards in food processing: Risk assessment and preventive strategies. Food Science & Nutrition. 2023. vol. 11. no. 12. pp. 7515–7522. doi: 10.1002/fsn3.3773

17 Shchegolkov N.F., Ivanov S.V., Petrov A.A. et al. The quality and safety of cottage cheese depending on the milk of cows of different breeds and the use of rennet. Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products. 2022. no. 1. pp. 45–52. (in Russian)

18 Najmitdinova G.K. Scientific study of the chemical composition of dairy products. Open Access Repository. 2023. vol. 4. no. 02. pp. 11–18.

19 Gavrilova N., Chernjpolskaya N., Rebezov M. et al. Advanced biotechnology of specialized fermented milk product. International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. vol. 8. no. 2. pp. 2718–2722. doi: 10.35940/ijrte.B1122.0982S219

20 Elagizi A., Lavie C.J., O'keefe E. et al. An update on omega-3 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular health. Nutrients. 2021. vol. 13. no. 1. p. 204. doi: 10.3390/nu13010204

21 Poymanov V.V., Nazarov S.A., Toroptsev V.V. et al. Study of freeze-drying process of bacterial concentrates in the apparatus using thermoelectric modules. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 640. p. 072027. doi: 10.1088/1755-1315/640/7/072027

Сведения об авторах

Ирина А. Ивкова д.т.н., профессор, кафедра ветеринарно-санитарной экспертизы продуктов животноводства и гигиены сельскохозяйственных животных, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, пр-т ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия, ia.ivkova@omgau.org
https://orcid.org/0000-0002-8233-2177

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

Анастасия А. Екимова аспирант, кафедра ветеринарно-санитарной экспертизы продуктов животноводства и гигиены сельскохозяйственных животных, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия, aa.ekimova20z35@omgau.org
https://orcid.org/0009-0000-2650-6390

Анна А. Дерканосова д.т.н., профессор, кафедра 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

Владимир В. Пойманов к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, v-poymanov@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7274-3557

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

Information about authors

Irina A. Ivkova Dr. Sci. (Engin), proffessor, Department of veterinary and sanitary examination of livestock products and hygiene of farm, Omsk State Agrarian University named after. P.A. Stolypin, R Institutskaya square, 1, Omsk, 644008, ia.ivkova@omgau.org
https://orcid.org/0000-0002-8233-2177

Sergey A. Konovalov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, 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

Anastasia A. Ekimova postgraduate student, Department of veterinary and sanitary examination of livestock products and hygiene of farm, Omsk State Agrarian University named after. P.A. Stolypin, Institutskaya square, 1, Omsk, 644008, Russia, aa.ekimova20z35@omgau.org
https://orcid.org/0009-0000-2650-6390

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

Vladimir V. Poymanov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of food production machines and apparatuses, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, Russia, v-poymanov@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0001-7274-3557

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, st., 67A, Voronezh, Russia, mto.vrn@mail.ru
https://orcid.org/ 0000-0002-8817-1466

Вклад авторов

Ирина А. Ивкова предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания
Сергей А. Коновалов консультация в ходе исследования
Анастасия А. Екимова обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Анна А. Дерканосова консультация в ходе исследования
Владимир В. Пойманов консультация в ходе исследования
Константин К. Полянский консультация в ходе исследования

Contribution

Irina A. Ivkova proposed a scheme of the experiment and organized production trials
Sergey A. Konovalov consultation during the study
Anastasia A. Ekimova review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Anna A. Derkanosova consultation during the study
Vladimir V. Poymanov consultation during the study
Konstantin K. Polyansky consultation during the study

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2025	**После редакции** 18/04/2025	**Принята в печать** 20/09/2025
Received 01/03/2025	**Accepted in revised** 18/04/2025	**Accepted** 20/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-96-103 Оригинальная статья/Research article
УДК 633.494 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Практическое обоснование способа регенерации щелочного моющего раствора пивоваренного производства с использованием флокулянтов

Виталий Ю. Овсянников [1] ows2003@mail.ru. 0000-0001-9388-6303
Андрей И. Ключников [2] kaivanov@mail.ru 0000-0002-8161-0040
Алексей В. Прибытков [3] pribytkov_aleks@mail.ru 0000-0002-8157-3681

1 ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет)», ул. Земляной вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия
3 Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, д. 54 а, г. Воронеж, Воронежская обл., 394064, Россия

Аннотация. Статья посвящена разработке ресурсосберегающего метода регенерации щелочных моющих растворов (ЩМР) для мини-пивоварен. Основное внимание уделено флокуляционной очистке как экономичной альтернативе утилизации. Целью работы был подбор реагентов и параметров для интеграции технологии в существующие системы CIP. Экспериментально изучена эффективность катионных флокулянтов («Magnafloc 380», «Гринлайф К45») в высокощелочной среде. Установлены оптимальные условия: дозировка 3,6–4 г/кг загрязнений, энергозатраты 0,04–0,1 Вт/кг, время обработки 240–450 с. Наилучший результат показал «Гринлайф К45». Метод обеспечивает удаление 90–95% взвесей за 30 минут седиментации и снижение мутности на 95%, позволяя продлить цикл использования ЩМР в 4–6 раз. На основе полученных данных авторами предложена практичная аппаратурно-технологическая схема регенерации. Она предполагает дооснащение стандартной передвижной CIP-станции смесителем для ввода флокулянта, емкостью для отстаивания и самопромывным фильтром для окончательного отделения осадка. Регенерированный раствор возвращается в оборот с возможностью корректировки концентрации. Схема обеспечивает визуальный контроль, не требует сложного оборудования и может быть реализована на действующих производствах. Таким образом, работа доказывает технико-экономическую и экологическую целесообразность внедрения флокуляционной регенерации ЩМР на мини-пивоварнях. Ключевыми преимуществами являются прямая экономия на воде и реагентах, сокращение объема высокощелочных сточных вод и снижение нагрузки на локальные очистные сооружения..

Ключевые слова: щелочной моющий раствор, регенерация, флокулянт, мини-пивоварня, CIP-мойка, ресурсосбережение, очистка стоков.

Practical justification of the method for regenerating alkaline cleaning solution for brewing production using flocculants

Vitaly Yu. Ovsyannikov [1] ows2003@mail.ru. 0000-0001-9388-6303
Andrey I. Klyuchnikov [2] kaivanov@mail.ru 0000-0002-8161-0040
Alexey V. Pribytkov [3] pribytkov_aleks@mail.ru 0000-0002-8157-3681

1 Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky, Zemlyanoy Val St., 73, Moscow,Russia
2 Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University), Zemlyanoy Val St., 73, Moscow, 109004, Russia
3 Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Starykh Bolshevikov St., 54a, Voronezh, Voronezh Region, 394064, Russia

Abstract. The article is devoted to the development of a resource-saving method for the regeneration of alkaline cleaning solutions (ACS) for mini-breweries. The main focus is on flocculation treatment as a cost-effective alternative to disposal. The aim of the study was to select reagents and parameters for integrating the technology into existing CIP systems. The efficiency of cationic flocculants (Magnafloc 380, Greenlife K45) in a highly alkaline environment was experimentally studied. Optimum conditions were established: dosage of 3.6–4 g/kg of contaminants, energy consumption of 0.04–0.1 W/kg, processing time of 240–450 s. Greenlife K45 showed the best result. The method ensures the removal of 90–95% of suspended solids within 30 minutes of sedimentation and a 95% reduction in turbidity, allowing to extend the ACS use cycle by 4–6 times. Based on the obtained data, the authors proposed a practical hardware and technological scheme for regeneration. It involves retrofitting a standard mobile CIP station with a mixer for adding flocculant, a settling tank, and a self-cleaning filter for final sediment separation. The regenerated solution is recycled, with the ability to adjust its concentration. The system provides visual control, requires no complex equipment, and can be implemented in existing production facilities. Thus, the study demonstrates the technical, economic, and environmental feasibility of implementing flocculation-based AMR regeneration in minibreweries. Key benefits include direct savings on water and reagents, a reduction in the volume of highly alkaline wastewater, and a reduced load on local treatment facilities.

Keywords: alkaline cleaning solution, regeneration, flocculant, mini-brewery, CIP-cleaning, resource conservation, wastewater treatment.

Для цитирования
Овсянников В. Ю., Ключников А. И., Прибытков А. В. Практическое обоснование способа регенерации щелочного моющего раствора пивоваренного производства с использованием флокулянтов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 96–103. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-96-103

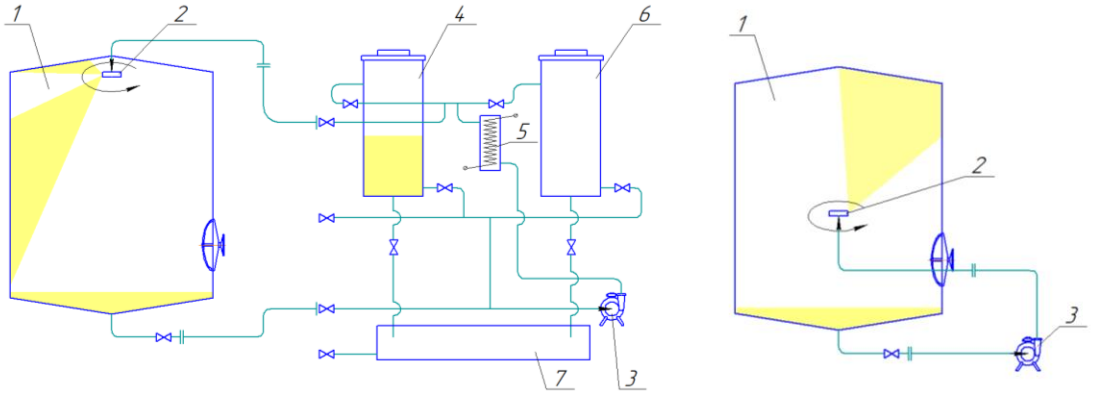
For citation
Ovsyannikov V. Yu., Klyuchnikov A. I., Pribytkov A. V. Practical justification of the method for regenerating alkaline cleaning solution for brewing production using flocculants. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 96–103. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-96-103

© 2025, Овсянников В. Ю. и др. / Ovsyannikov V. Yu. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Мойка технологического оборудования на предприятиях малой мощности в настоящее время производится с использованием передвижной CIP-станции (рис. 1, а) или в циркуляционном режиме (рис. 1, б). В первом случае моющий щелочной раствор после мойки собирают в емкости *4* для последующего его использования в следующем цикле мойки. При этом для его подогревания до рабочей температуры 75…80 ^{0}C используют электрический подогреватель проточного типа *5*. В зависимости от степени загрязнения технологического оборудования количество циклов мойки может варьироваться от 3 до 7, после чего моющий щелочной раствор приготавливают заново.

При отсутствии CIP-станции мойку технологического оборудования производят в циркуляционном режиме при помощи центробежного насоса *3*, многократно наносящего моющий щелочной раствор на стенки танка, при этом его температура постепенно снижается. В этом случае, моющий щелочной раствор используется только один раз, после чего утилизируется (т.н. «потерянная мойка»).



а) б)

Рисунок 1. Схемы мойки технологического оборудования пивоварни: а) с использованием передвижной CIP-станции; б) в циркуляционном режиме: 1 – емкость; 2 – вращающаяся форсунка; 3 – насос; 4 – емкость оборотного моющего щелочного раствора; 5 – электрический нагреватель проточного типа; 6 – емкость оборотного дезинфицирующего раствора (не используется); 7 – емкость для нейтрализации щелочного раствора.

Figure 1. Schemes for cleaning the process equipment of a brewery: a) using a mobile CIP station; b) in circulation mode: 1 - tank; 2 - rotating nozzle; 3 - pump; 4 - tank for circulating alkaline cleaning solution; 5 - flow-through electric heater; 6 - tank for circulating disinfectant solution (not used); 7 - tank for neutralizing the alkaline solution.

Следует отметить, что за счет переработки и очистки щелочного моющего раствора создаются значительные предпосылки снижения экологической нагрузки на окружающую среду [1 – 5]. Учитывая, что большинство минипивоваренных заводов расположены в городской черте, данная проблема становится особенно актуальной. Увеличение срока использования щелочного моющего раствора приводит к значительной экономии применяемого концентрата, например, «Компомол-Щ Калгон», а также снижению потребления воды, снижению экологической нагрузки и практически полному контролю грязевых стоков.

Отработанные щелочные моющие растворы и промывные воды в пивоварении очищают и восстанавливают различными способами, такими как простое отстаивание, ускоренное осаждение взвесей за счет использования флокулянтов, применение осадительного центрифугирования, фильтрационная обработка вод с предварительной частичной очисткой посредством флокуляции и химического окисления [5 – 10].

Неоспоримым достоинством процесса флокуляционной обработки щелочного моющего раствора является извлечение веществ коллоидной природы, размером менее 1 мкм, относительная дешевизна по сравнению с очисткой фильтрованием и центрифугированием. Однако, к используемым флокулянтам предъявляется набор требований, таких как пригодность для использования в пищевой промышленности с точки зрения токсикологической безопасности, возможность работы при температурах до 80 °C и величине активной кислотности pH в интервале 11…12 без потери своих функциональных характеристик[11 – 13].

Следует отметить, что флокулянты природного происхождения не нашли широкого применения для очистки промышленных сточных вод из-за ограниченности сырьевой базы и сравнительно низкой молекулярной массы. Синтетические водорастворимые полимеры «Technopam», «Zetag», «Flopam», «Technofloc», «Specfloc», «Besfloc», «Superfloc», «Praestol», «Nalco» и др. фирм-производителей «Kemira»

(Финляндия), «Kolon Life Science» (Южная Корея), «SNF» (Франция), «Solenis» (Нидерланды), «Technowater» (Россия), «Basf» (Северная Америка), «Clariant» (Швейцария), «Nalco» (Франция) и др., получаемые на основе различныхвиниловых мономеров, являются самыми распространенными реагентами, применяемыми в процессах очистки. Благодаря широким возможностям варьирования свойств флокулянтов (химического состава, молекулярной массы, пространственной структуры), достигаемым изменением исходных мономеров, условий и способов синтеза, возможно применение в различных технологических процессах, в т.ч. очистке щелочных стоков.

Катионные флокулянты («Magnafloc 380», «Гринлайф К20 ПВ», «Гринлайф К35», «Гринлайф К40» и др.) – это вещества, которые при добавлении в воду образуют положительно заряженные частицы (катионы). Они используются для улучшения процесса флокуляции (объединения мелких частиц в крупные агрегаты) в различных промышленных процессах и при очистке воды. Катионные флокулянты обычно образуют более прочные связи между частицами, что делает их более эффективными при обезвоживании.

Аннионные флокулянты («Magnafloc ЛТ 27», «Magnafloc 336», «Magnafloc 5250» и др.) – это вещества, которые при добавлении в воду образуют отрицательно заряженные частицы (анионы). Они также используются для улучшения процесса флокуляции в различных промышленных процессах. Анионные флокулянты обычно используются в тех случаях, когда необходимо уменьшить заряд частиц, чтобы улучшить их флокуляцию. Они также могут использоваться для удаления ионов металлов из воды.

Флокулянты вышеперечисленных марок применяют для очистки оборотных и сточных вод; обезвоживания осадка в коммунальном хозяйстве и промышленности, системах очистки питьевой воды и в других областях, где требуется двухфазное разделение жидкостей[14 – 15].

Целью настоящей работы являлось практическое обоснование применения катионных ионогенных флокулянтов для очистки щелочного моющего раствора в условиях пивоваренных предприятий малой мощности, а также разработка аппаратурно-технологической схемы регенерации.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторной установки, представленной на рисунке 2, состоящей из цилиндрического корпуса с крышкой, двухуровневой лопастной мешалки с приводом, электрического нагревателя и приборов контроля.



Рисунок 2. Лабораторная установка для исследования оптимальных условий взаимодействия флокулянта и моющего щелочного раствора

Figure 2. Laboratory setup for studying optimal conditions for interaction between flocculant and alkaline cleaning solution

В качестве исследуемой жидкости использовали моющий щелочной раствор, собранный из передвижной CIP-станции мини-пивоваренного завода. Щелочной моющий раствор представлял собой разбавленный водой до концентрации 1,5…3,0 % концентрат «Компомол Щ Калгон». Усредненная масса взвешенных твердых частиц составляла 1,0…1,5 г/дм^3, а количество частиц коллоидной дисперсности (менее 10 мкм) было значительным.

Для подбора оптимального флокулянта использовались отечественные продукты «Magnafloc 380» и «Гринлайф К45», полностью соответствующие токсикологической безопасности с точки зрения применения в оборудовании пищевой промышленности.

При проведении исследований ориентировались на диапазон изменения характеристик процесса флокуляционной очистки, в частности: удельные затраты энергии $q = 2 \cdot 10^{-3}$…0,08 Вт/кг; продолжительность процессаτ = 120…750 с.

В качестве критериев эффективности флокуляционной обработки и очистки щелочного моющего раствора от посторонних загрязняющих включений проводили контрольную фильтрацию на мембранной установке с керамическими мембранами с диаметром пор 0,4…0,45 мкм, а также измерение величины экстинции, полученного на основании спектрофотометрического анализа.

Результаты и обсуждение

Два флокулянта «Magnafloc 380» и «Гринлайф К45» показали достаточно хорошие результаты на основании тестовых исследований. Для подбора оптимального количества флокулянта его добавляли в водно-щелочной раствор, имеющий температуру 75…80 °С в различных количествах с продолжительностью пребывания 5 мин и затратами энергии на перемешивание для получения однородной среды 0,017 Вт/кг, при частоте вращения мешалки 200…250 мин$^{-1}$ (рисунок 3).

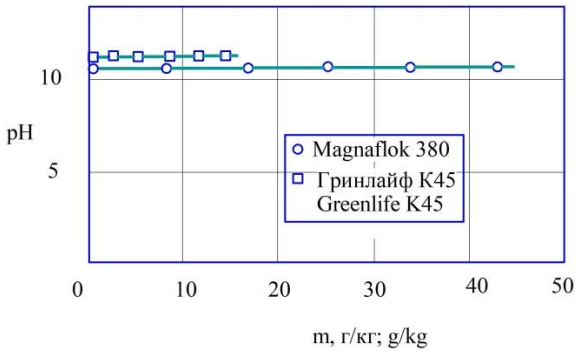


Рисунок 3. Влияние количества флокулянта, *m*, г/кг на величину активной кислотности pH моющего щелочного раствора

Figure 3. The influence of the amount of flocculant, *m*, *g/kg* on the value of active acidity pH of the alkaline washing solution

Здесь следует отметить немаловажную составляющую процесса очистки флокуляцией. Необходимо, чтобы значение pH раствора оставалось неизменным на уровне 11…12, что позволит осуществлять эффективное повторное использование моющего щелочного раствора.

При внесении флокулянта в количестве 3…4 г/кг твердого вещества удалось достигнуть хороших результатов связывания и агломерации примесей. Флокулированные твердые соединения хорошо осаждались, а моющий щелочной раствор становился прозрачным (рисунок 4).

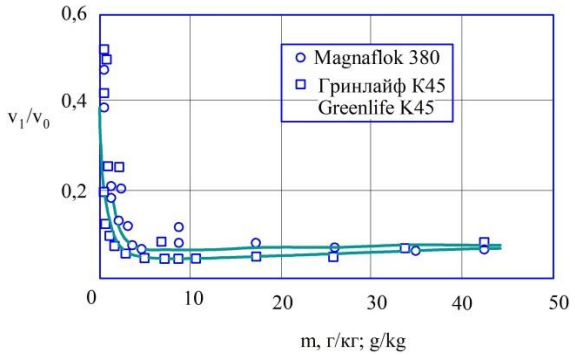


Рисунок 4. Влияние количества флокулянта, *m*, г/кг на соотношение скоростей витания и осаждения v_1/v_0 примесей в моющем щелочном растворе

Figure 4. The influence of the amount of flocculant, m, *g/kg* on the ratio of the rates of soaring and sedimentation v_1/v_0 of impurities in an alkaline detergent solution

Результаты серии испытаний показали, что флокулянт «Гринлайф К45» достиг лучших результатов в плане отделения твердых частиц.

Осуществляли исследования, направленные на изучение влияния количества, вносимого флокулянта на величину удельных затрат энергии, необходимых для реализации процесса осветления моющего раствора (рисунок 5).

Таким образом, показано, что оптимальное количество вносимого флокулянта находится в интервале 3,6…4 г флокулянта на один килограмм твердого вещества которое выдерживали постоянным в дальнейших исследованиях.

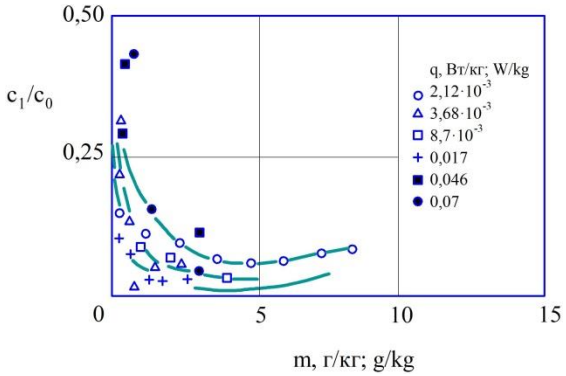


Рисунок 5. Влияние изменения величиныудельных затрат энергии *q*, Вт/кг и количества, вносимого флокулянта на соотношениясодержания твердых веществ в осветленном растворе к содержанию твердых веществ висходном моющем щелочном растворе c_1/c_0.

Figure 5. The effect of changing the value of specific energy consumption *q*, *W/kg*, and the amount of added flocculant on the ratio of the content of solids in the clarified solution to the content of solids in the initial alkaline cleaning solution c_1/c_0.

Установлено, что при средней нагрузке загрязнений 1 г/л к 1 м^3 моющего раствора необходимо добавить около 40...42 г 0,1 % раствора флокулянта.

Исследования влияния продолжительности перемешивания на соотношения содержания твердых веществ в осветленном растворе к содержанию твердых веществ в исходном моющем щелочном растворе показали, что оптимальным для мешалки являлся интервал 240…450 с.

После этого эффективность флокуляционного осаждения снова снижалась, т.к. сформировавшиеся хлопья разрушались, на что указывало повышение соотношения c_1/c_0 (рисунок 6).

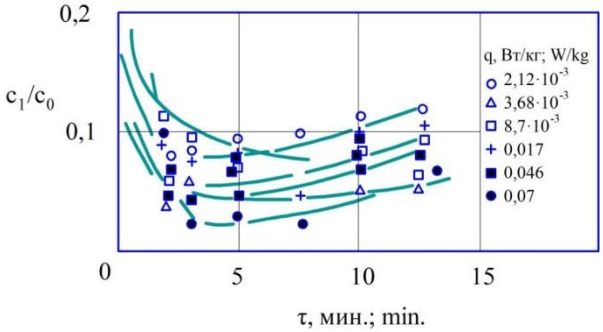


Рисунок 6. Влияние изменения величины удельных затрат энергии *q*, Вт/кг ипродолжительности перемешивания насоотношения содержания твердых веществ в осветленном растворе к содержанию твердых веществ в исходном моющем щелочном растворе c_1/c_0.

Figure 6. The effect of changing the value of specific energy consumption *q, W/kg* and the duration of mixing on the ratio of the content of solids in the clarified solution to the content of solids in the initial alkaline detergent solution c_1/c_0.

На основании графических зависимостей, представленных на рисунке 6 следует заключить, что наиболее благоприятным с точки зрения величины удельных затрат энергии является интервал значений 0,04…0,1 Вт/кг.

В этом интервале около 90…95 % твердых соединений, удаляемых фильтрованием, отделяются седиментацией в течение 30 мин. В случае исключения применения флокулянтов указанная величина была бы равна примерно 50 %. При этом величина экстинции снижается примерно на 95 %, а светопропускание увеличивается (рисунок 7).

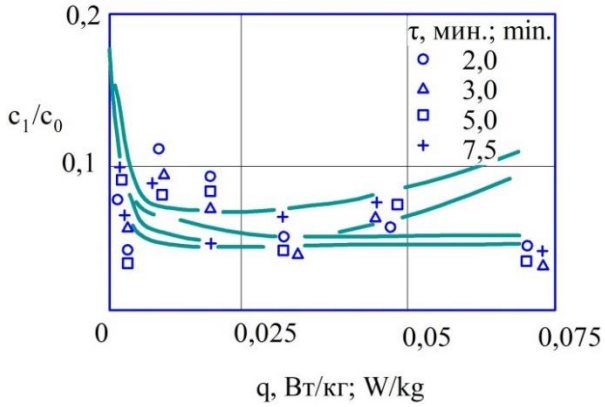


Рисунок 7. Влияние продолжительности перемешивания и изменения величины удельных затрат энергии q, Вт/кг на соотношения содержания твердых веществ в осветленном растворе к содержанию твердых веществ в исходном моющем щелочном растворе c_1/c_0.

Figure 7. The influence of the duration of mixing and the change in the value of specific energy consumption *q, W/kg*, on the ratio of the content of solids in the clarified solution to the content of solids in the initial alkaline cleaning solution c_1/c_0.

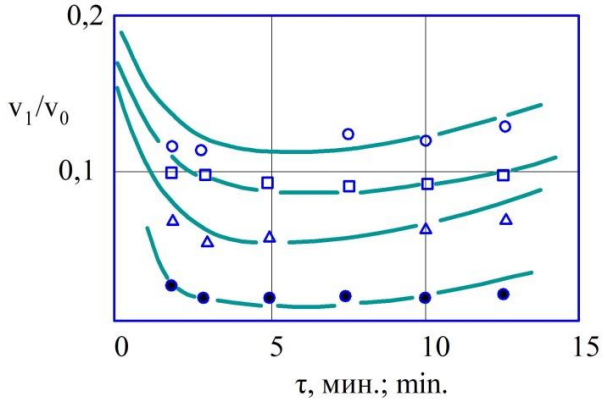


Рисунок 8. Влияние продолжительности обработки τ, мин на соотношение скоростей витания и осаждения v_1/v_0 примесей в моющем щелочном растворе, при различных значениях затрат энергии (обозначения кривых, соответствуют рисунку 6).

Figure 8. The effect of the processing duration τ, min, on the ratio of the rates of soaring and sedimentation v_1/v_0 of impurities in an alkaline cleaning solution, at different values of energy consumption (curve designations correspond to Figure 6).

Основываясь на оценке величины экстинции можно утверждать, что большая часть коллоидных растворенных частиц также выявляется при флокуляционной обработке и может быть успешно отделена в результате их агломерации.

На основании полученных результатов срок эксплуатации щелочного моечного раствора, очищаемого методом флокуляции можно повысить в 4…6 раз. В результате подобной технологии осветления щелочного моечного раствора химическое потребление кислорода снижается приблизительно на 50…60 % по сравнению с окислением щелочных вод не обрабатываемых предварительно флокулянтами и сбрасываемыми в качестве сточных, что существенно облегчает функционирование и снижает затраты водоочистных станций, а также снижает экологическую нагрузку.

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать аппаратурно-технологическую схему очистки моющих щелочных растворов минипивоваренных предприятий, представленную на рисунке 9.

В предлагаемой схеме отработанный моющий щелочной раствор после мойки емкости брожения или созревания пива собирают в емкости 4 передвижной CIP-станции.

Для регенерации щелочного моющего раствора его перекачивают в смеситель 1, в который задают заданное количество флокулянта. Образовавшуюся смесь центробежным насосом 2 после выдержки в течение 30…40 мин прокачивают через самопровымные фильтры 3 для удаления осадка, а осветленный щелочной раствор собирают в емкости 4 для повторного использования. Здесь также можно производить корректировку концентрации действующего вещества за счет добавления расчетного количества концентрата «Компомол Щ Калгон». Затем используют регенерированный щелочной раствор для последующих циклов мойки в соответствии с разработанным регламентом санитарной мойки и дезинфекции технологического оборудования.

Отработанный щелочной раствор в случае невозможности регенерации по предлагаемому способу сбрасывают в емкость 7, в которой его нейтрализуют и сбрасывают в канализацию.

Таким образом, визуальный контроль процесса осаждения примесей при флокуляционной очистке щелочного моечного раствора может успешно реализовываться в емкости передвижной CIP-станции или любой емкости, оснащенной смотровыми диоптрами.

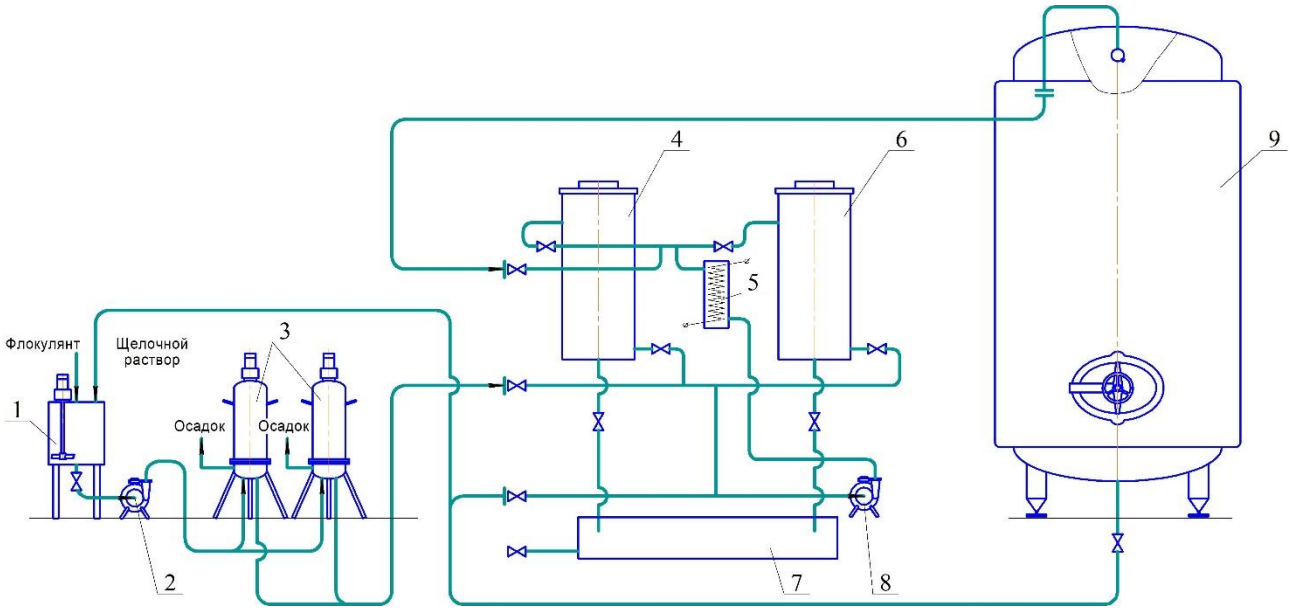


Рисунок 9. Схема регенерации моющего щелочного раствора с использованием флокулянтов: 1 – смеситель; 2 – центробежный насос; 3 – самопромывной фильтр; 4 – емкость оборотного моющего щелочного раствора; 5 – электрический нагреватель проточного типа; 6 – емкость оборотного дезинфицирующего раствора (не используется); 7 – емкость для нейтрализации щелочного раствора; 8 – циркуляционный насос; 9 – емкость для мойки и дезинфекции

Figure 9. Scheme of regeneration of alkaline cleaning solution using flocculants: 1 – mixer; 2 – centrifugal pump; 3 – self-cleaning filter; 4 – tank for circulating alkaline cleaning solution; 5 – electric flow-through heater; 6 – tank for circulating disinfectant solution (not used); 7 – tank for neutralizing alkaline solution; 8 – circulation pump; 9 – tank for washing and disinfection

При этом минимальная продолжительность осветляемого моющего щелочного раствора в емкости должна составлять не менее 30… мин, что обеспечит качественное осаждение примесей.

Использование предложенного технологического решения, несомненно, позволит сократить годовые объемы потребляемой воды и концентрированного щелочного раствора, потребляемого на мини-пивоварне, регенерирующих агентов и нейтрализаторов для обработки образующихся сточных вод, а также позволит снизить негативное экологическое воздействие на окружающую среду.

Литература

1. Ben J., Mohamed A., Muduli K. Optimizing bottle washer performance in cleaning returnable glass bottles for reuse in beverage packaging // Int. J. Adv. Sci. Technol. 2020. V. 29. № 7. P. 8149–8159.
2. Казаков П.С., Неверов Е.Н. Анализ механических способов очистки сточных вод, применяемых на предприятиях // Пищевые технологии: сб. тез. III Междунар. симп., посв. 90-летию со дня рождения Л.А. Остроумова. Кемерово, 2024. С. 515–518.
3. Неверов Е.Н., Горелкина А.К., Схаплок Р.Ю. Анализ современных методов и технологий промышленной водоочистки // Ползуновский вестник. 2023. № 3. С. 215–225.
4. Liasota V., Yarmoliuk S., Ivankiv L., Stefanyshyn O., Vishchur O., Gutyj B. Effectiveness of detergents and disinfectants in the production of cow's milk // Ukr. J. Vet. Sci. 2022. V. 13. № 4. P. 25–33.
5. Бойкова Т.Е., Богданович Н.И., Мауричева Т.С. Применение флокулянтов в процессе водоподготовки // Соврем. наукоемк. технол. Регион. прил. 2019. № 1 (57). С. 91–102.
6. Ben J., Mohamed A., Muduli K. Optimizing bottle washer performance in cleaning returnable glass bottles for re-use in beverage packaging // Int. J. Adv. Sci. Technol. 2020. V. 29. № 7. P. 8149–8159.
7. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Использование флокулянтов для очистки сточных вод // Трансформация экосистем. 2023. Т. 6. № 1 (19). С. 168–187.
8. Жусупекова А.Н., Елубай М.А. Комплексная модернизация мойки CIP на пищевом производстве // Науч. журн. 2018. № 11 (34). С. 5–8.
9. Захватов Г.И. Регенерация растворов как метод создания замкнутых технологических циклов // Изв. КазГАСУ. 2011. № 2 (16). С. 262–265.
10. Николенко И.В., Котовская Е.Е., Котовский А.Е. Обоснование параметров рециркуляции в системах водоснабжения автомоек // Стр-во и техног. безоп. 2022. № 24 (76). С. 71–84.
11. Избуллаева М.С., Амонов М.Р., Амонова М.М. Использование флокулянтов в системах очистки сточных вод // Universum: техн. науки. 2023. № 11-5 (116). С. 20–23.
12. Osipova M.V. Use of clarifying agents in technological process of kvass production // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 613. № 1. 012100.
13. Ульрих Е.В. Изучение свойств модифицированных флокулянтов для выделения компонентов сыворотки // Техн. и технол. пищ. пр-в. 2018. № 2. С. 117–128.

14. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Использование флокулянтов для очистки сточных вод // Трансформация экосистем. 2023. № 1 (19). С. 168–187.
15. Badawi A.K., Salama R.S., Mostafa M.M.M. Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: a review of recent developments // RSC Adv. 2023. V. 13. № 28. P. 19335–19355.
16. Khan R.A. Detergents // Environmental Micropollutants. Amsterdam: Elsevier, 2022. P. 117–130.
17. Yemiş F., Harmancı N.Y. Classification, uses and environmental implications of disinfectants // Pak. J. Anal. Environ. Chem. 2020. V. 21. № 2. P. 179–192.
18. Iakubchak O., Khomenko V., Dronik A., Bohach T., Chechet O., Nychyk S., Leno M., Matei M., Simon M. The study of the cytotoxic effect of disinfectants // J. Vet. Res. 2023. V. 67. № 1. P. 82–95.
19. Habschied K., Mastanjević K. Maintaining the quality control of beer // International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2021). Cham: Springer, 2021. P. 435–446.
20. Mohamed A., Noreo S. Investigating the root cause of high-water consumption in bottle washing equipment: A case study // Applications of Mathematics in Science and Technology. Boca Raton: CRC Press, 2024. P. 928–933.
21. Lipnizki F., Figueroa R.R. Membrane operations in the sugar and brewing industry // Membrane Systems in the Food Production: Vol. 1: Dairy, Wine and Oil Processing. Berlin: De Gruyter, 2021. P. 95–144.
22. Fernandes P.C.B., Silva J. Brewing By-Products: Source, Nature, and Handling in the Dawn of a Circular Economy Age // Biomass. 2025. V. 5. № 3. P. 49–63.
23. Zacharof M.P. Industrial symbiosis: beer brewery wastewater-based biorefinery // Circ. Econ. Sustain. 2021. V. 1. № 2. P. 593–609.

References

1. Ben J., Mohamed A., Muduli K. Optimizing bottle washer performance in cleaning returnable glass bottles for reuse in beverage packaging. International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. vol. 29. no. 7. pp. 8149–8159.
2. Kazakov P.S., Neverov E.N. Analysis of mechanical methods of wastewater treatment used at enterprises. Food technologies: collection of abstracts of the III International symposium dedicated to the 90th anniversary of the birth of L.A. Ostroumov. Kemerovo, 2024. pp. 515–518. (in Russian)
3. Neverov E.N., Gorelkina A.K., Shkaplok R.Yu. Analysis of modern methods and technologies of industrial water treatment. Polzunovsky vestnik. 2023. no. 3. pp. 215–225. (in Russian)
4. Liasota V., Yarmoliuk S., Ivankiv L., Stefanyshyn O., Vishchur O., Gutyj B. Effectiveness of detergents and disinfectants in the production of cow's milk. Ukrainian Journal of Veterinary Sciences. 2022. vol. 13. no. 4. pp. 25–33.
5. Boikova T.E., Bogdanovich N.I., Maurichеva T.S. Application of flocculants in the water treatment process. Modern high-tech technologies. Regional application. 2019. no. 1(57). pp. 91–102. (in Russian)
6. Ben J., Mohamed A., Muduli K. Optimizing bottle washer performance in cleaning returnable glass bottles for re-use in beverage packaging. International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. vol. 29. no. 7. pp. 8149–8159.
7. Ulrikh E.V., Barkova A.S. Use of flocculants for wastewater treatment. Transformation of ecosystems. 2023. vol. 6. no. 1(19). pp. 168–187. (in Russian)
8. Zhusupbekova A.N., Elubay M.A. Comprehensive modernization of CIP washing at a food production facility. Scientific journal. 2018. no. 11(34). pp. 5–8. (in Russian)
9. Zakhvatov G.I. Regeneration of solutions as a method of creating closed technological cycles. News of KazGASA. 2011. no. 2(16). pp. 262–265. (in Russian)
10. Nikolenko I.V., Kotovskaya E.E., Kotovsky A.E. Substantiation of parameters of recirculation in car wash water supply systems. Construction and technogenic safety. 2022. no. 24(76). pp. 71–84. (in Russian)
11. Izbulayeva M.S., Amonov M.R., Amonova M.M. Use of flocculants in wastewater treatment systems. Universum: Technical sciences. 2023. no. 11-5(116). pp. 20–23. (in Russian)
12. Osipova M.V. Use of clarifying agents in technological process of kvass production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. vol. 613. no. 1. p. 012100.
13. Ulrikh E.V. Study of the properties of modified flocculants for the isolation of whey components. Technique and technology of food production. 2018. no. 2. pp. 117–128. (in Russian)
14. Ulrikh E.V., Barkova A.S. Use of flocculants for wastewater treatment. Transformation of ecosystems. 2023. no. 1(19). pp. 168–187. (in Russian)
15. Badawi A.K., Salama R.S., Mostafa M.M.M. Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: a review of recent developments. RSC Advances. 2023. vol. 13. no. 28. pp. 19335–19355
16. Khan R.A. Detergents. Environmental Micropollutants. Amsterdam: Elsevier, 2022. pp. 117–130.
17. Yemiş F., Harmancı N.Y. Classification, uses and environmental implications of disinfectants. Pakistan Journal of Analytical and Environmental Chemistry. 2020. vol. 21. no. 2. pp. 179–192. doi:10.21743/pjaec/2020.12.25
18. Iakubchak O., Khomenko V., Dronik A., Bohach T., Chechet O., Nychyk S., Leno M., Matei M., Simon M. The study of the cytotoxic effect of disinfectants. Journal of Veterinary Research. 2023. vol. 67. no. 1. pp. 82–95.
19. Habschied K., Mastanjević K. Maintaining the quality control of beer. International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2021). Cham: Springer, 2021. pp. 435–446.
20. Mohamed A., Noreo S. Investigating the root cause of high-water consumption in bottle washing equipment: A case study. Applications of Mathematics in Science and Technology. Boca Raton: CRC Press, 2024. pp. 928–933.
21. Lipnizki F., Figueroa R.R. Membrane operations in the sugar and brewing industry. Membrane Systems in the Food Production: Vol. 1: Dairy, Wine and Oil Processing. Berlin: De Gruyter, 2021. pp. 95–144.
22. Fernandes P.C.B., Silva J. Brewing By-Products: Source, Nature, and Handling in the Dawn of a Circular Economy Age. Biomass. 2025. vol. 5. no. 3. pp. 49–63.
23. Zacharof M.P. Industrial symbiosis: beer brewery wastewater-based biorefinery. Circular Economy and Sustainability. 2021. vol. 1. no. 2. pp. 593–609.

Сведения об авторах

Виталий Ю. Овсянников д.т.н., доцент, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, Россия, ows2003@mail.ru.
https://orcid.org/0000-0001-9388-6303

Андрей И. Ключников д.т.н., доцент, профессор кафедры технологии виноделия, бродильных производств и химии имени Г.Г. Агабальянца, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского, ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, kaivanov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8161-0040

Алексей В. Прибытков к.т.н., доцент, старший преподаватель кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, д. 54 а, г. Воронеж, Воронежская обл., 394064, Россия, pribytkov_aleks@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8157-3681

Information about authors

Vitaly Yu. Ovsyannikov Dr. Sci. (Engin.), assistant professor, Professor of the Department of Machines and Equipment for Food Production, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Russia, ows2003@mail.ru.
https://orcid.org/0000-0001-9388-6303

Andrey I. Klyuchnikov Dr. Sci. (Engin.), assistant professor, Professor of the Department of Winemaking Technology, Fermentation Production and Chemistry named after G. G. Agabal'yants, «Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky», Zemlyanoy Val st., 73, Moscow, 109004, Russia, kaivanov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8161-0040

Alexey V. Pribytkov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Senior Lecturer, Department of Aviation Complexes and Aircraft Design, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin», Starykh Bolshevikov St., 54a, Voronezh, Voronezh Region, 394064, Russia, pribytkov_aleks@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8157-3681

Вклад авторов

Виталий Ю. Овсянников написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат
Андрей И. Ключников обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Алексей В. Прибытков предложил методику проведения эксперимента

Contribution

Vitaly Yu. Ovsyannikov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism
Andrey I. Klyuchnikov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Alexey V. Pribytkov proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025

Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-104-112 Оригинальная статья/Research article
УДК 663.915.23 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка рецептуры и технологии печенья для геродиетического питания

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. Питание – постоянно действующий фактор внешнего воздействия, от которого в значительной степени зависит состояние здоровья человека, его энергичность и трудоспособность, долголетие. Современные технологии производства пищевых продуктов не учитывают специфики питания людей старших возрастных групп. Цель исследования заключалась в разработке рецептуры и технологии печенья адаптированного для геродиетического питания. Объектом изучения являлось печенье, в рецептурном составе которого использовано сочетание нескольких обогащающих ингредиентов: экстракта молотого сахарного тростника с выделенными полифинолами (фитолин), гидролизата коллагена и трегалозы. Определено оптимальное количество обогащающих ингредиентов в рецептуре печенья, обеспечивающее максимальное положительное физиологическое воздействие на организм. В разрабатываемой рецептуре печенья было предложено заменить сахар на натуральный сахарозаменитель изомальт, для усиления сладкого вкуса введен стевиозид. Исследования качества разработанного печенья показали, что при внесении фитолина в количестве от 1,4 до 5% вкус и запах печенья усиливались оттенками, соответствующими применяемой добавке. Значения щелочности, влажности и намокаемости соответствовали стандартным нормам. Разработано печенье, состав которого будет способствовать поддержанию здорового состояния коллагенсодержащих тканей организма, снижению риска развития сахарного диабета 2 типа, а также снижению гликемического индекса изделия. Разработана технология печенья для геродиетического питания, адаптированная к фактическим условиям предприятий по производству мучной кондитерской продукции.

Ключевые слова: геродиетическое питание, печенье, фитолин, гидролизат коллагена, трегалоза.

Development of the formulation and technology of cookies for gerodietetic nutrition

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. Nutrition is a constant factor of external influence, on which a large degree depends of the human health state, energy, employability and longevity. Modern food production technologies leave out the specific nutrition of older age groups. The purpose of the study was to develop a cookie formula and technology adapted for gerodietetic nutrition. The object of the study was a cookie, in the formulation of which a combination of several enriching ingredients was used: an extract of ground sugar cane with isolated polyphinols (phytolin), collagen hydrolysate and trehalose. The optimal amount of enriching ingredients in the cookie recipe has been determined, providing the maximum positive physiological effect on the body. It was proposed to replace sugar with the natural sugar substitute isomalt in the developed cookie formula, and stevioside was introduced to enhance the sweet taste. Studies of the quality of the developed cookies showed that when phytolin was added in an amount from 1.4 to 5%, the taste and smell of the cookies were enhanced by shades corresponding to the additive used. The values of alkalinity, humidity and wetness corresponded to standard norms. Cookies have been developed, the composition of which will contribute to maintaining a healthy state of collagen-containing body tissues, reducing the risk of developing type 2 diabetes, as well as reducing the glycemic index of the product. The technology of cookie for gerodietetic nutrition has been developed, adapted to the actual conditions of enterprises producing flour confectionery products.

Keywords: gerodietetic food, cookies, phytolin, collagen hydrolysate, trehalose.

Введение

Демографическая обстановка в современном мире характеризуется активным увеличением количества людей пожилого возраста [1]. В связи с этим проблема сохранения здоровья людей пожилого и старческого возраста является актуальной.

Нерациональное питание является общепризнанным фактором риска развития сердечно-сосудистых заболеваний, сахарного диабета 2 типа, болезни опорно-двигательного аппарата, ожирения, анемии, метаболического синдрома, злокачественных новообразований и др. Согласно данным российских и зарубежных исследований,

Для цитирования
Ткешелашвили М.Е., Бобожонова Г.А., Магомедов Г.О. Разработка рецептуры и технологии печенья для геродиетического питания // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 104–112. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-104-112

For citation
Tkeshelashvili M.E., Bobozhonova G.A., Magomedov G.O. Development of the formulation and technology of cookies for gerodietetic nutrition. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 104–112. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-104-112

© 2025, 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

оптимизация питания в пожилом возрасте способствует геропротекции, профилактике возрастных заболеваний, предупреждает или замедляет их прогрессирование [2]

Рекомендации геронтологов к пище для пожилых людей направлены на снижение ее калорийности за счет уменьшения жирности, сокращение употребления сахара, а также обогащение продуктов питания витаминами, микроэлементами, пищевыми волокнами, пробиотиками и пребиотиками.

Российскими учеными для данной категории людей разработаны рецептуры и технологии продуктов на овощной [3], молочной [4], мясной [5] и зерновой [6, 7] основах, с использованием различных компонентов, оказывающих положительное влияние на организм.

В рационе пожилых людей должны присутствовать любые продукты, а диета должна быть разнообразной. В результате исследований [8] было определено, что одной из наиболее востребованных групп пищевой продукции среди пожилого населения являются кондитерские изделия, причем большее предпочтение отдают печенью, пряникам, вафлям.

В связи с вышеизложенным разработка продуктов для людей пожилого возраста, в том числе кондитерских изделий, способствующих гармоничному дополнению рационов их питания является перспективным и актуальным направлением развития пищевой промышленности.

Цель работы – разработка рецептуры и технологии печенья, адаптированного для геродиетического питания, в котором в качестве добавок использовано сочетание нескольких обогащающих ингредиентов: фитолина, гидролизата коллагена и трегалозы.

Теоретическое обоснование

Фитолин как источник флавоноидов. Фитолин представляет собой запатентованный продукт из обработанного экстракта молотого сахарного тростника с выделенными полифенолами, является источником флавоноидов и катехинов.

Флавоноиды – это растительные фенольные соединения, структурную основу которых составляют 2 бензольных кольца (А и В), соединенных друг с другом гетероциклическим пираном или пироном (кольцо С). В зависимости от структурных изменений в кольцах (степени гидрирования, гидроксилирования, окисления) флавоноиды подразделяют на несколько семейств: флавонолы, флавоны, флаваноны, катехины, лейкоантоцианидины, антоцианы и др.

Принято считать, что наибольшую роль в многообразном влиянии флавоноидов на организм играют их антиоксидантные свойства [9, 10]. Флавоноиды могут быть отнесены к неферментативным антиоксидантам, способным прямо или косвенно ослаблять или предупреждать клеточные повреждения свободными радикалами, чем предотвращают преждевременное старение организма.

При исследовании различных положительных влияний на организм человека потребления флавоноидов, получили данные о возможном снижении риска развития инсулинорезистентности. Инсулинорезистентность имеет отношение к возникновению ожирения, метаболического синдрома, сахарного диабета, это способствует усилению интереса к влиянию потребления продуктов, богатых флавоноидами [11].

Катехины (флаван-3-олы) являются достаточно обширной группой растительных органических соединений: число известных флаван-3-олов превышает 1000. Антиоксидантные свойства катехинов в 50 раз превышают показатели витамина Е и в 20 раз – витамина С [12]

Кроме того, накоплена большая доказательная база по антиканцерогенным, метаболическим, геропротекторным, противовоспалительным и противовирусным эффектам полифенолов. Это позволяет считать их перспективными микронутриентами, включение которых в рацион питания может снизить риск развития социально значимых возраст-ассоциированных заболеваний [9]

Также важное значение флавоноиды имеют в технологических процессах пищевой промышленности, так как продукты окисления флавоноидов ответственны за специфические вкусовые свойства, цвет и аромат продуктов переработки.

Гидролизат коллагена как диетическая добавка. Коллаген – основной структурный белок межклеточного матрикса, который имеет характерную спираль из трех полипептидных цепей. Коллаген составляет 25–33% от общего количества белка в организме. В разных тканях преобладают разные типы коллагена. 95% всего коллагена в организме человека составляют коллагены 1-го, 2-го и 3-го типа, которые образуют очень прочные фибриллы. Они являются основными структурными компонентами органов и тканей, которые испытывают постоянную или периодическую механическую нагрузку (кости, кожа, сухожилия, хрящи, межпозвоночные диски, кровеносные сосуды) [13].

В норме коллаген постоянно синтезируется клетками соединительной ткани и разрушается (ферментативно), однако с возрастом (особенно в старости) обмен коллагена заметно снижается [13] Так изменение содержания коллагеновых белков, нарушает структуру хрящевой ткани, что может приводит к таким болезням как артриты и артрозы суставов, разрушения межпозвонковых дисков [14].

Одним из средств, обеспечивающих естественный синтез коллагена в организме, является дополнительный прием коллагена в составе продуктов питания. Человеческий организм плохо усваивает целостный белок коллаген из пищи из-за большого размера его молекул. При этом гидролизаты коллагена лучше усваиваются в организме человека. В этой связи целесообразно применять коллаген, который предварительно подвергался ферментативному гидролизу [15].

В исследованиях [16, 17] была показана эффективность гидролизата коллагена в уменьшении боли и улучшении функции суставов у пациентов с остеоартрозом. Положительное влияние на процессы ремоделирования хряща при остеоартрозе возможно при назначении коллагена в суточной дозе 10 г [16].

Оценена перспектива использования гидролизованного коллагена в технологии напитка на основе молочной сыворотки. Добавление гидролизованного коллагена повысило биодоступность, питательную ценность и антиоксидантную активность напитка [18]. Разработана технология специализированного пробиотического белкового десерта, обогащенного коллагеном и кальцием. Продукт может применяться в качестве основного или дополнительного источника коллагена и кальция для лечения или профилактики остеопороза и сопутствующих заболеваний [19]. В [20] обоснована актуальность применения коллагенсодержащего концентрата при производстве творожных продуктов для спортивного питания. Включение в состав рациона питания спортсменов творожных продуктов с высоким содержанием коллагена будет способствовать укреплению хрящевой ткани суставов, улучшению восстановления соединительной ткани связочного аппарата и снижению болевого порога за счет увеличения выработки коллагена.

Трегалоза и ее влияние на организм. Трегалоза – дисахарид, в котором две единицы глюкозы связаны α-1,1-гликозидной связью. Трегалоза широко распространена в природе и встречается в самых разнообразных организмах, от бактерий до беспозвоночных. Наибольшее количество трегалозы сосредоточено в спорах мицелиальных грибов и в дрожжах. Крупномасштабное промышленное получение этого дисахарида осуществляется биотехнологическими методами, основанными на ферментативных превращениях крахмала.

Трегалоза признана безопасным пищевым ингредиентом Европейской системой регулирования после одобрения этого дисахарида Управлением по контролю за продуктами питания и лекарствами в США. В Японии изучена токсичность трегалозы для людей. Показана безопасность массового потребления этого дисахарида в коммерческих целях для использования его в качестве составной части потребительских продуктов [21].

Исследование [22] показало, что ежедневное употребление 10 г. трегалозы улучшает толерантность к глюкозе у людей с признаками метаболического синдрома и замедляет прогрессирование инсулинорезистентности. Эти результаты свидетельствуют о том, что трегалоза потенциально может снижать развитие метаболического синдрома и связанных с ним заболеваний, таких как диабет 2 типа. В исследовании [23] определили, что более низкая доза (3,3 г в день) трегалозы улучшает толерантность к глюкозе у здоровых добровольцев. Таким образом, трегалоза также может быть полезным пищевым ингредиентом для людей с преддиабетом и постпрандиальной гипергликемией, поскольку она помогает поддерживать здоровье и улучшать качество жизни.

Кроме того, трегалоза усиливает аутофагию, защищая клетки организмов от различных стрессорных воздействий; является модификатором аномального накопления белка при нейродегенеративных заболеваниях человека; оказывает благоприятное действие на эндотелий сосудов [21].

В пищевой промышленности трегалоза в основном используется в качестве сахарозаменителя. В мучных кондитерских изделиях трегалоза препятствует ретроградации крахмала намного эффективнее, чем другие сахара, повышая тем самым стабильность изделий и задерживая их черствение [24].

Исследована возможность применения сахарозаменителя трегалозы в технологии напитка на основе творожной сыворотки, и установлено, что трегалоза улучшает вкус, уменьшает запах и продлевает срок хранения напитка [25]. Показано, что замена сахарозы на фруктозу и трегалозу при производстве мороженого сливочного и пломбира, приводит к снижению гликемического индекса мороженого на 45%, продукт приобретает статус «низкий гликемический индекс» [26].

Материалы и методы

Объектом исследования являлось печенье, обогащенное экстрактом молотого сахарного тростника с выделенными полифинолами (фитолин), гидролизатом коллагена и трегалозой (его рецептурные модели). В качестве основного сырья использовались пшеничная мука высшего сорта, обогащающие добавки,

растительный жир, влагоудерживающая добавка, разрыхлитель, ароматизатор; питьевая вода; сухое молоко; в качестве пенообразователя – яичный белок. В качестве компонентов, придающих сладость применяли изомальт – белое кристаллическое вещество без запаха, с чистым сладким вкусом и малой гигроскопичностью; подсластителя стевиозид – гликозид из экстракта растения стевии, порошок белого цвета без запаха, с характерным сладковатым вкусом, коэффициент сладости составляет 250 единиц.

Биологически активная добавка к пище «Фитолин», представляет собой темно-коричневую вязкую жидкость горьковато-сладкого вкуса, 100% натуральный экстракт из сахарного тростника, рекомендованная доза приема для взрослых 10 мл в день, при указанных рекомендациях «Фитолин» может являться источником флавонов и катехинов (таблица 1).

Таблица 1.
Содержание флавоноидов и катехинов в БАД к пище «Фитолин»

Table 1.
Content of flavonoids and catechins in the «Phitolin» dietary supplement

Показатель | Indicator	Содержание, мг/г Content, mg/g
Флавоноиды | Flavonoids: флавоны и их гликозиды flavones and their glycosides	1,47
Катехины, в т. ч. | Catechins, incl.	3,9
эпигаллокатехин epigallocatechin	0,4
катехин | catechin	0,6
эпикатехин | epicatechin	1,6
эпигаллокатехин галлат epigallocatechin gallate	0,2
галлокатехин галлат gallocatechin gallate	0,1
эпикатехин галлат epicatechin gallate	1,0

Гидролизованный морской коллаген II типа, натуральный ингредиент, содержащий более 94% белка (в пересчете на сухой вес) и 18 аминокислот, 7 из которых являются незаменимыми (таблица 2).

Трегалоза – невосстанавливающийся дисахарид естественного происхождения, полученный из крахмала путем ферментативного процесса. Трегалоза представляет собой мелкий белый кристаллический порошок, без запаха, содержание основного вещества 99,05%.

Органолептические показатели качества в соответствии с требованиями ГОСТ 24901–2023 определяли путем контроля пробы изделий. Щелочность определяли титрованием фильтрата продукта раствором серной кислоты в присутствии бромтимолового синего до появления желтой окраски по ГОСТ 5898–2022; влажность – высушиванием навески продукта при температуре 130 °С и вычислении потери массы по отношению к массе анализируемой пробы до высушивания по ГОСТ 5900–2014, намокаемость – по отношению массы изделия после намокания к массе сухого изделия по ГОСТ 10114–80.

Таблица 2.
Аминокислотный профиль гидролизованного коллагена

Table 2.
Amino acid profile of hydrolyzed collagen

Аминокислота Amino acid	Содержание в 100 г продукта Content per 100 g of product
Аланин | Alanine	5,48
Аргинин | Arginine	13,47
Аспарагиновая кислота | Aspartic acid	3,4
Глутаминовая кислота | Glutamic acid	7,64
Глицин | Glycine	13,6
Гистидин | Histidine	1,11
Гидроксипролин | Hydroxyproline	10,78
Изолейцин | Isoleucine	1,51
Лейцин | Leucine	3,19
Лизин | Lysine	4,03
Гидроксилизин | Hydroxylysine	0,86
Метионин | Methionine	1,86
Фенилаланин | Phenylalanine	2,73
Пролин | Proline	13,72
Серин | Serene	2,92
Треонин | Threonine	2,65
Тирозин | Tyrosine	0,8
Валин | Valin	2,25

Результаты и их обсуждение

Создание печенья для геродиетического питания. Все компоненты печенья подобраны с учетом результатов научных исследований и усиления их совместного воздействия на организм человека для достижения максимального благоприятного результата по снижению риска развития сахарного диабета 2 типа и протекции состояния костной ткани, а также по снижению гликемического индекса изделия. Действие печенья для геродиетического питания обусловлено синергетическим воздействием на организм входящих в его состав компонентов.

С учетом внесенных корректировок по рецептурным ингредиентам и их количественному соотношению в ходе многократных лабораторных выпечек были разработаны рецептуры печенья для геродиетического питания, представленные в таблице 3.

Таблица 3.

Рецептуры разработанного печенья для геродиетического питания

Table 3.

Formula of the developed cookies for gerodietetic nutrition

Ингредиент | Ingredient	Количество в образце, кг | Content in sample, kg				
	1	2	3	4	5
Мука пшеничная высшего сорта Wheat flour of the highest grade	29	30	31	32	33
Трегалоза | Trehalose	7	8	7	6	5,0
Фитолин | Phytolin	5	4	3	2	1,4
Гидролизат коллагена | Collagen hydrolysate	8	6	4	5	2,5
Изомальт и стевиозид | Isomalt and stevioside	10	12	12,5	13	15
Растительное масло | Vegetable oil	20	18	21	22	21
Сухое молоко | Dry milk	7	5,5	7	6	5
Влагоудерживающая добавка | Moisture-retaining additive	6	7	4,5	3	5
Яичный белок | Egg white	2	3	3,5	4,5	5
Разрыхлитель | Baking powder	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
Ванилин | Vanillin	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1
Вода | Water	Остальное | Rest				
Итого | Total	100	100	100	100	100

При разработке рецептур осуществлено целенаправленное моделирование ингредиентного состава печенья за счет 100%-ной замены сахара на натуральный сахарозаменитель изомальт (рецептура 1–5), что будет способствовать снижению гликемического индекса этого изделия. Так как данный сахарозаменитель характеризуются не слишком интенсивной сладостью, для усиления сладкого вкуса в рецептуру печенья введен стевиозид. Печенье для геродиетического питания содержит легкоусвояемый гидролизат коллагена в количестве 2,5–8,0%. При повышении содержания коллагена выше указанного интервала в печенье ухудшаются пластичные свойства теста. Высокое содержание этого компонента является достоинством разработанного продукта, так как при потреблении 100 г продукта обеспечивается прием 25–80% рекомендуемой суточной нормы приема коллагена. При снижении содержания гидролизата коллагена в печенье меньше указанного интервала снижается его эффективность, а при более высоком – ухудшаются потребительские свойства печенья. Использование коллагена в форме его гидролизата устраняет возможные проблемы, связанные с длительностью и возможным дискомфортом переваривания природного коллагена в желудке. Это также существенно повышает его усвояемость и увеличивает скорость синтеза собственного коллагена в организме.

Печенье для геродиетического питания содержит трегалозу в количестве не менее 5% продукта и фитолин в количестве 1,4–5% продукта. При снижении содержания данных ингредиентов в продукте меньше указанного интервала снижается их эффективность.

Согласно Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) (Приложение № 5 «Величины суточного потребления пищевых и биологически активных веществ для взрослых в составе специализированных пищевых продуктов и БАД к пище») адекватный уровень потребления флавонов для взрослых составляет 10 мг/сут, катехинов – 100 мг. Расчётным методом оценен уровень удовлетворения суточной потребности организма в флавоноидах при употреблении разработанного печенья с добавлением фитолина (таблица 4).

Таблица 4.

Оценка удовлетворения суточной потребности в флавоноидах при употреблении разработанного печенья

Table 4.

Evaluation of the satisfaction of the daily requirement for flavonoids when consuming the developed cookies

Показатель Ingredient	Адекватный уровень потребления Adequate level of consumption	Верхний допустимый уровень потребления Upper permissible consumption level	Удовлетворение суточной потребности при употреблении 100 г печенья с добавлением фитолина в количестве 1,4–5% продукта Satisfaction of the daily requirement by consuming 100 g of cookies with the addition of phytolin in the amount of 1.4–5% of the product	
			количество, мг quantity, mg	% от адекватного уровня потребления % of adequate consumption level
Флавоны | Flavones	10 мг | mg	25 мг | mg	2,05–7,35	20,5–73,5
Катехины | Catechins	100 мг | mg	300 мг | mg	5,46–19,5	5,5–19,5

При употреблении 100 г разработанного печенья с добавлением фитолина в количестве 1,4–5%, потребление флавонов составит 20,5–73,5%, катехинов 5,5–19,5% от адекватного уровня суточного потребления.

Технологическая схема приготовления печенья для геродиетического питания. Разработанные рецептуры печенья для геродиетического питания позволяют сохранить существующие машинно-аппаратурные схемы и производство изделий без кардинальных изменений в ходе технологического процесса.

Технологическая схема приготовления печенья по рецептуре 1 предусматривала на первом этапе восстановление яичного белка с водой комнатной температуры в соотношении 1:7, далее оставляли полуфабрикат на 30 минут и затем вмешивали в него трегалозу, смесь изомальта и стевиозида. Полученную смесь взбивали миксером и в массу вводили рецептурное количество ароматизатора. Отдельно смешивали муку пшеничную с разрыхлителем и просеивали через сито. Затем осуществляли замес теста на воде с внесением фитолина и смеси, полученной на первом этапе, растительного масла, гидролизата коллагена, влагоудерживающей добавки. Замес теста продолжали до получения однородной массы. Температура теста – комнатная. Влажность теста – 24–28%. Готовое тесто формовали. Отформованные тестовые заготовки укладывали на противень, застеленный пергаментной бумагой. Выпекание осуществляли в предварительно нагретом духовом шкафу при температуре 160 °С в течение 10–12 минут. По окончании выпечки печенье охлаждали на сетчатых поддонах при комнатной температуре. Схемы приготовления печенья по рецептуре 2–5 аналогичны схеме приготовления по рецептуре 1.

Оценка качества печенья для геродиетического питания. С целью определения влияния выбранных обогащающих ингредиентов на качество готового продукта выработаны модельные образцы печенья и проведена их оценка по органолептическим и физико-химическим показателям. Органолептический анализ печенья включал оценку вкуса и запаха, формы, внешнего вида, поверхности, цвета и вида в изломе. Введение обогащающих добавок в рецептуру печенья не повлияло на форму. Форма готовых изделий была правильной, и все образцы имели гладкую поверхность без вздутий и трещин. Однако введение фитолина повлияло на цвет теста и готовых изделий. Тесто опытных образцов при замесе приобретало светло-соломенный оттенок, интенсивность которого зависела от количества вводимой добавки фитолина, содержащей темноокрашенные полифенольные соединения. После выпечки готовые изделия приобретали светло-коричневый цвет, интенсивность которых повышалась с увеличением количества фитолина. Все образцы обладали рассыпчатой и пористой структурой, приятным вкусом и запахом. При внесении фитолина в количестве от 1,4 до 5% продукта вкус и запах печенья усиливались оттенками, соответствующими применяемой добавке. Значения щелочности, влажности и намокаемости образцов печенья соответствовали стандартным нормам. Образцы печенья имели влажность не более 10% и щелочность не более 2 град. Намокаемость печенья высокая, что обусловлено присутствием в рецептуре трегалозы, как влагоудерживающего агента и изомальта, способствующего уменьшению миграции влаги.

Заключение

В ходе разработки рецептуры и технологического процесса производства печенья для геродиетического питания было установлено, что:

– отличительной особенностью рецептуры разработанного печенья является полная замена сахара на натуральный сахарозаменитель изомальт, подсластитель – стевиозид, что будет способствовать снижению гликемического индекса этого изделия;

– высокое содержание коллагена в рецептуре является достоинством разработанного продукта, и обеспечит прием коллагена в количестве 25–80% от рекомендуемой суточной нормы, а использование коллагена в форме гидролизата повысит его усвояемость;

– добавление экстракта молотого сахарного тростника с выделенными полифинолами (фитолина) в рецептуру печенья позволит удовлетворить суточную потребность организма в флавонах на 20,5–73,5%, катехинах – на 5,5–19,5%, что повысит общую антиоксидантную защиту и устойчивость организма к негативным воздействиям внешней среды, и также снизит риск развития инсулинорезистентности;

– введение трегалозы в количестве 5–8% продукта, будет способствовать улучшению толерантности к глюкозе и замедлению прогрессирования инсулинорезистентности у потребителей;

– определенное оптимальное количество вводимых в рецептуру добавок, позволяет получить тесто с требуемыми пластичными свойствами.

В результате проведенных исследований разработано мучное кондитерское изделие – печенье геродиетической направленности, состав которого будет способствовать поддержанию здорового состояния коллагенсодержащих тканей организма, снижению риска развития сахарного диабета 2 типа и снижению гликемического индекса изделия. Научно обоснована и подобрана рецептура продукта, позволяющая получить продукт с высокими органолептическими показателями. Разработана технология печенья для геродиетического питания, адаптированная к фактическим условиям предприятий по производству мучной кондитерской продукции.

Литература

1. Горошко Н.В., Пацала С.В. Старение населения России: страна на фоне мира, регионы на фоне страны // Электрон. науч.-метод. журн. Омского ГАУ. 2020. № 3 (22). URL: http://ejournal.omgau.ru/images/issues/2020/3/00852.pdf (дата обращения: 05.11.2024).

2. Кочкорова Ф., Сомкулова Э. Роль питания в сохранении и укреплении здоровья пожилых и старых людей (обзор литературы) // Евразийский журн. здравоохранения. 2024. Т. 1. № 1. С. 108–116. doi: 10.54890/EHJ2024-1-108.

3. Соболь И.В., Родионова Л.Я. Разработка продуктов геронтологического питания повышенной пищевой ценности // Ползуновский вестн. 2021. № 2. С. 168–174. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.023.

4. Фелик С.В., Антипова Т.А., Андросова Н.Л. Отечественные ингредиенты в продуктах для геродиетического питания на молочной основе // Пищ. пром-сть. 2022. № 11. С. 29–32. doi: 10.52653/PPI.2022.11.11.007.

5. Божкова С.Е., Зворыгина А.С., Храмова В.Н., Суркова С.А. Ветчина для геродиетического питания // Аграр.-пищ. инновации. 2021. № 1 (13). С. 59–69. doi: 10.31208/2618-7353-2021-13-59-69.

6. Урубков С.А., Королёв А.А., Смирнов С.О. Пищевая ценность макаронных изделий на основе зернобобового сырья, предназначенных для лиц геронтологического профиля // Пищ. пром-сть. 2022. № 10. С. 71–75. doi: 10.52653/PPI.2022.10.10.016.

7. Урубков С.А., Королёв А.А., Смирнов С.О. Разработка рецептур каш и крупяных продуктов для диетического профилактического питания // Техн. и технол. пищ. пр-в. 2022. Т. 52. № 3. С. 536–544. doi: 10.21603/2074-9414-2022-3-2380.

8. Фелик С.В., Антипова Т.А., Симоненко С.В., Сидорова Е.В. Изучение пищевых предпочтений у людей пожилого возраста // Аграр.-пищ. инновации. 2019. № 3 (7). С. 77–85. doi: 10.31208/2618-7353-2019-7-77-85.

9. Бобрышева Т.Н., Анисимов Г.С., Золоторева М.С., Бобрышев Д.В., Будкевич Р.О., Москалев А.А. Полифенолы как перспективные биологически активные соединения // Вопр. питания. 2023. Т. 92. № 1. С. 92–107. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107.

10. Курдюков Е.Е., Плешакова Д.А., Глебова Н.Н., Неклюдова В.А., Водопьянова О.А., Гаранина Е.О. Флавоноиды: классификация, биологические свойства и перспективы использования в медицине // Междунар. науч.-исслед. журн. 2023. № 11 (137). С. 1–6. doi: 10.23670/IRJ.2023.137.143.

11. Корнякова В.В., Муратов В.А., Лацерус К.В. Использование полифенолов в медицине для профилактики и лечения заболеваний // Науч. обозрение. Мед. науки. 2024. № 2. С. 21–26.

12. Иванова Е.В., Лукша Е.А., Калинкина Г.И., Погодин И.С., Корнеева И.Н., Савченко И.А., Степанов А.Ф. Определение катехинов и лейкоантоцианов в надземной и подземной частях Aconogonon divaricatum L. // Вопр. биол., мед. и фармацевт. химии. 2017. Т. 20. № 3. С. 3–6.

13. Лукин А.А. Структурно-механические и химические особенности нативного коллагена // Междунар. сотрудничество: опыт, проблемы и перспективы. 2020. С. 51–54.

14. Трухан Д.И., Иванова Д.С. Гидролизованный морской коллаген в комплексной терапии дегенеративно-дистрофических изменений опорно-двигательного аппарата // Клинический разбор в общей медицине. 2023. Т. 4. № 8. С. 60–66.

15. Ших Е.В. Клинико-фармакологические аспекты применения гидролизованного коллагена второго типа для профилактики и лечения остеоартроза // Фармакология & Фармакотерапия. 2021. № 4. С. 10–18. doi: 10.46393/27132129_2021_4_10_18.

16. Яременко О.Б., Анохина Г.А., Бурьянов А.А. Сустав. Хрящ. Коллаген // Травма. 2020. Т. 21. № 4. С. 6–12. doi: 10.22141/1608-1706.4.21.2020.212531.

17. Mohammed A., He S. A double-blind, randomized, placebo-controlled trial to evaluate the efficacy of a hydrolyzed chicken collagen type II supplement in alleviating joint discomfort // Nutrients. 2021. V. 13. № 7. P. 2454–2468. doi: 10.3390/nu13072454.

18. León-López A., Pérez-Marroquín X.A., Campos-Lozada G., Campos-Montiel R.G., Aguirre-Álvarez G. Characterization of whey-based fermented beverages supplemented with hydrolyzed collagen: antioxidant activity and bioavailability // Foods. 2020. V. 9. № 8. P. 1106–1119. doi: 10.3390/foods9081106.

19. Щёкотова А.В., Хамагаева И.С., Замбалова Н.А., Столярова А.С. Разработка технологии пробиотического белкового десерта, обогащенного коллагеном и кальцием // Вестн. ВСГУТУ. 2019. № 1 (72). С. 5–12.

20. Жарыкбасова К.С., Жарыкбасов Е.С., Какимова Ж.Х., Раимханова Г.Н., Байкадамова А.М. Коллаген-содержащий концентрат в производстве молочных продуктов для спортивного питания // Вестн. ун-та Шакарима. Техн. науки. 2024. № 1 (13). С. 115–124. doi: 10.53360/2788-7995-2024-1(13)-15.

21. Хорошинина Л.П. Трегалоза – дисахарид, сохраняющий жизнь // Экспер. и клин. гастроэнтерология. 2022. № 198 (2). С. 139–147. doi: 10.31146/1682-8658-ecg-198-2-139-147.

22. Jain S., Singh R., Khare S. et al. Revolutionizing disease treatment through bioengineered probiotics and glucagon-like peptide 1 (GLP-1) based strategies: A path towards effective cures // Food Bioeng. 2024. V. 3. № 3. P. 280–300. doi: 10.1002/fbe2.12088.

23. Yoshizane C., Mizote A., Arai C., Arai N., Ogawa R., Endo S., Mitsuzumi H., Ushio S. Daily consumption of one teaspoon of trehalose can help maintain glucose homeostasis: a double-blind, randomized controlled trial conducted in healthy volunteers // Nutr. J. 2020. V. 19. № 1. P. 68. doi: 10.1186/s12937-020-00586-0.

24. Резниченко И.Ю., Щеглов М.С. Сахарозаменители и подсластители в технологии кондитерских изделий // Техн. и технол. пищ. пр-в. 2020. Т. 50. № 4. С. 576–587.

25. O'Donoghue L.T., Murphy E.G. Nondairy food applications of whey and milk permeates: Direct and indirect uses // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2023. V. 22. № 4. P. 2652–2677. doi: 10.1111/1541-4337.13157.

26. Ландиховская А.В., Творогова А.А. Показатели качества мороженого сливочного и пломбира с фруктозой и трегалозой // Пищ. пром-сть. 2022. № 8. С. 72–75. doi: 10.52653/PPI.2022.8.8.015.

27. Chen A., Tapia H., Goddard J.M., Gibney P.A. Trehalose and its applications in the food industry // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2022. V. 21. № 6. P. 5004–5037. doi: 10.1111/1541-4337.13048.

References

1. Goroshko N.V., Patsala S.V. Aging of the population of Russia: the country against the background of the world, regions against the background of the country. Electronic scientific-methodical journal of Omsk SAU. 2020. no. 3(22). URL: http://ejournal.omgau.ru/images/issues/2020/3/00852.pdf (in Russian)

2. Kochkorova F., Somkulova E. The role of nutrition in preserving and strengthening the health of elderly and old people (literature review). Eurasian Journal of Healthcare. 2024. vol. 1. no. 1. pp. 108–116. doi:10.54890/EHJ2024-1-108 (in Russian)

3. Sobol I.V., Rodionova L.Ya. Development of gerontological nutrition products with increased nutritional value. Polzunovsky vestnik. 2021. no. 2. pp. 168–174. doi:10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.023 (in Russian)

4. Felix S.V., Antipova T.A., Androsova N.L. Domestic ingredients in dairy-based gerodietetic nutrition products. Food industry. 2022. no. 11. pp. 29–32. doi:10.52653/PPI.2022.11.11.007 (in Russian)

5. Bozhkova S.E., Zvorygina A.S., Khramova V.N., Surkova S.A. Ham for gerodietetic nutrition. Agrarian and food innovations. 2021. no. 1(13). pp. 59–69. doi:10.31208/2618-7353-2021-13-59-69 (in Russian)

6. Urubkov S.A., Korolev A.A., Smirnov S.O. Nutritional value of pasta based on legume raw materials intended for gerontological profile individuals. Food industry. 2022. no. 10. pp. 71–75. doi:10.52653/PPI.2022.10.10.016 (in Russian)

7. Urubkov S.A., Korolev A.A., Smirnov S.O. Development of formulations of porridges and cereal products for dietary preventive nutrition. Technique and technology of food production. 2022. vol. 52. no. 3. pp. 536–544. doi:10.21603/2074-9414-2022-3-2380 (in Russian)

8. Felix S.V., Antipova T.A., Simonenko S.V., Sidorova E.V. Study of food preferences in elderly people. Agrarian and food innovations. 2019. no. 3(7). pp. 77–85. doi:10.31208/2618-7353-2019-7-77-85 (in Russian)

9. Bobrysheva T.N., Anisimov G.S., Zolotoreva M.S., Bobryshev D.V., Budkevich R.O., Moskalev A.A. Polyphenols as promising biologically active compounds. Nutrition issues. 2023. vol. 92. no. 1. pp. 92–107. doi:10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107 (in Russian)

10. Kurdyukov E.E., Pleshakova D.A., Glebova N.N., Neklyudova V.A., Vodopyanova O.A., Garagina E.O. Flavonoids: classification, biological properties and prospects for use in medicine. International scientific research journal. 2023. no. 11(137). pp. 1–6. doi:10.23670/IRJ.2023.137.143 (in Russian)

11. Kornyakova V.V., Muratov V.A., Latzerus K.V. Use of polyphenols in medicine for the prevention and treatment of diseases. Scientific review. Medical sciences. 2024. no. 2. pp. 21–26. (in Russian)

12. Ivanova E.V., Luksha E.A., Kalinkina G.I., Pogodin I.S., Korneeva I.N., Savchenko I.A., Stepanov A.F. Determination of catechins and leucoanthocyanins in the aboveground and underground parts of Aconogonon divaricatum L. Issues of biology, medicine and pharmaceutical chemistry. 2017. vol. 20. no. 3. pp. 3–6. (in Russian)

13. Lukin A.A. Structural-mechanical and chemical features of native collagen. International cooperation: experience, problems and prospects. 2020. pp. 51–54. (in Russian)

14. Trukhan D.I., Ivanova D.S. Hydrolyzed marine collagen in the complex therapy of degenerative-dystrophic changes of the musculoskeletal system. Clinical review in general medicine. 2023. vol. 4. no. 8. pp. 60–66. (in Russian)

15. Shikh E.V. Clinical and pharmacological aspects of the use of hydrolyzed type II collagen for the prevention and treatment of osteoarthritis. Pharmacology & Pharmacotherapy. 2021. no. 4. pp. 10–18. doi:10.46393/27132129_2021_4_10_18 (in Russian)

16. Yaremenko O.B., Anokhina G.A., Buryanov A.A. Joint. Cartilage. Collagen. Trauma. 2020. vol. 21. no. 4. pp. 6–12. doi:10.22141/1608-1706.4.21.2020.212531 (in Russian)

17. Mohammed A., He S. A double-blind, randomized, placebo-controlled trial to evaluate the efficacy of a hydrolyzed chicken collagen type II supplement in alleviating joint discomfort. Nutrients. 2021. vol. 13. no. 7. pp. 2454–2468. doi:10.3390/nu13072454

18. León-López A., Pérez-Marroquín X.A., Campos-Lozada G., Campos-Montiel R.G., Aguirre-Álvarez G. Characterization of whey-based fermented beverages supplemented with hydrolyzed collagen: antioxidant activity and bioavailability. Foods. 2020. vol. 9. no. 8. pp. 1106–1119. doi:10.3390/foods9081106

19. Shchekotova A.V., Khamagaeva I.S., Zambalova N.A., Stolyarova A.S. Development of technology for probiotic protein dessert enriched with collagen and calcium. Bulletin of VSUET. 2019. no. 1(72). pp. 5–12. (in Russian)

20. Zharykbasova K.S., Zharykbasov E.S., Kakimova Zh.Kh., Raimkhanova G.N., Baikadamova A.M. Collagen-containing concentrate in the production of dairy products for sports nutrition. Bulletin of Shakarin University. Technical sciences. 2024. no. 1(13). pp. 115–124. doi:10.53360/2788-7995-2024-1(13)-15 (in Russian)

21. Khoroshinina L.P. Trehalose - a disaccharide that preserves life. Experimental and clinical gastroenterology. 2022. no. 198(2). pp. 139–147. doi:10.31146/1682-8658-ecg-198-2-139-147 (in Russian)

22. Jain S., Singh R., Khare S. et al. Revolutionizing disease treatment through bioengineered probiotics and glucagon-like peptide 1 (GLP-1) based strategies: A path towards effective cures. Food Bioengineering. 2024. vol. 3. no. 3. pp. 280–300. doi:10.1002/fbe2.12088

23. Yoshizane C., Mizote A., Arai C., Arai N., Ogawa R., Endo S., Mitsuzumi H., Ushio S. Daily consumption of one teaspoon of trehalose can help maintain glucose homeostasis: a double-blind, randomized controlled trial conducted in healthy volunteers. Nutrition Journal. 2020. vol. 19. no. 1. p. 68. doi:10.1186/s12937-020-00586-0

24. Reznichenko I.Yu., Shcheglov M.S. Sugar substitutes and sweeteners in confectionery technology. Technique and technology of food production. 2020. vol. 50. no. 4. pp. 576–587. (in Russian)

25. O'Donoghue L.T., Murphy E.G. Nondairy food applications of whey and milk permeates: Direct and indirect uses. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2023. vol. 22. no. 4. pp. 2652–2677. doi:10.1111/1541-4337.13157

26. Landikhovskaya A.V., Tvorogova A.A. Quality indicators of cream ice cream and plombir with fructose and trehalose. Food industry. 2022. no. 8. pp. 72–75. doi:10.52653/PPI.2022.8.8.015 (in Russian)

27. Chen A., Tapia H., Goddard J.M., Gibney P.A. Trehalose and its applications in the food industry. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2022. vol. 21. no. 6. pp. 5004–5037. doi:10.1111/1541-4337.13048

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 технологи, 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 13/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 12/09/2025

Received 13/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 12/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-113-121 Оригинальная статья/Research article
УДК 639.371.7 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Технологические и биохимические свойства рыбных филе и фаршей из гибридов африканского клариевого сома для производства пищевых рыбопродуктов

Ольга Д. Сергазиева [1] o.sergazieva@ya.ru 0000-0002-2122-1318
Анастасия А. Климук [1] klimukanastasia27@gmail.com 0000-0002-1852-1045
Максим Д. Царьков [1] maks607@inbox.ru 0009-0008-8879-4541

1 Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия

Аннотация. На сегодняшний день безусловный интерес представляет расширение ассортимента рыбопродукции за счет вовлечения в массовое производство новых видов сырья из пресноводных рыб, в частности из африканского клариевого сома *Clarias gariepinus*. Популярность данной рыбы в мировой аквакультуре обоснована низкой себестоимостью при выращивании, высокой скоростью роста и неприхотливостью ко многим факторам внешней среды. Цель данной работы – изучение технологических, химических, реологических и биологических качеств филе и фаршей из гибридных африканских сомов и родительских групп, выращенных в условиях УЗВ. Результаты работы показывают, что гибриды первого поколения клариевого сома (михайловская × таманская) достигли массы не менее 1450 г за 8 месяцев выращивания. Выявлено, что гибридные экземпляры превосходят родительские формы по ряду морфометрических показателей – абсолютной и промысловой длине, длине головы и длине тушки. Показано, что гибридные сомы демонстрируют улучшенные технологические показатели: выход тушки 51% (800 г) и филе с кожей 32,5% (500 г). Анализ химического состава филе и фаршей при различных условиях хранения показал, что в рыбе-сырце, охлажденной пробе и фарше гибридной группы уровень белка и жира составляет не менее 20 и 3,4%, михайловской 18,3 и 4,0%, таманской – 18,9 и 5,0%. По результатам исследования установлено, что гибриды *C. gariepinus* обладают улучшенными технологическими характеристиками, а получаемая рыбная продукция повышенными биологическими свойствами, что крайне перспективно для товарной аквакультуры.

Ключевые слова: технологические характеристики, гибриды, африканский сом, филе, белок.

Technological and biochemical properties of fish fillets and minced meats from hybrids of african catfish for the production of food fish products

Olga D. Sergazieva [1] o.sergazieva@ya.ru 0000-0002-2122-1318
Anastasia A. Klimuk [1] klimukanastasia27@gmail.com 0000-0002-1852-1045
Maxim D. Tsarkov [1] maks607@inbox.ru 0009-0008-8879-4541

1 K. G. Razumovsky Moscow State University of technology and management (First Cossack University), Zemlyanoy Val St., 73, Moscow, 109004, Russia

Abstract. Currently, there is clear interest in expanding the range of fish products by introducing new types of freshwater fish raw materials into mass production, particularly the African sharptooth catfish Clarias gariepinus. The popularity of this fish in global aquaculture is due to its low production costs, high growth rate, and tolerance to many environmental factors. The aim of this study was to investigate the technological, chemical, rheological, and biological properties of fillets and minced meat from hybrid African catfish and their parental groups raised in a recirculating aquaculture system (RAS). The results show that first-generation sharptooth catfish hybrids (Mikhailovskaya × Tamanskaya) reached a minimum weight of 1,450 g within 8 months of rearing. Hybrid specimens were found to outperform their parental forms in a number of morphometric parameters, including absolute and commercial length, head length, and body length. Hybrid catfish demonstrated improved processing properties: a carcass yield of 51% (800 g) and skin-on fillet yield of 32.5% (500 g). Analysis of the chemical composition of fillets and minced meats under various storage conditions revealed that the protein and fat levels in the raw fish, chilled sample, and minced meat of the hybrid group were at least 20% and 3.4%, respectively; in the Mikhailovskaya group, 18.3% and 4.0%, and in the Taman group, 18.9% and 5.0%. The study found that C. gariepinus hybrids possess improved processing characteristics, and the resulting fish products have enhanced biological properties, which holds great promise for commercial aquaculture.

Keywords: technological characteristics, hybrids, African catfish, fillet, protein.

Для цитирования
Сергазиева О. Д., Климук А.А., Царьков М.Д. Технологические и биохимические свойства рыбных филе и фаршей из гибридов африканского клариевого сома для производства пищевых рыбопродуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 113–121. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-113-121

For citation
Sergazieva O. D., Klimuk A.A., Tsarkov M. D. Technological and biochemical properties of fish fillets and minced meats from hybrids of african catfish for the production of food fish products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 113–121. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-113-121

© 2025, Сергазиева О.Д. и др. / Sergazieva O.D. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Рыбное сырье представляет собой сложную многокомпонентную систему, характеризующуюся значительной изменчивостью химического состава, физико-химических свойств и структурных характеристик, что нередко обуславливает нестабильность качества, пищевой и биологической ценности конечной продукции [1]. Для того, чтобы избежать значительных изменений в качестве рыбного сырья, необходимо контролировать не только внешние условия, корма и кормление рыб, но и учитывать происхождение популяции, качественные характеристики родительских линий, степень гетерозиготности. Получение гибридов первого поколения является общеизвестной практикой повышения продуктивности за счет появления гетерозигот не только в аквакультуре, но и в животноводстве и растениеводстве. Признанными успешными гибридами рыб являются бестер (белуга + стерлядь), карасекарпы (серебряный карась + карп) и многие другие виды, традиционно выращиваемые в России [2, 3].

Одним из популярных объектов аквакультуры, активно культивируемым в странах Азии, Африки, Европы и Южной Америки, является африканский клариевый сом (*Clarias gariepinus*) [4, 5]. Мясо данного вида отличается диетическими свойствами, низким содержанием костей и высокой степенью технологической переработки, не требующей значительных энергетических и трудовых затрат. В реестре пород сельскохозяйственных животных, утверждённом Министерством сельского хозяйства Российской Федерации, зарегистрированы две породы африканского клариевого сома (*Clarias gariepinus*) – михайловская (пат. № 9064) и таманская (пат. № 10639). Представители таманской породы успешно культивируются в прудовых хозяйствах Краснодарского края благодаря повышенной устойчивости к низким температурам воды. В то же время михайловская порода отличается максимальным выходом товарной продукции, что делает её особенно перспективной для переработки. В России за последние годы отмечается рост интереса к выращиванию африканского сома в условиях установок с замкнутым циклом водообеспечения (УЗВ), как в качестве основного, так и дополнительного объекта. Однако в большинстве случаев производство осуществляется на малых предприятиях, ориентированных преимущественно на коммерческий результат (ООО «Агроферма Липецк», ИП Камешкова Е.В., ИП Шумов В.И. и др.). Существенной проблемой является отсутствие достоверной информации у многих поставщиков о происхождении особей-производителей, используемых для получения рыбопосадочного материала [6]. Это может приводить к снижению темпов роста, уменьшению выхода конечной продукции, а также к отклонениям в химическом составе и органолептических показателях рыбного сырья от установленных нормативных требований.

Для минимизации негативных последствий, связанных с использованием посадочного материала, не соответствующего технологическим нормативам, важно обеспечить стабильный спрос со стороны рыбоводных хозяйств на молодь, полученную на основе внедрения в производство гибридных гетерозиготных линий с установленным и контролируемым происхождением. Известно, что гибридные формы рыб, как правило, превосходят родительские формы по ключевым биологическим и хозяйственным признакам. Это проявляется в достоверном увеличении темпов роста, повышении выживаемости и устойчивости к неблагоприятным факторам среды [7]. Кроме того, при технологической переработке гибридного сырья отмечается более высокий выход съедобных частей, что положительно сказывается на эффективности производства и качестве конечной продукции [3].

В связи с этим целью настоящего исследования стало изучение технологических, химических, реологических и биологических свойств филе и рыбных фаршей, полученных от гибридных форм африканского сома, а также от родительских линий – пород михайловская и таманская, выращенных в условиях УЗВ.

Материалы и методы

Исследования были проведены на базе уникальной научной установки (УНУ) НТИ РФ Рег. № 3662433 – «Научно-исследовательский комплекс передовых технологий аквакультуры и гидроэкологии» факультета биотехнологий и рыбного хозяйства ФГБОУ ВО «МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)».

Объектом исследования являлись одновозрастные (8 мес.) гибридные особи африканского сома *Clarias gariepinus*, полученные путем скрещивания двух пород (♀ михайловская • ♂ таманская), а также родительские линии пород михайловская и таманская. Сомов содержали в трех изолированных бассейнах УЗВ объемом 4 000 л: михайловская группа (ср. масса 1320 ± 26 г, длина 53,4 ± 3,1 см), плотность посадки 16,8 кг/м^3; таманская группа (ср. масса 1290 ± 32 г, длина 57,6 ± 2,2 см), плотность посадки 28,3 кг/м^3; гибриды (ср. масса 1540 ± 73 г, длина 61,1 ± 3,4 см), плотность посадки 20 кг/м^3. Кормление производилось 2 раза/сут в соответствии с нормативными таблицами с применением экструдированного комбикорма для сомов марки GROWER-13 EF (4,5 мм).

Анализ рыбопродукции проводили на средней пробе, составляющей 10 % от общего количества особей в каждой исследуемой группе, с использованием метода случайного отбора здоровых, не имеющих видимых повреждений и аномалий рыб согласно требованиям ГОСТ 31339–2006. Перед обработкой рыбу седатировали в растворе гвоздичного масла с концентрацией 0,05 % до достижения полной иммобилизации, после чего тщательно промывали проточной водой и удаляли слизь с поверхности тела. Размерно-массовые показатели (масса, длина, толщина тела) определяли в соответствии с ГОСТ 7631–2008. Выход съедобных и несъедобных частей рассчитывали по массе соответствующих частей после разделки, согласно методике, установленной ГОСТ 7631–2008. Перед проведением химических анализов рыбу подвергали филетированию, мякоть измельчали на мясорубке с диаметром отверстий решетки 3 мм, затем тщательно перемешивали и формировали среднюю пробу рыбного фарша, составляющую 10% от общего объёма полученного филе, в соответствии с требованиями ГОСТ 31339–2006.

Для товароведного анализа и оценки качественного и химического составов при различных условиях хранения пробы свежего рыбного филе и фарша охлаждали при температуре от 0 до +4 °С без использования льда в холодильной камере (КХН – 1,28 Minicella MM, Россия) в течение 4 ч. Замораживание проводили способом медленной заморозки при температуре ниже -18 °С в морозильной камере (Polair CB107-S, Россия) при умеренных скоростях снижения температуры.

Химический состав мяса рыб нескольких категорий (рыба-сырец, сырой фарш, охлажденная, замороженная) определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 7636–85. Исследовали содержание белка, жира, золы, влаги, а также влагоудерживающую способность (ВУС). Содержание белка устанавливали по методу Къельдаля в соответствии с ГОСТ 25011–2017. Массовую долю жира определяли экстракционным методом Сокслета с использованием спирт-хлороформной смеси по ГОСТ 13496.18–85. Содержание минеральных веществ (зольность) определяли путём сожжения пробы в муфельной печи (ПМ-700, Россия) при температуре 550 °С до достижения постоянной массы и однородного серого цвета золы. Содержание влаги определяли гравиметрическим методом путём высушивания навески массой 5 г в галогенном анализаторе влажности (HE53, Германия) до постоянного веса. ВУС оценивали по методике [8].

Статистическую обработку проводили с использованием двух непараметрических тестов: критерия Краскела-Уоллиса и post-hoc теста Данна. Результаты представлены в виде средних значений ± стандартное отклонение. Все статистические анализы были выполнены в программе GraphPad Prism version 9.0 software (GraphPad, San Diego, CA, USA). Рисунки подготовлены в графическом редакторе Adobe Illustrator 2022.

Результаты

Согласно результатам морфометрического анализа, гибриды F1 пород михайловская и таманская за 8 месяцев выращивания достигли массы не менее 1450 г и длины 58 см (рисунок 1а). Как видно из данных таблицы 1, гибридная группа превосходит таманскую породу по абсолютной и промысловой длине на 11,5 и 11,1% ($p < 0,05$). Доля головы у михайловской породы существенно ниже, чем у гибридной и таманской групп – в 1,3 и 1,2 раза соответственно. По длине тушки гибриды превышают михайловскую породу на 18,1%, а таманскую – на 15,9%. По высоте тела гибриды не отличаются от михайловской породы, но превышают таманскую в 1,4 раза. Обхват тела у таманской и гибридной групп достоверно не различается, тогда как у михайловской он на 14,2% ниже, чем у гибридов. Длина хвостового плавника сходна во всех исследуемых группах.

Таблица 1.

Морфометрические показатели особей исследуемых групп

Table 1.

Morphometric parameters of individuals of the groups

Показатель | Indicator	Группа | Group		
	Михайловская Mikhailovskaya (n = 20)	Таманская Tamanskaya (n = 20)	Гибриды Hybrids (n = 20)
Абсолютная длина, см | Absolute length, cm	57,6 ± 1,4 ^{ab}	54,0 ± 2,1 ^{b}	61,0 ± 3,1 ^{a}
Промысловая длина, см | Commercial length, cm	51,2 ± 1,6 ^{ab}	48,0 ± 2,4 ^{b}	54,0 ± 3,0 ^{a}
Длина головы, см | Head length, cm	11,0 ± 1,1 ^{b}	14,5 ± 0,7 ^{a}	13,5 ± 0,9 ^{a}
Длина хвостового плавника, см Length of the caudal fin, cm	5,0 ± 1,1	6,0 ± 1,0	7,0 ± 1,0
Длина тушки, см | Carcass length, cm	36,0 ± 0,5 ^{b}	37,0 ± 0,7 ^{b}	44,0 ± 0,4 ^{a}
Высота тела, см | Body height, cm	9,5 ± 0,3 ^{a}	6,1 ± 0,5 ^{b}	9,0 ± 0,5 ^{a}
Обхват тела (толщина), см | Body circumference (thickness), cm	18,0 ± 0,1 ^{b}	19,0 ± 0,3 ^{a}	21,0 ± 0,2 ^{a}

Примечание здесь и далее. a, b – обозначение достоверного отличия между группами при $p < 0,05$ согласно post-hoc тесту Данна
Note here and below. a, b – designation of a significant difference between groups at $p < 0.05$ according to Dunn's post-hoc test

На этапе переработки гибридные особи продемонстрировали превосходство по показателям выхода съедобных частей (табл. 2). Абсолютная масса гибридов составила не менее 1450 г. (рисунок 1б), что на 16,2% выше, по сравнению с михайловской, и на 14,3% с таманской породой. Выход порки у гибридов достигал не менее 1100 г. (в среднем 77,4% от абсолютной массы; рисунок 1в), достоверно не отличаясь от михайловской породы, но превышая таманскую на 7,2% ($p < 0,05$). Выход тушки у гибридов составил в среднем 800 г. (не менее 50%), что на 7,7% выше показателей таманской группы и сопоставимо с михайловской. Масса головы не различалась достоверно между группами, однако её относительный выход был наибольшим у михайловской породы – 32,8%, что в 1,64 и 1,18 раза превышает значения у гибридной и таманской групп соответственно. Масса филе с кожей была статистически значимо выше у гибридов (в среднем не менее 480 г.; рисунок 1е), однако процентный выход филе не различался между группами. По несъедобным частям, масса внутренностей и костей не имела достоверных различий. Масса и выход кожи были значительно выше у михайловской породы – по массе в 1,4 раза, по процентному выходу – в 1,4 и 1,1 раза по сравнению с таманской и гибридной группами соответственно. Масса плавников у гибридов и михайловской породы превышала таковую у таманской в 1,5 и 1,6 раза. Выход икры у гибридов составил 285,7 г, что в 2 раза превышает показатели родительских линий.

Химический анализ мяса проводили на филе без кожи (рисунок 1з). Образцы делили на равные части и подвергали различным видам обработки: охлаждению (рисунок 2б), замораживанию (рисунок 2в), приготовлению фарша (рисунок 2г). Свежие образцы (рыба-сырец и фарш) анализировали сразу после разделки (рисунок 2а).

Таблица 2.

Технологические характеристики африканских сомов исследуемых групп

Table 2.

Technological characteristics of African catfish of the groups

Показатель | Indicator		Михайловская Mikhailovskaya (n = 20)	Таманская Tamanskaya (n = 20)	Гибриды Hybrids (n = 20)
Абсолютная масса Absolute mass	Масса, г | Weight, g	1290,0 ± 32,0 ^{b}	1320,0 ± 26,0 ^{b}	1540,0 ± 73,0 ^{a}
	%, percent	100	100	100
Потрошеная рыба Gutted fish	Масса, г | Weight, g	1110,0 ± 45,8	947,6 ± 28,0	1196,6 ± 15,2
	%, percent	86,5 ± 7,4 ^{a}	71,8 ± 1,5 ^{b}	77,4 ± 1,8 ^{a}
Тушка Carcass	Масса, г | Weight, g	720,6 ± 4,1 ^{b}	630,0 ± 10,0 ^{b}	806,1 ± 11,0 ^{a}
	%, percent	56,2 ± 5,1 ^{a}	47,7 ± 1,3 ^{b}	51,7 ± 1,1 ^{a}
Голова Head	Масса, г | Weight, g	422,3 ± 24,0 ^{a}	464,3 ± 22,05 ^{b}	426,6 ± 20,8 ^{a}
	%, percent	32,8 ± 1,9 ^{a}	20,0 ± 1,9 ^{b}	27,6 ± 0,9 ^{ab}
Филе с кожей Fillet with skin	Масса, г | Weight, g	420,6 ± 16,7 ^{b}	432,8 ± 15,8 ^{b}	502,6 ± 20,2 ^{a}
	%, percent	32,7 ± 2,2	32,8 ± 0,7	32,5 ± 1,2
Внутренности Internals	Масса, г | Weight, g	110,3 ± 9,5	121,5 ± 0,5	237,1 ± 110,2
	%, percent	8,6 ± 0,8	1,6 ± 0,1	15,3 ± 12,0
Кожа Leather	Масса, г | Weight, g	79,0 ± 8,5 ^{a}	55,2 ± 2,4 ^{b}	54,8 ± 2,8 ^{b}
	%, percent	6,1 ± 0,7 ^{a}	4,2 ± 0,1 ^{b}	5,3 ± 0,2 ^{b}
Плавники Fins	Масса, г | Weight, g	25,7 ± 2,4 ^{a}	15,5 ± 0,7 ^{b}	23,7 ± 1,1 ^{a}
	%, percent	1,8 ± 0,3	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1
Кости Bones	Масса, г | Weight, g	153,5 ± 15,0	151,5 ± 7,8	161,6 ± 14,1
	%, percent	11,9 ± 1,0	11,5 ± 0,4	10,5 ± 0,7
Икра Caviar	Масса, г | Weight, g	138,3 ± 68,2 ^{b}	125,8 ± 36,1 ^{b}	285,7 ± 20,5 ^{a}
	%, percent	10,7 ± 4,9	9,5 ± 5,7	10,2 ± 6,8

Содержание белка в рыбе-сырце гибридной группы составило 20,6%, что на 10,2 и 8,25% выше показателей михайловской и таманской пород соответственно ($p < 0,05$; таблица 2) В охлаждённом филе содержание белка у гибридов (21,3%) превышало родительские линии на 14 и 8,9%. В замороженном филе уровень белка не различался между группами и составлял не менее 19,0%. В фарше гибридов содержание белка достигало 21,0%, что на 8,6 и 8% выше, чем у михайловской и таманской пород.

Жирность рыбы-сырца у гибридов составила не менее 3,4% – в 1,7 раза выше, чем у таманской породы, и сопоставима с михайловской (3,0%). В охлаждённом филе жирность гибридов (2,2%) превышала родительские линии в 1,1 раза. В замороженном филе наибольшее содержание жира отмечено у михайловской породы (4,0%), что на 25,0% и 27,5% выше показателей таманской и гибридной групп. В фарше наибольшую жирность имела таманская группа (5,0%), превышая михайловскую и гибридную в 1,6 и 1,9 раза соответственно.

Содержание минеральных веществ (золы) в рыбе-сырце у гибридов превышало показатели михайловской и таманской пород в 1,7 и 1,8 раза ($p < 0,05$).

В охлаждённом филе гибридов зольность была выше родительских линий в 2,46 и 2,13 раза. В замороженном филе зольность гибридов превышала таманскую в 1,68 раза, но не отличалась от михайловской. Наибольшую зольность имел фарш михайловской группы (0,34%), превышая таманскую в 2,6 раза. Максимальное содержание воды отмечено в свежем филе таманской породы (76,9%), что на 19,6 и 13,1% выше показателей михайловской и гибридной групп.

Аналогичная тенденция наблюдалась в охлаждённом филе. В замороженном сырье содержание воды не различалось и находилось в диапазоне 66,0–68,0%. В фарше влажность гибридов была выше михайловской и таманской на 21,8 и 13,1% соответственно.

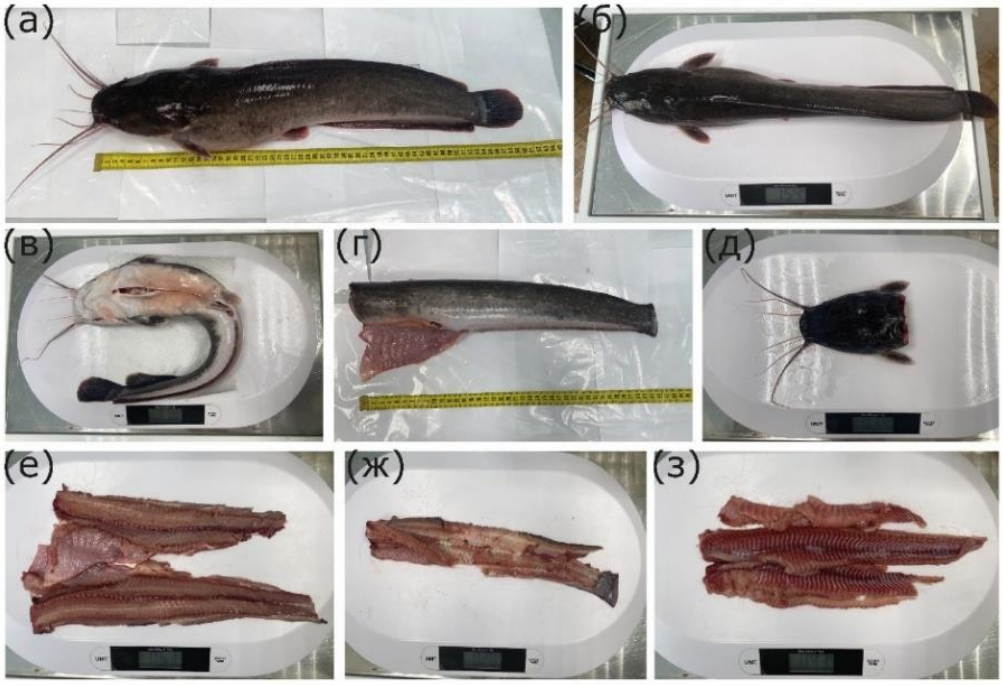


Рисунок 1. Основные этапы переработки гибридных особей африканского клариевого сома *C. gariepinus: а* – измерение длины целой рыбы, *б* – измерение массы целой рыбы, *в*-измерение массы порки, *г* – измерение длины тушки, *д* – измерение массы головы, *е* – измерение массы филе с кожей, *ж* – измерение массы костей, *з* – измерение массы филе без кожи

Figure 1. The main stages of processing of hybrid African sharptooth catfish *C. gariepinus*: a – measuring the length of the whole fish, b – measuring the weight of the whole fish, c – measuring the weight of the fillet, d – measuring the length of the carcass, d – measuring the weight of the head, e – measuring the weight of the fillet with skin, g – measuring the weight of the bones, h – measuring the weight of the fillet without skin

Влагоудерживающая способность (ВУС) рыбы-сырца была наибольшей у таманской группы (43,4%), превышая михайловскую и гибридную в 1,16 и 1,19 раз. В охлаждённых образцах филе гибридов и таманской ВУС – 39,5%, что достоверно превышало показатели михайловской (на 7,84%). В замороженном филе максимальная ВУС зафиксирована у михайловской группы (52,4%), что на 8,7% и 18,7% выше показателей таманской и гибридной. Фарш гибридной группы демонстрировал наибольшую ВУС (69,7%), превышая михайловскую на 13,9% и таманскую на 5,45% ($p < 0,05$).

Биологическая ценность мяса африканского сома исследуемых групп находилась на уровне: рыба-сырец 102,5 ккал (428,8 кДж); охлажденная 97,2 ккал (406,7 кДж); замороженная 104,0 ккал (435,1 кДж); фаршевые изделия 111,1 ккал (464,8 кДж).

Обсуждение

Африканский клариевый сом *Clarias gariepinus* на протяжении последних десятилетий занимает ведущие позиции в мировой аквакультуре благодаря высокой адаптивности к экстремальным условиям, интенсивным темпам роста и устойчивости к различным видам стрессоров [9, 10]. Однако для повышения экономической эффективности и качества товарной продукции всё чаще применяется гибридизация Clarias с видами рода Heterobranchus для получения гибридов, демонстрирующих гетерозис по ключевым товарным признакам и позволяющие в дальнейшем избежать инбредной депрессии [11].

Получение гибридов в аквакультуре обосновано экономически, поскольку способствует улучшению параметров выращивания: увеличению скорости роста, повышению выхода филе и снижению смертности от болезней.

В ходе исследования установлено, что гибриды F1 пород михайловская и таманская за 8 месяцев выращивания достигли массы не менее 1450 г. и длины 58 см, превосходя таманскую породу по абсолютной и промысловой длине. По длине тушки гибриды также превзошли родительские линии на 15–18%. Эти данные согласуются с результатами других исследований, в которых гибриды показали более высокие значения по линейным размерам и массе по сравнению с чистыми линиями *C. gariepinus* [11, 12]. В частности, в работе [11] отмечено, что гибридные формы демонстрируют значительный прирост массы за счёт гетерозиса, что подтверждается и в нашем исследовании.

На этапе переработки гибриды (михайловская • таманская) показали существенное преимущество. Выход тушки составил не менее 50% (в среднем 800 г), филе 32% (500 г). Эти результаты согласуются с исследованиями, посвященными гетерокляриям (гибридам *C. gariepinus* и *Heterobranchus longifilis*), в которых выход тушки и филе составил 68,3 и 53,9% соответственно, в то время как у чистых линий *C. gariepinus* – 60,4 и 49,1% [12]. Аналогичные значения выхода тушки *C. gariepinus* (69,95%) и филе (42,69%) были получены в работе [13]. Таким образом, более высокий выход съедобных частей у гибридов подтверждает их повышенную коммерческую ценность.

Содержание белка в рыбе-сырце у гибридов составило 20,6% – на 10,2 и 8,25% выше, чем у михайловской и таманской пород. В охлаждённом филе уровень белка у гибридов составил 21,3%, что также выше родительских линий. Эти показатели выше, чем в работах [10, 12] в которых содержание белка в филе *C. gariepinus* составило 18,0 и 16,8%, у гетерокларий – 17%. В работе [11] отмечена противоречивость данных по мясным характеристикам гибридов: если выход филе увеличивается на 8–12%, то содержание жира в мышцах снижалось на 25%, что может негативно сказываться на сочности и вкусовых качествах продукции. В нашем исследовании жирность гибридов в свежем филе составила 3,4%, что в 1,7 раза выше, чем у таманской породы (2,0%), и сопоставимо с михайловской (3,0%), что указывает на сохранение достаточного уровня липидов для обеспечения вкусовых свойств.

Таблица 3.

Результаты анализа филе и фаршевых изделий клариевого сома при нескольких способах хранения

Table 3.

Results of analysis of catfish fillets and minced products using several storage methods

Группа Group	Категория Category	Показатель | Indicator					
		Белки, % Proteins	Жиры, % Fats	Зола, % Ash	Вода, % Water	ВУС, % WHC	Калорийность, ккал / кДж Caloric, kcal / kJ
Михайловская Mikhailovskaya (n = 20)	Рыба-сырец Raw fish	18,5 ± 0,1 ^{b}	3,0 ± 0,01 ^{ab}	0,15 ± 0,01 ^{b}	61,8 ± 0,1 ^{b}	37,4 ± 0,1 ^{b}	101 / 424,2
	Охлажденная Chilled fillet	18,3 ± 0,2 ^{b}	2,0 ± 0,01 ^{b}	0,13 ± 0,01 ^{b}	63,5 ± 0,1 ^{b}	36,4 ± 0,1 ^{b}	91,2 / 383,0
	Замороженная Frozen fillet	19,1 ± 0,1	4,0 ± 0,01 ^{a}	0,22 ± 0,01 ^{ab}	66,7 ± 0,1	52,4 ± 0,1 ^{a}	112,4 / 472,0
	Фаршевые изделия Minced products	19,2 ± 0,1 ^{b}	3,0 ± 0,01 ^{b}	0,34 ± 0,01 ^{a}	60,1 ± 0,1 ^{b}	60,0 ± 0,1 ^{b}	103,8 / 435,9
Таманская Tamanskaya (n = 20)	Рыба-сырец Raw fish	18,9 ± 0,4 ^{b}	2,0 ± 0,01 ^{b}	0,14 ± 0,01 ^{b}	76,9 ± 0,1 ^{a}	43,4 ± 0,1 ^{a}	93,6 / 393,1
	Охлажденная Chilled fillet	19,4 ± 0,3 ^{b}	2,0 ± 0,01 ^{b}	0,15 ± 0,01 ^{b}	77,3 ± 0,1 ^{a}	39,5 ± 0,1 ^{a}	95,6 / 401,5
	Замороженная Frozen fillet	19,6 ± 0,7	3,0 ± 0,01 ^{b}	0,16 ± 0,01 ^{b}	67,0 ± 0,1	47,8 ± 0,1 ^{ab}	96,4 / 404,8
	Фаршевые изделия Minced products	19,3 ± 0,2 ^{b}	5,0 ± 0,01 ^{a}	0,13 ± 0,01 ^{b}	62,0 ± 0,1 ^{b}	65,9 ± 0,1 ^{ab}	122,2 / 513,2
Гибриды Hybrids (n = 20)	Рыба-сырец Raw fish	20,6 ± 0,2 ^{a}	3,4 ± 0,01 ^{a}	0,26 ± 0,01 ^{a}	66,8 ± 0,1 ^{b}	36,3 ± 0,1 ^{b}	113 / 474,6
	Охлажденная Chilled fillet	21,3 ± 0,2 ^{a}	2,2 ± 0,01 ^{a}	0,32 ± 0,01 ^{a}	66,9 ± 0,1 ^{b}	39,5 ± 0,1 ^{a}	105 / 441,0
	Замороженная Frozen fillet	19,3 ± 0,3	2,9 ± 0,01 ^{b}	0,27 ± 0,01 ^{a}	68,4 ± 0,1	42,6 ± 0,1 ^{b}	103,3 / 433,8
	Фаршевые изделия Minced products	21,0 ± 0,1 ^{a}	2,6 ± 0,01 ^{b}	0,27 ± 0,01 ^{ab}	65,5 ± 0,1 ^{a}	69,7 ± 0,1 ^{a}	107,4 / 451,0

Сравнение с другими видами показывает, что содержание белка и жира в мясе *C. gariepinus* варьирует в зависимости от условий выращивания и генетики. По данным [9], содержание белка у *C. gariepinus* составляет 16,8–17,42%, жира – 5,3–5,7%, что соответствует категории среднежирных рыб [14]. В нашем исследовании аналогичные значения получены для михайловской и таманской пород (17% белка, 3–4% жира), что подтверждает достоверность методики. В то же время, в работе [15] не выявили существенных различий в содержании белка между *C. gariepinus* и *H. longifilis*, но зафиксировали более высокое содержание жира у *H. longifilis*, особенно при высокой плотности посадки. У гибридов в нашем исследовании наблюдалось повышенное содержание белка и умеренное – жира, что сочетает преимущества обеих родительских линий.

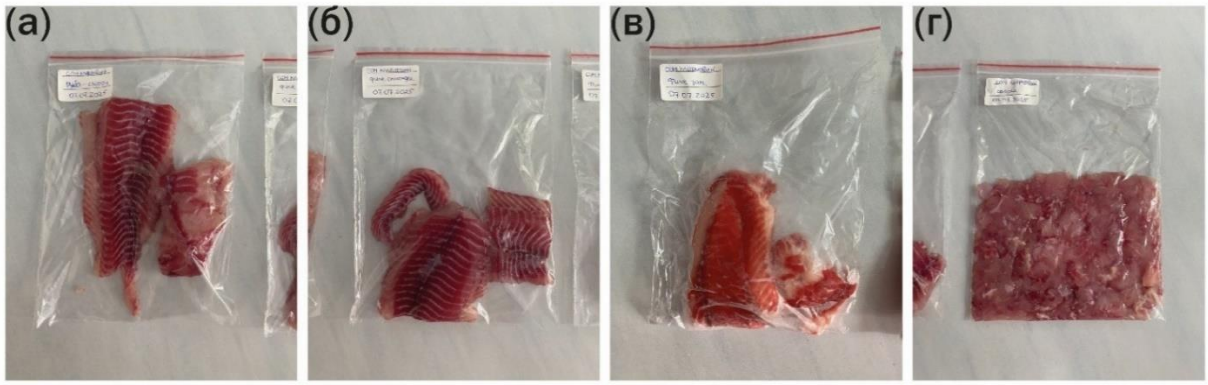


Рисунок 2. Образцы филе гибридного африканского клариевого сома: *а* – рыба-сырец, *б* – охлажденное филе, *в*-замороженное филе, *г* – фаршевые изделия

Figure 2. Samples of hybrid African catfish fillets: a – raw fish, b – chilled fillet, c – frozen fillet, d – minced products

Влагоудерживающая способность относится к ряду важных количественных характеристик рыбной продукции. Согласно работе [16], фарши с ВУС 65–70% могут быть использованы для приготовления колбасно-сосисочных изделий, с ВУС 50–65% – использоваться для изготовления кулинарных изделий (котлет, биточков и пр.). По результатам нашего исследования, ВУС рыбы-сырца африканских сомов исследуемых групп находилась в диапазоне 37–43%, охлажденного филе 36–39%, замороженного 42–52%. ВУС фаршей родительских линий 65–66%, гибридной группы 69,7%, что предполагает широкое использование этого сырья в производстве рыбопродукции [17].

Таким образом, полученные результаты согласуются с международными данными – гибридные формы африканского клариевого сома превосходят родительские по росту, выходу съедобных частей и содержанию белка. В полученных нами результатах в мясе гибридных рыб сохранен оптимальный баланс белка и жира, что положительно сказывается на потребительских качествах продукции. Высокие технологические и биохимические показатели филе гибридов F1 пород михайловская и таманская подтверждают их перспективность для промышленного выращивания и переработки.

Выводы

Гибриды F1 африканского клариевого сома (михайловская × таманская) обладают повышенной скоростью роста – абсолютная масса составила не менее 1450 г за 8 месяцев выращивания, что на 16,2% выше по сравнению с михайловской, и на 14,3% с таманской породой; выход тушки составил не менее 50% (в среднем 800 г), филе 32% (500 г).

Анализ химического состава филе и фаршей при различных условиях хранения показал, что в рыбе-сырце, охлажденной пробе и фарше гибридной группы уровень белка и жира составляет не менее 20,0 и 3,4%, у родительских линий михайловской породы 18,3 и 4,0%, таманской – 18,9 и 5,0%;

Гибриды F1 пород михайловская и таманская демонстрируют комплексное преимущество по морфометрическим, технологическим и химическим показателям. Высокие темпы роста, увеличенный выход съедобных частей, повышенное содержание белка и минеральных веществ, а также удовлетворительные показатели ВУС и энергетической ценности подтверждают перспективность использования данных гибридов в промышленной аквакультуре и рыбопереработке.

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 25–26–00181.

Литература

1 Чернышова О.В., Цибизова М.Е. Технохимический состав и функционально-технологические свойства недоиспользуемого рыбного сырья Волго-Каспийского бассейна // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыб. хоз-во. 2012. № 2. С. 189–194.

2 Нечипорук Т.В., Лебенгарц Я.З., Плиева Т.Х. Увеличение продуктивности водоемов за счет добавочной рыбы в условиях 1 зоны рыбоводства // Вестн. ОрелГАУ. 2017. № 4. С. 67–72.

3 Арнаутов М.В., Артемов Р.В., Бурлаченко И.В., Артемов А.В. и др. Технологические характеристики межвидовых гибридов осетровых рыб, выращиваемых в условиях УЗВ // Актуал. вопр. рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экол. мониторинга водных экосистем. 2018. С. 17–20.

4 Климук А.А., Бекетов С.В., Калита Т.Л. Физиолого-экологические особенности выращивания африканского клариевого сома Clarias gariepinus // Усп. совр. биол. 2024. Т. 144. № 6. С. 705–716. doi: 10.31857/S0042132424060075.

5 Libisch B., Sándor Z.J., Keresztény T., Ozoaduche C.L. et al. Effects of Short-Term Feeding with Diets Containing Insect Meal on the Gut Microbiota of African Catfish Hybrids // Animals. 2025. V. 15. № 9. P. 1338.

6 Соколова А.Г. Мероприятия по совершенствованию разведения племенных рыб // Каспий и глобальные вызовы. 2022. С. 497–500.

7 Четвертакова Е.В., Енгоян А.В., Красулина М.А. Зимнее содержание сибирского осетра (Acipenser baerii Brandt) с пищевой депривацией в установках замкнутого водоснабжения // Вестн. Краснояр. гос. аграр. ун-та. 2022. № 11 (188). С. 158–164.

8 Куприй А.С., Дунченко Н.И., Волошина Е.С. Научно-технические перспективы для создания ресурсоэффективных технологий в рыбной промышленности // Современные достижения биотехнологии. Глобальные вызовы и актуальные проблемы переработки и использования вторичных сырьевых ресурсов агропромышленного комплекса России. 2021. С. 145–148.

9 Abdel-Mobdy H.E., El-Laithy N., Ahmed A.H., Rashed M.A., Salem M.M. Nutritional value of African catfish (Clarias gariepinus) meat // Asian J. Appl. Chem. Res. 2021. V. 8. № 2. P. 31–39.

10 Gebremichael A., Szabó A., Sándor Z.J., Nagy Z. et al. Chemical and Physical Properties of African Catfish (Clarias gariepinus) Fillet Following Prolonged Feeding with Insect Meal-Based Diets // Aquac. Nutr. 2023. V. 2023. P. 6080387.

11 Wilfred-Ekprikpo P. Comparative Study of Africa Catfish Clarias gariepinus, Heterobranchus longifilis and Their Hybrid Growth Performance Reared in Concrete Tanks // Amer. Geophys. Union, Ocean Sci. Meet. 2024. P. F44A-0331.

12 Sobczak M., Panicz R., Sadowski J., Półgęsek M. et al. Does Production of Clarias gariepinus × Heterobranchus longifilis Hybrids Influence Quality Attributes of Fillets? // Foods. 2022. V. 11. № 14. P. 2074.

13 Hematyar N., Bahmani Z., Larsen B.K., Sloth J.J. et al. Considering two aspects of fish welfare on African catfish (Clarias gariepinus) fillet throughout postmortem condition: efficiency and mechanisms // Foods. 2022. V. 11. № 24. P. 4090.

14 Wei W., Jia M., Du Q., Liu J., Sui Z. The potential of marine oils as functional foods: Nutritional composition, health benefits, applications, and future perspectives // Food Rev. Int. 2025. P. 1–32.

15 Basharat H., Shah S.M.H., Salam A., Ali U., Ullah S. Growth and production characters of African catfish (Clarias gariepinus) stocked at different stocking densities in earthen ponds under local climatic conditions of Pakistan // Sarhad J. Agric. 2024. V. 40. № 2. P. 637–645.

16 Богданов В.Д., Волотка Ф.Б. Функционально-технологические свойства дальневосточной красноперки и кефали-лобана // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 280–292.

17 Бредихина О.В., Зарубин Н.Ю., Строкова Н.Г. Технологии функциональных пищевых продуктов на основе рыбного фарша с использованием методов биотехнологии // Актуал. биотехнол. 2020. № 3 (34). С. 177–179.

18 Heikal Z., Megahed R., Barakat S., Gamil A. Quality Properties of African Catfish (Clarias gariepinus) Meat as Affected by its Color // Assiut J. Agric. Sci. 2024. V. 55. № 2. P. 93–110.

19 Menchynska A., Zadorozhna V., Svyrydenko D., Krushelnytska N. et al. Quality characteristics of fish sausages made from African catfish (Clarias gariepinus) // Anim. Sci. Food Technol. 2024. V. 15. № 1. P. 74–90.

20 El-Gendy N.M., Amer A., Ibrahim H.A. Physico-Chemical and Sensory Assessment of Local and Imported Catfish Fillets // Alex. J. Vet. Sci. 2024. V. 80. № 1. P. 1–12.

References

1 Chernyshova O.V., Tsibizova M.E. Technochemical composition and functional-technological properties of underutilized fish raw materials from the Volga-Caspian basin. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. 2012. no. 2. pp. 189–194. (in Russian)

2 Nechiporuk T.V., Lebengarts Ya.Z., Plieva T.Kh. Increasing the productivity of water bodies due to additional fish in the conditions of the 1st fish farming zone. Bulletin of OrelSAU. 2017. no. 4. pp. 67–72. (in Russian)

3 Arnautov M.V., Artemov R.V., Burlachenko I.V., Artemov A.V. et al. Technological characteristics of interspecific hybrids of sturgeon fish grown in recirculating aquaculture systems. Current issues of fisheries, fish farming (aquaculture) and environmental monitoring of aquatic ecosystems. 2018. pp. 17–20. (in Russian)

4 Klimuk A.A., Beketov S.V., Kalita T.L. Physiological and ecological features of growing African sharptooth catfish Clarias gariepinus. Biology Bulletin Reviews. 2024. vol. 144. no. 6. pp. 705–716. doi: 10.31857/S0042132424060075 (in Russian)

5 Libisch B., Sándor Z.J., Keresztény T., Ozoaduche C.L. et al. Effects of Short-Term Feeding with Diets Containing Insect Meal on the Gut Microbiota of African Catfish Hybrids. Animals. 2025. vol. 15. no. 9. p. 1338. doi: 10.3390/ani15091338

6 Sokolova A.G. Measures to improve the breeding of pedigree fish. Caspian Sea and Global Challenges. 2022. pp. 497–500. (in Russian)

7 Chetvertakova E.V., Engoyan A.V., Krasulina M.A. Winter keeping of Siberian sturgeon (Acipenser baerii Brandt) with food deprivation in recirculating aquaculture systems. Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University. 2022. no. 11 (188). pp. 158–164. (in Russian)

8 Kupriy A.S., DUNCHENKO N.I., Voloshina E.S. Scientific and technical prospects for the creation of resource-efficient technologies in the fish industry. Modern achievements of biotechnology. Global challenges and current problems of processing and use of secondary raw materials of the agro-industrial complex of Russia. 2021. pp. 145–148. (in Russian)

9 Abdel-Mobdy H.E., El-Laithy N., Ahmed A.H., Rashed M.A., Salem M.M. Nutritional value of African catfish (Clarias gariepinus) meat. Asian Journal of Applied Chemistry Research. 2021. vol. 8. no. 2. pp. 31–39.

10 Gebremichael A., Szabó A., Sándor Z.J., Nagy Z. et al. Chemical and Physical Properties of African Catfish (Clarias gariepinus) Fillet Following Prolonged Feeding with Insect Meal-Based Diets. Aquaculture Nutrition. 2023. vol. 2023. p. 6080387. doi: 10.1155/2023/6080387

11 Wilfred-Ekprikpo P. Comparative Study of Africa Catfish Clarias gariepinus, Heterobranchus longifilis and Their Hybrid Growth Performance Reared in Concrete Tanks. American Geophysical Union, Ocean Sciences Meeting. 2024. p. F44A-0331.

12 Sobczak M., Panicz R., Sadowski J., Półgęsek M. et al. Does Production of Clarias gariepinus × Heterobranchus longifilis Hybrids Influence Quality Attributes of Fillets? Foods. 2022. vol. 11. no. 14. p. 2074. doi: 10.3390/foods11142074

13 Hematyar N., Bahmani Z., Larsen B.K., Sloth J.J. et al. Considering two aspects of fish welfare on African catfish (Clarias gariepinus) fillet throughout postmortem condition: efficiency and mechanisms. Foods. 2022. vol. 11. no. 24. p. 4090. doi: 10.3390/foods11244090

14 Wei W., Jia M., Du Q., Liu J., Sui Z. The potential of marine oils as functional foods: Nutritional composition, health benefits, applications, and future perspectives. Food Reviews International. 2025. pp. 1–32. doi: 10.1080/87559129.2024.2426859

15 Basharat H., Shah S.M.H., Salam A., Ali U., Ullah S. Growth and production characters of African catfish (Clarias gariepinus) stocked at different stocking densities in earthen ponds under local climatic conditions of Pakistan. Sarhad Journal of Agriculture. 2024. vol. 40. no. 2. pp. 637–645. doi: 10.17582/journal.sja/2024/40.2.637.645

16 Bogdanov V.D., Volotka F.B. Functional and technological properties of Far Eastern redfin and flathead mullet. Izvestiya TINRO. 2013. vol. 173. pp. 280–292. (in Russian)

17 Bredikhina O.V., Zarubin N.Yu., Strokova N.G. Technologies of functional food products based on fish mince using biotechnology methods. Actual Biotechnology. 2020. no. 3 (34). pp. 177–179. (in Russian)

18 Heikal Z., Megahed R., Barakat S., Gamil A. Quality Properties of African Catfish (Clarias gariepinus) Meat as Affected by its Color. Assiut Journal of Agricultural Sciences. 2024. vol. 55. no. 2. pp. 93–110. doi: 10.21608/ajas.2024.285989.1308

19 Menchynska A., Zadorozhna V., Svyrydenko D., Krushelnytska N. et al. Quality characteristics of fish sausages made from African catfish (Clarias gariepinus). Animal Science and Food Technology. 2024. vol. 15. no. 1. pp. 74–90. doi: 10.31548/animal.1.2024.74

20 El-Gendy N.M., Amer A., Ibrahim H.A. Physico-Chemical and Sensory Assessment of Local and Imported Catfish Fillets. Alexandria Journal of Veterinary Sciences. 2024. vol. 80. no. 1. pp. 1–12. doi: 10.5455/ajvs.181143

Сведения об авторах

Ольга Д. Сергазиева к.с.-х.н., доцент, факультет биотехнологии и рыбного хозяйства, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), ул Земляной Вал, д. 73, г. Москва, Россия, o.sergazieva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-2122-1318

Анастасия А. Климук младший научный сотрудник Центр «Аквакультура», факультет биотехнологии и рыбного хозяйства, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), ул Земляной Вал, д. 73, г. Москва, Россия, klimukanastasia27@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1852-1045

Максим Д. Царьков инженер 1 категории Центр «Аквакультура», факультет биотехнологии и рыбного хозяйства, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия, maks607@inbox.ru
https://orcid.org/0009-0008-8879-4541

Information about authors

Olga D. Sergazieva Cand. Sci. (Agr.) Associate Professor, Faculty of Biotechnology and Fishery, Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University), Zemlyanoy Val St., 73, Moscow, 109004, Russia, o.sergazieva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-2122-1318

Anastasia A. Klimuk Junior Researcher, Aquaculture Center, Faculty of Biotechnology and Fisheries, Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University), Zemlyanoy Val St., 73, Moscow, 109004, Russia, klimukanastasia27@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-1852-1045

Maxim D. Tsarkov 1st category engineer, Aquaculture Center, Faculty of Biotechnology and Fishery, Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University), Zemlyanoy Val St., 73, Moscow, 109004, Russia, maks607@inbox.ru
https://orcid.org/0009-0008-8879-4541

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 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025
Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-122-128 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.696; 634.723 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Влияние зерно-черносмородиновой барды на свойства экструдированных кукурузно-рисовых хлебцев

Антон.Ю. Шариков [1] anton.sharikov@gmail.com 0000-0001-9483-5209
Алексей А. Голубев [1] 4953624495@mail.ru 0000-0002-3847-6472
Елена Н. Соколова [1] 4953624495@mail.ru 0000-0002-6084-7786
Мария В. Амелякина [1] foodbiotech@ya.ru 0000-0002-5138-6746
Елизавета Р. Крючкова [1] 4953624495@mail.ru 0000-0002-8012-0907
Виктор В. Иванов [1] foodbiotech@ya.ru 0000-0002-6492-7070

1 Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Самокатная улица, 4 Б, Москва, 111033, Россия

Аннотация. В работе изучено влияние зерно-черносмородиновой барды, вторичного сырьевого ресурса технологии дистиллятов, как ингредиента на параметры экструзии, структурно-механические и нутритивные характеристики хлебцев из кукурузно-рисовой смеси. Зерно-черносмородиновая барда была получена после дистилляции бражки, полученной в процессе ферментации смеси пшеницы и жмыха смородины после сокоотделения. Экструдирование смесей с добавлением 5–15 % барды протекало стабильно, с увеличением доли барды давление процесса снижалось с 2,3 до 1,9 МПа при отсутствии изменений температуры и момента сдвиговых деформаций. Отмечено уменьшение коэффициента вертикального расширения стренга с 9,7 до 7,3, что соответствует типичной реакции крахмалсодержащих смесей при введении некрахмальных компонентов. При этом твердость экструдатов не изменялась, а количество микроразломов возрастало с 10,9 до 13,2, что свидетельствует о формировании более равномерной и мелкопористой структуры с улучшенной хрусткостью. Оценка пищевой ценности хлебцев показывает, что добавление 15 % барды приводит к увеличению содержания белка на 69 %, пищевых волокон на 110 %, а фенольных соединений на 62 % по сравнению с контролем. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений выявило устойчивое превышение фактического содержания фенольных соединений над расчетным до 50 % при максимальной дозировке. Данный эффект обусловлен ферментативной обработкой жмыха смородины, а также термомеханическим воздействием экструзии, способствующими деструкции клеточных стенок и высвобождению связанных форм полифенолов. Полученные результаты подтверждают перспективность использования зерно-черносмородиновой барды в производстве экструдированных хлебцев как источника белка, пищевых волокон и полифенольных соединений. Применение данного ингредиента позволяет целенаправленно формировать улучшенный нутритивный и сенсорный профиль продуктов без ухудшения технологической устойчивости процесса.

Ключевые слова: дистиллят, черная смородина, кукуруза, рис, барда, экструзия, хлебцы, фенольные соединения .

Influence of grain–blackcurrant distillers' stillage on the properties of extruded corn–rice crispbreads

Anton Yu. Sharikov [1] anton.sharikov@gmail.com 0000-0001-9483-5209
Alexey A. Golubev [1] 4953624495@mail.ru 0000-0002-3847-6472
Elena N. Sokolova [1] 4953624495@mail.ru 0000-0002-6084-7786
Maria V. Amelyakina [1] foodbiotech@ya.ru 0000-0002-5138-6746
Elizabeth R. Kryuchkova [1] 4953624495@mail.ru 0000-0002-8012-0907
Viktor V. Ivanov [1] foodbiotech@ya.ru 0000-0002-6492-7070

1 All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4-B, Moscow, 111033,Russian Federation

Abstract. The study investigated the effect of grain–blackcurrant distillers' stillage as a secondary raw material of the distillation process on the extrusion parameters, structural–mechanical properties, and nutritional characteristics of corn–rice crispbreads. The stillage was obtained after distillation of mash produced by fermenting a mixture of wheat and blackcurrant pomace remaining after juice pressing. Extrusion of mixtures containing 5–15% stillage proceeded steadily; with an increase in its proportion, the process pressure decreased from 2.3 to 1.9 MPa without changes in temperature and torque. A reduction in the vertical expansion ratio of the strand from 9.7 to 7.3 was observed, which is typical for starch-containing systems when non-starch components are incorporated. At the same time, extrudate hardness remained unchanged, whereas the number of microfractures increased from 10.9 to 13.2, indicating the formation of a more uniform, fine-pored structure with improved crispness. Nutritional evaluation of the crispbreads demonstrated that the addition of 15% stillage increased protein content by 69%, dietary fiber by 110%, and phenolic compounds by 62% compared with the control. Comparison of calculated and experimental values revealed a consistent excess of actual phenolic content over theoretical estimates by up to 50% at the maximum dosage. This effect is attributed to the enzymatic treatment of blackcurrant pomace, as well as the thermomechanical action of extrusion, which facilitate the breakdown of cell walls and release of bound polyphenols. The results confirm the potential of grain–blackcurrant distillers' stillage as an ingredient for the production of extruded crispbreads enriched with protein, dietary fiber, and phenolic compounds. Incorporation of this resource allows for targeted improvement of the nutritional and sensory profile of products without compromising technological stability of the process.)

Keywords: distillate; blackcurrant; corn; rice; distillers' stillage; extrusion; crispbreads; phenolic compounds .

Для цитирования
Шариков А.Ю., Голубев А.А., Соколова Е.Н., Амелякина М.В., Ионов В.В., Иванов В.В. Влияние зерно-черносмородиновой барды на свойства экструдированных кукурузно-рисовых хлебцев // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 122–128. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-122-128

For citation
Shsrikov A.Yu., Golubev A.A., Sokolova E.N., Amelyakina M.V., Ionov V.V., Ivanov V.V. Influence of grain–blackcurrant distillers' stillage on the properties of extruded corn–rice crispbreads. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 122–128. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-122-128

© 2025, Шариков А.Ю. и др. / Shsrikov A.Yu. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Переориентация агропромышленного комплекса при переработке сырья с высокой пищевой ценностью и высоким содержанием биологически активных соединений на экологически устойчивое развитие делает особенно важными технологии комплексной переработки растительного сырья и рационального использования побочных продуктов в пищевом производстве [1, 2]. Например, технологии дистилляции с использованием плодово-ягодного сырья не только обеспечивают расширение номенклатуры напитков, но и создают возможности для получения и дальнейшего применения функционально ценных вторичных ресурсов [3, 4]. Сложный состав летучих соединений – терпены, фенолы, эфирные масла, органические кислоты – придает ягодным дистиллятам характерную сенсорную выразительность [5–7], а богатый антиоксидантный профиль ягод делает их особенно ценными в качестве функциональных ингредиентов [8, 9]. Полифенолы и другие биологически активные вещества ягод проявляют антиоксидантное и иммуномодулирующее действие, что способствует снижению риска развития хронических заболеваний и положительно влияет на функциональное состояние желудочно-кишечного тракта [10].

В настоящее время ведется разработка технологий зерно-фруктовых дистиллятов – напитков, сочетающих классические методы спиртового брожения зернового и плодового сырья и современные приемы дистилляции, обеспечивающие сохранение природного аромата и вкусового профиля сырья [11] [12]. Важным аспектом является возможность использования в качестве плодового-ягодного компонента жмыхов после отжима сока, что позволяет повысить рентабельность обработки за счёт рационального процесса переработки вторичных сырьевых ресурсов и эффективного их включения в дальнейшие производственные цепочки. Образуемая в результате спиртового брожения зерно-фруктовая барда может рассматриваться как потенциально функциональный ингредиент, пригодный к переработке в смеси с сельскохозяйственным сырьем и обладающий потенциалом повышения пищевой ценности продуктов. Эффективной технологией по переработке смесей с включением зернофруктовой барды является экструзия. Многочисленными исследованиями отмечается синергизм технологических решений, с одной стороны подразумевающих добавление вторичных ресурсов в экструдируемые смеси, а с другой стороны – их положительное влияние на химический состав экструдатов [13–15]. Как правило, экструдированные продукты из крахмалсодержащего сырья характеризуются низким содержанием пищевых волокон, особенно это касается изделий на основе рисовой и кукурузной муки. С учётом того, что процесс экструзии сопровождается выраженными макромолекулярными преобразованиями крахмала и, как следствие, повышением гликемического индекса готовых продуктов, использование зерно-фруктовой барды в качестве ингредиента, богатого пищевыми волокнами, представляется перспективным технологическим решением. Включение данного компонента в рецептуры экструдируемых смесей может способствовать увеличению содержания пищевых волокон и формированию продуктов с более благоприятным нутритивным профилем.

Цель исследования – определить влияние дозировки зерно-черносмородиновой барды на режимные параметры экструзии смеси кукурузной и рисовой муки, а также на физико-химические и нутриентные характеристики получаемых экструдированных хлебцев.

Материалы и методы

Барда зерно-черносмородиновая получена как вторичный сырьевой ресурс технологии дистиллятов. Гидролизат пшеничной муки после обработки ферментными препаратами термостабильной альфа-амилазы и ксиланазы в дозировке 1 и 0,5 ед./г крахмала, соответственно, подвергали тепловой обработке в течении 3-х часов при температуре 85–90 °С, по окончании процесса затор охлаждали до 58–60 °С и в него вносили черносмородиновый жмых, который предварительно подщелачивали 30%-ой щелочью до pH 4,5, обрабатывали ксиланазой (0,6 ед. КС/г крахмала) и пастеризовали в суховоздушном термостате 1 час при 68–70 °С. После осахаривания с использованием ферментных препаратов глюкоамилазы 15 ед. ГлС / г крахмала, грибной альфа-амилазы 1 ед. АС/г крахмала, кислой протеазы 0,5 ед. ПС/г крахмала в охлажденное до 35 °С сусло добавляли антисептик, дрожжи 10–15 млн/мл и проводили сбраживание при температуре 28–30 °С в течение 72 часов. После сбраживания в процессе получения дистиллята на первой стадии перегонки осуществляли процесс извлечения спирта и всех сопутствующих летучих примесей из бражки с получением промежуточного продукта – дистиллята неочищенного. Для перегонки использовали вакуумную кубовую установку с глубиной вакуума до 93 кПа, температурой паров 32–44 °С на разных этапах дистилляции [16, 17].

Полученную барду после дистилляции высушивали и добавляли в кукурузно-рисовую смесь в количестве 5–15%. Также в смесь вносили 1% стабилизатора карбоната кальция, соль и хлорид калия в количестве 0,25%. Хлорид калия использовали как частичную замену соли.

Экструдирование проводили с использованием двухшнекового экструдера Werner&Phleiderer Continua 37 через матрицу с формующим отверстием прямоугольного сечения 25 мм шириной, 1,1 мм высотой. Стренг экструдата нарезался на хлебцы режуще-тянущим устройством СР-150.

Коэффициент вертикального расширения стренга определяли, как соотношение толщины стренга, выходящего из фильеры, к высоте формующей щели матрицы.

При определении структурных свойств продукта использовали анализатор Brookfield CT3 Texture Analyser. На прибор устанавливалась металлическая насадка-индентор в виде иглы. В образец продукта погружали насадку-индентор на глубину прокола 4 мм со скоростью погружения насадки 0,5 мм/с и фиксировали ответную реакцию тензодатчика прибора в виде структурно-механических характеристик: твердости образца и количества микроразломов.

Изменение содержания белка осуществляли методом Кьельдаля на автоматической установке для определения азота Gerhardt Vadopest 10, пищевых волокон – ферментативно-гравиметрическим методом по ГОСТ Р 54014–2010. Содержание фенольных соединений определяли методом Фолина-Чокальтеу с использованием спектрофотометра Specord 50 Analytic Yena при длине волны 720 нм.

Метод однофакторного дисперсионного анализа и апостериорный анализ по критерию Тьюки с применением пакета программ Statistica 6.0 использовали для оценки достоверности различия средних при $p < 0,05$.

Обсуждение

Полученную после дистилляции зерно-черносмородиновую барду высушивали и в качестве ингредиента добавляли в экструдируемую смесь на основе рисовой и кукурузной муки, изменяя содержание от 5 до 15%. Изучено влияние дозировки барды на изменение параметров экструзии, проводимой в политропном режиме. Процесс экструзии всех смесей протекал устойчиво; выбранные параметры обеспечили клейстеризацию крахмала без признаков меланоидинообразования и подгорания экструдатов. Установлено, что увеличение дозировки зерно-черносмородиновой барды не оказывает значимого влияния на изменение температуры процесса и момент сдвиговых деформаций, при этом значимо снижается давление экструзии с 2,3 до 1,9 МПа (таблица 1). Поскольку удельный расход механической энергии является величиной, зависимой от момента сдвиговых деформаций, соответственно, изменения этого показателя процесса также не происходило. На рисунке 1 представлены фотографии образцов экструдированных хлебцев на основе рисово-кукурузной смеси.

Таблица 1.

Режимные параметры экструзии зерновых смесей с зерно-черносмородиновой бардой на основе рисово-кукурузной смеси

Table 1.

Parameters of extrusion of corn-rice mixtures with grain-blackcurrant stillage

% добавления зерно-черносмородиной барды % dosage of grain-blackcurrant stillage	Влажность смеси, % Moisture content, %	Температура экструзии, °С Temperature of extrusion, °С	Давление, Мпа Pressure, MPa	Момент сдвиговых деформаций, % Torque, %	Удельный расход механической энергии, кВт×час/кг Specific mechanical energy, kW×h/kg
0	15	165^{a}	2,3 ^{a}	48^{a}	0,122 ^{a}
5	15	165^{a}	2,2 ^{ab}	50^{a}	0,127 ^{a}
10	15	167^{a}	2,0 ^{bc}	50^{a}	0,127 ^{a}
15	15	165^{a}	1,9 ^{c}	49^{a}	0,124 ^{a}

Примечание: Различия между значениями, обозначенными одинаковыми буквенными индексами, в каждом столбце статистически незначимы при $p < 0.05$ /

Note: Means followed by the same letters within a column are not significantly different at $p < 0.05$

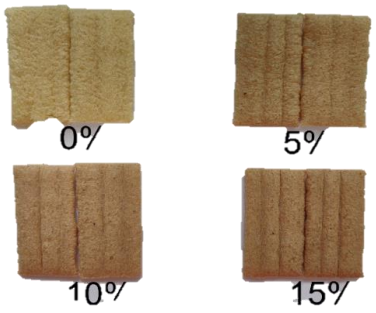


Рисунок 1. Фотографии хлебцев экструзионной технологии с различным уровнем внесения в рецептуру зерно-черносмородиновой барды

Figure 1. Crispbreads with the addition of grain-blackcurrant stillage

Оценка изменения структурно-механических характеристик полученных хлебцев показала, что внесение и увеличение содержания барды снизило коэффициент вертикального расширения стренга с 9,7 до 7,3. Это непротиворичивый эффект, отмечаемый для большинства экструдируемых крахмалсодержащих смесей с увеличивающейся долей некрахмальных твердых частиц и пищевых волокон, источником которых является зерно-фруктовая барда. В аспекте расширения стренга экструдата барда является водоудерживающим компонентом и дисперной фазой расплава, уменьшая долю свободной влаги и его эластичность. Вследствие этого ограничивается

рост размеров пор при выходе из отверстий матрицы экструдера. Отмечено отсутствие негативного влияния на текстурные характеристики экструдатов (таблица 2). Твердость не изменялась, показатель количества микроразломов, характеризующий пористость экструдатов, с добавлением барды значимо увеличился с 10,9 до 13,1–13,2. Этот эффект можно интерпретировать как формирование более мелкопористой и равномерной структуры с большим числом центров парообразования, которыми могут являться частицы клеточных стенок, пектинсодержащие фрагменты и др [18]. Снижение общего вспучивания стренга экструдата компенсируется увеличением количества межпоровых стенок, в результате чего твердость экструдата не меняется, а текстурная характеристика хрусткости увеличивается. Таким образом, повышение дозировки барды позволяет улучшить пористость и хрусткость экструдатов без потери механической стабильности изделий.

Таблица 2.

Структурно-механические характеристики экструдатов с зерно-черносмородиновой бардой на основе рисово-кукурузной смеси

Table 2.

Mechanical and textural properties of extrudates

% добавления зерно-черносмородиной барды % dosage of grain-blackcurrant stillage	Коэффициент линейного расширения стренга Vertical expansion index	Твердость, Н Hardness, N	Количество микроразломов Number of microfractures
0	9,7	0,9 a	10,9
5	8,6	1,1 a	13,1 a
10	8,2	0,75 a	13,2 a
15	7,3	0,9 a	13,1 a

Примечание: Различия между значениями, обозначенными одинаковыми буквенными индексами, в каждом столбце статистически незначимы при $p < 0.05$ /

Note: Means followed by the same letters within a column are not significantly different at $p < 0.05$

Зерно-черносмородиновая барда характеризуется высоким содержанием белка, пищевых волокон и фенольных соединений. Оценка изменения пищевой ценности экструдированных хлебцев показывает (таблица 3), что увеличение доли зерно-черносмородиновой барды (5–15%) сопровождается ростом содержания белка, пищевых волокон и фенольных соединений в экструдатах. В сравнении с контролем белок возрастает на 69 %, пищевые волокна на 110%, а суммарные фенольные соединения на 62%.

Таблица 3.

Оценка содержания отдельных нутриентов в образцах экструдированных хлебцев с зерно-черносмородиновой бардой

Table 3.

Evaluation of the content of individual nutrients in samples of extruded crispbread with grain-blackcurrant stillage

% добавления зерно-черносмородиновой барды % dosage of grain-blackcurrant stillage	Белок, г/100 г Protein, g/100 g	Пищевые волокна, г/100 г Dietary fibers, g/100 g	Фенольные вещества, мг/ кг Phenolic compounds, mg/kg
0	7,4	3,9	915,3
5	8,8	5,3	1223,3
10	10	5,9	1306,3
15	11,3	8,2	1479,6

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений содержания полифенольных соединений показывает устойчивое и нарастающее превышение фактических уровней над ожидаемыми: 30,5% при 5% барды, 36,0% при 10%, 50,5% при 15% (рисунок 2). Вероятными факторами такого эффекта являются предварительная ферментативная обработка жмыха смородины (ксиланаза, протеаза и др.) и брожение, частично разрушающие клеточные стенки, а также термомеханическое воздействие двухшнековой экструзии, дополнительно деструктирующее связанную полифенольную фракцию клеточного матрикса сырья.

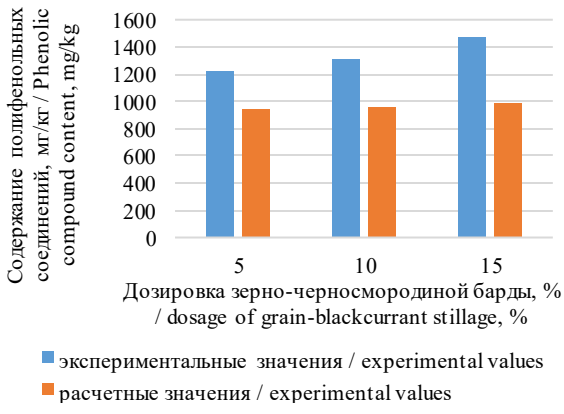


Рисунок 2. Содержание полифенольных соединений

Figure 2. The content of polyphenolic compounds

В целом совокупность показателей образует внутренне согласованную, логически непротиворечивую картину обогащения экструдированных хлебцев и указывает на возможность целенаправленного конструирования нутритивного профиля экструдатов за счёт дозирования зерно-черносмородиновой барды.

Опубликованные данные по влиянию экструзии на полифенольные фракции сельхозсырья [19] показывают двунаправленную природу изменений полифенолов при экструзии: с одной стороны, термолабильные соединения могут разрушаться, с другой – деструкция клеточной матрикса и распад высокомолекулярных комплексов повышают извлекаемость фенолов; итоговый баланс чувствителен к множеству факторов экструзионной переработки. В многокомпонентных системах описаны случаи увеличения количества полифенолов до ~180%, что также согласуется с полученными результатами.

Заключение

Полученные данные свидетельствуют о возможности использования черносмородиновой барды в качестве компонента, повышающего функциональную ценность экструдированных продуктов за счёт полифенольных соединений.

Разработаны рецептуры хлебцев экструзионной технологии, состав рецептуры которых включает пшеничную обойную муку, зерно-черносмородиновую барду, стабилизатор карбонат кальция, соль или рис, кукурузу, зерно-черносмородиновую барду, стабилизаторы карбонат кальция, хлорид калия, соль.

По результатам исследований разработан технологические решения и технологическая инструкция по производству экструдированной пищевой продукции с использованием зерно-черносмородиновой барды. Технология получения экструдированных хлебцев включает стадии формирования экструдируемой смеси, экструзии при температуре 140–160 °С, нарезки стренга экструдата, подсушки и упаковки хлебцев.

Благодарности

Работа проведена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания (тема № FGMF-2023–0004).

Литература

1 Iqbal A.S., Shulz P., Rizvi S. Valorization of bioactive compounds in fruit pomace from agro-fruit industries: Present Insights and future challenges // Food Bioscience. 2021. V. 44. P. 101384. doi: 10.1016/j.fbio.2021.101384.

2 Michalska-Ciechanowska A. A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products // Trends in Food Science & Technology. 2019. V. 88. P. 207–219. doi: 10.1016/j.tifs.2019.03.021.

3 Римарева Л.В., Серба Е.М., Соколова Е.Н., Игнатова Н.И., Фурсова Н.А. К вопросу о целесообразности использования ягод черной смородины для получения оригинальных зерно-фруктовых дистиллятов // Пищевая промышленность. 2023. № 5. С. 61–63. doi: 10.52653/PPI.2023.5.5.017.

4 Šimonėlienė A. Distillate composition from fermented black currant, aronia, rhubarb, apple, and raspberry wines // Mokslas taikomieji tyrimai Lietuvos kolegijose. 2023. V. 19. № 1. P. 246–252. doi: 10.59476/mtt.v1i19.593.

5 Guncheva R. Characteristic of species Morus alba L. and Morus nigra L. by some basic vegetative traits // Agricultural Science & Technology. 2024. V. 16. № 2. P. 18–24. doi: 10.15547/ast.2024.02.019.

6 Kelanne N., Yang B., Liljenbäck L., Laaksonen O. Phenolic compound profiles in black currant beverages fermented with yeasts // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2020. V. 68. № 37. P. 10128–10141. doi: 10.1021/acs.jafc.0c03354.

7 Patelski A.M., Dziekońska-Kubczak U., Ditrych M. The fermentation of orange and black currant juices by the probiotic yeast Saccharomyces cerevisiae var. boulardii // Applied Sciences. 2024. V. 14. № 7. P. 3009. doi: 10.3390/app14073009.

8 Dumitraşcu L., Patrascu L., Banu I., Ina V. The influence of processing on bioactive compounds of berries // Applied Sciences. 2024. V. 14. № 19. P. 8713. doi: 10.3390/app14198713.

9 Makarova N.V., Valiulina D.F., Eremeeva N.B. Comparative studies of extraction methods of biologically-active substances with antioxidant properties from grape seed (Vitis vinifera L.) // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. № 1. С. 140–148. doi: 10.21285/2227-2925-2020-10-1-140-148.

10 Saad A.M., El-Saadony M.T., El-Tarabily K.A., Abd El-Hack M.E. et al. Dietary polyphenols and human health: sources, biological activities, nutritional and immunological aspects, and bioavailability – a comprehensive review // Frontiers in Immunology. 2025. V. 16. P. 1653378. doi: 10.3389/fimmu.2025.1653378.

11 Серба Е.М., Игнатова Н.И., Соколова Е.Н., Микуляк А.А., Римарева Л.В. Обоснование перспективы использования плодово-ягодного сырья в производстве оригинальных дистиллятов // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № S5 (549). С. 256–257. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-5s-320.

12 Никитенко В.Д., Туршатов М.В., Соловьев А.О., Леденев В.П., Кононенко В.В., Абрамова И.М. Сравнительное исследование различных спиртовых дрожжей для улучшения технологических и органолептических характеристик зерно-яблочных дистиллятов // Крахмал и его производные. 2024. № 3 (5). С. 12–16.

13 Soja J., Combrzyński M., Oniszczuk T., Gancarz M., Oniszczuk A. Extrusion-Cooking and Physical Characteristics of Snacks Pellets with Addition of Selected Plant Pomace // Applied Sciences. 2024. V. 14. № 19. P. 8754. doi: 10.3390/app14198754.

14 Wang S., Gu B.J., Ganjyal G.M. Impacts of the Inclusion of Various Fruit Pomace Types on the Expansion of Corn Starch Extrudates // LWT – Food Science and Technology. 2019. V. 110. P. 223–230. doi: 10.1016/j.lwt.2019.03.094.

15 Gumul D., Berski W., Zięba T. The Influence of Fruit Pomaces on Nutritional, Pro-Health Value and Quality of Extruded Gluten-Free Snacks // Applied Sciences. 2023. V. 13. № 8. P. 4818. doi: 10.3390/app13084818.

16 Кириллов Е.А., Никитенко В.Д., Туршатов М.В., Кононенко В.В., Соловьев А.О. Исследования по получению дистиллятов из сброженного зерно-фруктового сырья на аппаратах периодического действия // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024. Т. 86. № 3 (101). С. 89–95. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-89-95.

17 Соловьев А.О., Туршатов М.В., Кононенко В.В., Погоржельская Н.С., Павленко С.В. Переработка клубней топинамбура в дистилляты для производства оригинальных спиртных напитков // Индустрия питания. 2022. № 7 (4). С. 36–43. doi: 10.29141/2500-1922-2022-7-4-4.

18 Kristiawan M., Della Valle G., Vergnes B. Extrusion—Cooking and expansion // Breakfast Cereals and How They Are Made. 4th ed. St. Paul: AACC International Press, 2020. P. 141–167.

19 Šárka E., Sluková M., Henke S. Changes in Phenolics during Cooking Extrusion: A Review // Foods. 2021. V. 10. № 9. P. 2100. doi: 10.3390/foods10092100.

20 Blejan A.M., Danciu C., Ciolan G.C., Velescu B.Ș., Negres S., Ancuceanu R.V. Corn-Based Extruded Snacks Supplemented with Bilberry Pomace Powder: Physical, Chemical, Functional, and Sensory Properties // Applied Sciences. 2025. V. 15. № 5. P. 2468. doi: 10.3390/app15052468.

21 Niemira J., Galus S. Valorization of red beetroot (Beta vulgaris L.) pomace combined with golden linseed (Lini semen) for the development of vegetable crispbreads as gluten-free snacks rich in bioactive compounds // Molecules. 2024. V. 29. № 9. P. 2105. doi: 10.3390/molecules29092105.

References

1 Iqbal A.S., Shulz P., Rizvi S. Valorization of bioactive compounds in fruit pomace from agro-fruit industries: Present Insights and future challenges. Food Bioscience. 2021. vol. 44. p. 101384. doi: 10.1016/j.fbio.2021.101384

2 Michalska-Ciechanowska A. A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products. Trends in Food Science & Technology. 2019. vol. 88. pp. 207–219. doi: 10.1016/j.tifs.2019.03.021

3 Rimareva L.V., Serba E.M., Sokolova E.N., Ignatova N.I., Fursova N.A. On the feasibility of using black currant berries for obtaining original grain-fruit distillates. Food Industry. 2023. no. 5. pp. 61–63. doi: 10.52653/PPI.2023.5.5.017 (in Russian)

4 Šimonėlienė A. Distillate composition from fermented black currant, aronia, rhubarb, apple, and raspberry wines. Science and Applied Research at Lithuanian University Colleges. 2023. vol. 19. no. 1. pp. 246–252. doi: 10.59476/mtt.v1i19.593

5 Guncheva R. Characteristic of species Morus alba L. and Morus nigra L. by some basic vegetative traits. Agricultural Science and Technology. 2024. vol. 16. no. 2. pp. 18–24. doi: 10.15547/ast.2024.02.019

6 Kelanne N., Yang B., Liljenbäck L., Laaksonen O. Phenolic compound profiles in black currant beverages fermented with yeasts. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2020. vol. 68. no. 37. pp. 10128–10141. doi: 10.1021/acs.jafc.0c03354

7 Patelski A.M., Dziekońska-Kubczak U., Ditrych M. The fermentation of orange and black currant juices by the probiotic yeast Saccharomyces cerevisiae var. boulardii. Applied Sciences. 2024. vol. 14. no. 7. p. 3009. doi: 10.3390/app14073009

8 Dumitrașcu L., Patrascu L., Banu I., Ina V. The influence of processing on bioactive compounds of berries. Applied Sciences. 2024. vol. 14. no. 19. p. 8713. doi: 10.3390/app14198713

9 Makarova N.V., Valiulina D.F., Eremeeva N.B. Comparative studies of extraction methods of biologically-active substances with antioxidant properties from grape seed (Vitis vinifera L.). Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020. vol. 10. no. 1. pp. 140–148. doi: 10.21285/2227-2925-2020-10-1-140-148 (in Russian)

10 Saad A.M., El-Saadony M.T., El-Tarabily K.A., Abd El-Hack M.E. et al. Dietary polyphenols and human health: sources, biological activities, nutritional and immunological aspects, and bioavailability–a comprehensive review. Frontiers in Immunology. 2025. vol. 16. p. 1653378. doi: 10.3389/fimmu.2025.1653378

11 Serba E.M., Ignatova N.I., Sokolova E.N., Mikulyak A.A., Rimareva L.V. Substantiation of the prospects for the use of fruit and berry raw materials in the production of original distillates. Problems of Nutrition. 2023. vol. 92. no. S5 (549). pp. 256–257. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-5s-320 (in Russian)

12 Nikitenko V.D., Turshatov M.V., Solovyev A.O., Ledenev V.P., Kononenko V.V., Abramova I.M. Comparative study of different alcohol yeasts to improve the technological and organoleptic characteristics of grain-apple distillates. Starch and Its Derivatives. 2024. no. 3 (5). pp. 12–16. (in Russian)

13 Soja J., Combrzyński M., Oniszczuk T., Gancarz M., Oniszczuk A. Extrusion-Cooking and Physical Characteristics of Snacks Pellets with Addition of Selected Plant Pomace. Applied Sciences. 2024. vol. 14. no. 19. p. 8754. doi: 10.3390/app14198754

14 Wang S., Gu B.J., Ganjyal G.M. Impacts of the Inclusion of Various Fruit Pomace Types on the Expansion of Corn Starch Extrudates. LWT – Food Science and Technology. 2019. vol. 110. pp. 223–230. doi: 10.1016/j.lwt.2019.03.094

15 Gumul D., Berski W., Zięba T. The Influence of Fruit Pomaces on Nutritional, Pro-Health Value and Quality of Extruded Gluten-Free Snacks. Applied Sciences. 2023. vol. 13. no. 8. p. 4818. doi: 10.3390/app13084818

16 Kirillov E.A., Nikitenko V.D., Turshatov M.V., Kononenko V.V., Solovyev A.O. Research on obtaining distillates from fermented grain-fruit raw materials on batch apparatus. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2024. vol. 86. no. 3 (101). pp. 89–95. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-89-95 (in Russian)

17 Solovyev A.O., Turshatov M.V., Kononenko V.V., Pogorzhelskaya N.S., Pavlenko S.V. Processing of Jerusalem artichoke tubers into distillates for the production of original alcoholic beverages. Food Industry. 2022. no. 7 (4). pp. 36–43. doi: 10.29141/2500-1922-2022-7-4-4 (in Russian)

18 Kristiawan M., Della Valle G., Vergnes B. Extrusion—Cooking and expansion. Breakfast Cereals and How They Are Made. 4th ed. St. Paul: AACC International Press, 2020. pp. 141–167.

19 Šárka E., Sluková M., Henke S. Changes in Phenolics during Cooking Extrusion: A Review. Foods. 2021. vol. 10. no. 9. p. 2100. doi: 10.3390/foods10092100

20 Blejan A.M., Danciu C., Ciolan G.C., Velescu B.Ș., Negres S., Ancuceanu R.V. Corn-Based Extruded Snacks Supplemented with Bilberry Pomace Powder: Physical, Chemical, Functional, and Sensory Properties. Applied Sciences. 2025. vol. 15. no. 5. p. 2468. doi: 10.3390/app15052468

21 Niemira J., Galus S. Valorization of red beetroot (Beta vulgaris L.) pomace combined with golden linseed (Lini semen) for the development of vegetable crispbreads as gluten-free snacks rich in bioactive compounds. Molecules. 2024. vol. 29. no. 9. p. 2105. doi: 10.3390/molecules29092105

Сведения об авторах

Антон.Ю. Шариков к.т.н., Заведующий, отдел оборудования и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Самокатная, 4 Б, г. Москва, 111033, Россия, anton.sharikov@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9483-5209

Алексей А. Голубев инженер технолог, отдел оборудования и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи , Самокатная, 4 Б, Москва, 111033, Россия, 4953624495@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3847-6472

Елена Н. Соколова к.б.н., ведущий научный сотрудник, отдел биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и БАД, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Самокатная, 4 Б, Москва, 111033, Россия, 4953624495@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6084-7786

Мария В. Амелякина к.т.н., старший научный сотрудник, отдел оборудования и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Самокатная, 4 Б, Москва, 111033, Россия, foodbiotech@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-5138-6746

Елизавета Р. Крючкова Инженер-технолог 1 категории, отдел биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и БАД, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Самокатная, 4 Б, Москва, 111033, Россия, 4953624495@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8012-0907

Виктор В. Иванов к.т.н., ведущий научный сотрудник, отдел оборудования и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Самокатная, 4 Б, Москва, 111033, Россия, foodbiotech@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-6492-7070

Information about authors

Anton Yu. Sharikov Cand. Sci. (Engin.), Head, department of Equipment and Membrane Technologies, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety , Samokatnaya str., 4 B, Moscow, 111033, Russia, anton.sharikov@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9483-5209

Alexey A. Golubev process engineer, department of Equipment and Membrane Technologies, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str , 4 B, Moscow, 111033, Russia, 4953624495@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3847-6472

Elena N. Sokolova Cand. Sci. (Biol.), leading researcher, department of Biotechnology of Enzymes, Yeast, Organic Acids and Dietary Supplements , All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety), Samokatnaya str., 4 B, Moscow, 111033, Russia, 4953624495@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6084-7786

Maria V. Amelyakina Cand. Sci. (Engin.), department of Equipment and Membrane Technologies, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety , Samokatnaya str., 4 B, Moscow, 111033, Russia, foodbiotech@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-5138-6746

Elizabeth R. Kryuchkova process engineer, department of Biotechnology of Enzymes, Yeast, Organic Acids and Dietary Supplements, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4 B, Moscow, 111033, Russia, 4953624495@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-8012-0907

Viktor V. Ivanov Cand. Sci. (Engin.), leading researcher , department of Biotechnology of Enzymes, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4 B, Moscow, 111033, Russia, foodbiotech@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-6492-7070

Вклад авторов

Антон.Ю. Шариков написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат
Алексей А. Голубев обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Елена Н. Соколова обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Мария В. Амелякина написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат
Елизавета Р. Крючкова обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Виктор В. Иванов консультация в ходе исследования

Contribution

Anton Yu. Sharikov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism
Alexey A. Golubev review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Elena N. Sokolova review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Maria V. Amelyakina wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism
Elizabeth R. Kryuchkova review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Viktor V. Ivanov consultation during the study

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/08/2025	**После редакции** 25/08/2025	**Принята в печать** 14/09/2026

Received 11/08/2025	**Accepted in revised** 25/08/2025	**Accepted** 14/09/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-129-134 Оригинальная статья/Research article
УДК 663(8) Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Особенности технологии пивных напитков с использованием нетрадиционного сырья

Даниил Р. Кулигин	1	kuligin470@gmail.com	0009-0007-3133-4467
Алла Е. Чусова	1	hycovai@mail.ru	0000-0003-1237-4870
Инна В. Новикова	1	novikova_iv@vsuet.ru	0000-0002-2360-5892
Александр С. Муравьев	1	hntrun@mail.ru	0000-0002-5989-0752
Наталья В. Зуева	1	nataspirt30@ya.ru	0000-0003-2840-398X
Александр С. Левашов	1	tanos.lockironan@mail.ru	

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

Аннотация. Цель работы заключается в разработке технологии напитков, полученных с применением нетрадиционного сырья для потребителей с заболеваниями органов пищеварения и исследовании физико-химических показателей полученных изделий. Для проведения исследования использован комплексный подход, включающий анализ научной литературы, в том числе возможность потребления пивных напитков населением с проблемами желудочно-кишечного тракта, а также изучение технологии производства напитков функционального назначения. Объектом исследования являлись образцы напитков, полученные с применением солода из киноа, порошка из топинамбура, соков ягодных и овощных. Изучены технологические процессы, позволяющие получить пивные напитки с объемной долей спирта 2,5-3,0 %. Физико-химические исследования, а именно экстрактивность, цвет, активная (pH 5,2) и титруемая кислотность, показатели, что все разработанные образцы напитков соответствуют нормативным значениям для данного вида продукции. Установлено, что органолептические показатели напитков имеют сбалансированный вкусо-ароматический профиль, обусловленный входящим в их состав солода из киноа, порошка из топинамбура и ягодными и овощными соками, такими как абрикосовый, брусничный, тыквенный и морковный. Исследование показало возможность применения солода из киноа и порошка из топинамбура для создания специализированных продуктов питания. Разработанная технология позволяет не только удовлетворить потребности некоторых групп населения, но и расширить ассортимент изделий за счёт выпуска функциональных, безглютеновых напитков с улучшенным нутриентным составом. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию вкусового баланса, изучению стабильности и сроков хранения данных продуктов, а также на оценку их пребиотического эффекта в опытах in vivo.

Ключевые слова: технология, пивной напиток, солод из киноа, порошок из топинамбура, ягодный и овощной сок.

Features of beer beverage technology using non-traditional raw materials

Daniil R. Kuligin	1	kuligin470@gmail.com	0009-0007-3133-4467
Alla E. Chusova	1	hycovai@mail.ru	0000-0003-1237-4870
Inna V. Novikova	1	novikova_iv@vsuet.ru	0000-0002-2360-5892
Alexander S. Muravyev	1	hntrun@mail.ru	0000-0002-5989-0752
Natalya V. Zyeva	1	nataspirt30@ya.ru	0000-0003-2840-398X
Alexander S. Levashov	1	tanos.lockironan@mail.ru	

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

Abstract. The aim of this study is to develop a technology for producing beverages using non-traditional raw materials for consumers with gastrointestinal disorders and to investigate the physicochemical properties of the resulting products. A comprehensive approach was used to conduct the study, including an analysis of scientific literature, including the potential for beer consumption by people with gastrointestinal issues, and an examination of functional beverage production technology. The study involved beverage samples produced using quinoa malt, Jerusalem artichoke powder, and berry and vegetable juices. The technological processes for producing beer beverages with an alcohol content of 2.5-3.0% by volume were studied. Physicochemical studies, namely, extract content, color, active (pH 5.2), and titratable acidity, demonstrated that all developed beverage samples meet regulatory standards for this type of product. The organoleptic properties of the beverages were found to have a balanced flavor profile, owing to the inclusion of quinoa malt, Jerusalem artichoke powder, and berry and vegetable juices such as apricot, lingonberry, pumpkin, and carrot. The study demonstrated the potential of using quinoa malt and Jerusalem artichoke powder to create specialized food products. The developed technology not only addresses the needs of certain population groups but also expands the product range by producing functional, gluten-free beverages with an improved nutrient profile. Further research could focus on optimizing flavor balance, studying the stability and shelf life of these products, and evaluating their prebiotic effect in vivo.

Keywords: technology, beer drink, quinoa malt, Jerusalem artichoke powder, berry and vegetable juice.

Для цитирования
Кулигин Д.Р., Чусова А.Е., Новикова И.В., Муравьев А.С., Зуева Н.В., Левашов А.С. Особенности технологии пивных напитков с использованием нетрадиционного сырья // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 139–134. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-139-134

For citation
Kuligin D.R., Chusova A.E., Novikova I.V., Muravyev A.S., Zueva N.V., Levashov A.S. Features of beer beverage technology using non-traditional raw materials. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 129–134. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-129-134

©2025, Кулигин Д. Р. и др. / Kuligin D. R. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Пивобезалкогольная промышленность сегодня является одной из наиболее развивающихся отраслей пищевой промышленности. Для удовлетворения постоянно растущего потребительского спроса на инновационные и здоровые продукты предприятия различных отраслей, включая пивобезалкогольную, постоянно разрабатывают новые сырьевые и продуктовые решения. В настоящее время наблюдается значительный рост количества потребителей с заболеванием органов пищеварения, таких как «целиакия» и «гастрит». Для удовлетворения спроса этих категорий потребителей пиво и пивные напитки должны содержать глютен не более 20 мг на кг продукта, и иметь определенное значение pH. Для создания безглютенового пива или пивного напитка предприятия применяют различные технологические приемы, в первую очередь использование безглютенового сырья. Для создания напитков для потребителей, у которых есть симптомы заболевания гастрита, применяют набор такого сырья, чтобы он соответствовал необходимому уровню кислотности pH 6,0–6,2 и не вызывал воспалительный процесс слизистой оболочки желудка.

Для выполнения задач исследования применяли нетрадиционные виды сырья с определенными показателями.

Эффективность производства пивных напитков для людей с проблемами желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) можно обеспечить за счет создания сбалансированной рецептуры и подбора необходимого сырья [19–20].

Проведение исследования в данной области является актуальным, так как позволяет расширить ассортимент зерновых напитков из нетрадиционного сырья, привлечь определенную аудиторию потребителей за счет создания нового продукта [2].

Цель работы – разработка технологии напитков, полученных с применением нетрадиционного сырья для потребителей с заболеваниями органов пищеварения и исследовании физико-химических показателей полученных изделий.

Материалы и методы

Для проведения исследования был использован комплексный подход, включающий анализ научной литературы, в том числе возможность потребления пивных напитков населением с проблемами ЖКТ, сбор и обработку статистических данных о потребительском спросе на напитки лечебно-профилактического назначения.

Объектом исследования являлись образцы напитков, полученные с применением солода из киноа, порошка из топинамбура, соков ягодных и овощных.

Результаты

Анализ результатов исследований показал, что производство пивных напитков с применением таких видов сырья как солод из киноа, порошок из топинамбура, а также добавлением овощных и фруктовых соков имеет значительный потенциал, в том числе для расширения потребительского спроса на данную категорию напитков [1, 9–10].

В химическом составе киноа присутствует большое количество макро- и микроэлементов на 100 г зерна, в %: марганца – 102, магния – 49, фосфора – 46, меди – 30, железа – 25, цинка – 21, калия – 16, селена – 12. Содержит ω-3,6, витамины группы В, витамины Е, РР, А. Напитки с применением киноа или солода из него будут обладать рядом преимуществ, такими как высокая питательная ценность и отсутствие глютена.

Таблица 1.

Содержание различных веществ в киноа

Table 1.

Contents of various substances in quinoa

Наименование Name	Массовая доля Mass fraction
Белки, г/100 г | Protein, g/100 g	14,40
Жиры, г/100 г | Fats, g/100 g	7,10
Крахмал, г/100 г | Starch, g/100 g	64,90
Витамины, мг/100 г | Vitamins, mg/100 g	
B1	0,36
B2	0,318
B3	1,52
B6	0,487
B9	184
C	6,8
Макро- и микроэлементы | Macro- and micronutrients	
Калий, мг/100 г | Potassium, mg/100 g	563
Кальций, мг/100 г | Calcium, mg/100 g	47
Магний, мг/100 г | Magnesium. mg/100 g	197
Медь, мкг/100 г | Copper, μg/100 g	590
Натрий, мг/100 г | Sodium, mg/100 g	5
Фосфор, мг/100 г | Phosphorus, mg/100 g	457
Цинк, мг/100 г Zinc, mg/100 g	3,1
Селен, мкг/100 г Selenium, μg/100 g	8,5

Основные показатели порошка из топинамбура, которые необходимы для создания напитков, включают в себя высокое содержание природных полисахаридов (около 72–77 %), белков (7,0–7,2 %), клетчатки и пектиновых веществ. Инулин, как пребиотик, способствует улучшению пищеварения и обмена веществ, а микроэлементы и биологически активные компоненты придают напитку дополнительные полезные качества и могут поддерживать иммунитет.

Таблица 2.

Содержание различных веществ в топинамбуре

Table 2.

Contents of various substances in Jerusalem artichoke

Наименование Name	Массовая доля Mass fraction
Белки, г/100 г | Protein, g/100 g	2
Жиры, г/100 г | Fats, g/100 g	0,1
Крахмал, г/100 г | Starch, g/100 g	17,44
Макро- и микроэлементы Macro – and micronutrients	
Калий, мг/100 г | Potassium, mg/100 g	429
Магний, мг/100 г | Magnesium. mg/100 g	158
Натрий, мг/100 г | Sodium, mg/100 g	6
Витамины, мг/100 г | Vitamins, mg/100 g	
B1	0,66
C	4

Анализ продукции для населения с проблемами ЖКТ показал, что напиток должно иметь высокий показатель pH = 5,6–6.2, который отличается от нормативного значения (2,5). Также необходимо снизить объемное содержание спирта с 4,0–4,4% об до 2,0–2,5 % об.

Составлены четыре рецептуры напитков из разных видов зернового сырья. В состав первого образца напитка входит ячменный светлый солод и солод из киноа, второго - темный, карамельный и светлый ячменный солод, третьего - ячменный светлый солод и рисовая сечка, четвертого - светлый и карамельный ячменный солод.

Процесс приготовления пивного сусла начинали с дробления солода на вальцовых дробилках. После дробление зернопродуктов готовили затор с гидромодулем 1:4. При приготовлении экспериментальных образцов добавляли комплексный ферментный препарат Церемикс Plus MG из расчета 0,4 кг/т зернопродуктов, а также дополнительные ингредиенты, согласно разработанной рецептуры.

В процессе затирания выдерживали температурные паузы: белковую паузу при 50– 52°С в течение 15 минут, мальтозную паузу при температуре 60–65°С в течение 30 минут и паузу осахаривания при температуре 70–72 °С в течение 30 минут [7, 12]. Затем проверяли полноту осахаривания по йодной пробе, после чего проводили фильтрование затора и промывание дробины водой. Получали сусло с массовой долей сухих веществ (СВ) 11,0–11,5% [5].

После фильтрования сусло кипятили с хмелем. Применяли хмель горьких и ароматных сортов Magnum – (0,35 г/л) и Citra (0,18 г/л) соответственно. Кипячение проводили 70 минут. В сусловарочный котел хмель задавали в несколько порций. Первая порция – после 10 минут кипения сусла - горький сорт хмеля в количестве 2/3 части от расчетного значения, вторая порция – после 30 минут кипения сусла - горький хмель в количестве 1/3 часть от расчетного значения (особенность для второго образца - добавление можжевельника 1/2 части от общего количества), третья порция – за 10 минут до окончания кипения сусла - ароматный хмель (особенность для второго образца – добавление можжевельник 1/2 части от общего количества и корица). Затем сусло охлаждали до температуры 5–10°С, проводили отделение осадка [13–15, 18].

Брожение – один из наиболее важных этапов в производстве ферментированных напитков, с обязательным контролированием процесса на протяжении всего периода. Начальная концентрация сухих веществ оказывает влияние на процесс сбраживания сусла и качество пива, содержание в нём этилового спирта и на выбор спирто- и осмоустойчивых дрожжей.

На рисунке 1 показана зависимость продолжительности главного брожения пивного сусла от количества засевного материала.

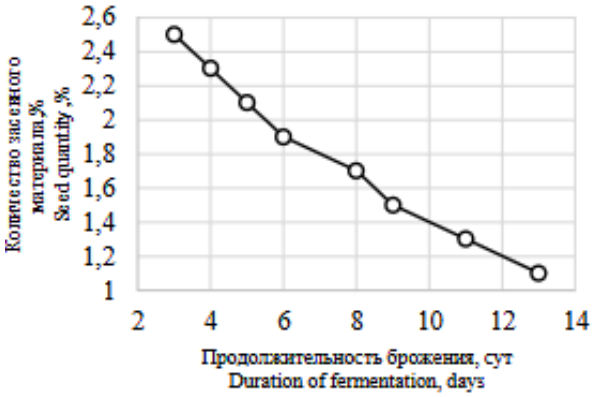


Рисунок 1. Влияние количества засевного материала на продолжительность брожения

Figure 1. Effect of the amount of beer material on fermentation duration

Для сбраживания сусла использовали засевные дрожжи расы W 34/70 в количестве 1,9 % от объема сусла, что составляло около 50 млн клеток в 1 $см^3$ сусла. В этом случае продолжительность процесса брожения вели в течение 5-6 суток до достижения в сусле требуемого содержания сухих веществ 3,7–4,5 %.

Температура главного брожения для первого и второго образцов составляла 6–8 °С, для третьего и четвертого образцов - 8–10 °С [4].

Дображивание пива для всех образцов осуществляли при температуре 4–6 °С в течение 3–4 недель, после чего получали готовое нефильтрованное пиво [4].

Потом добавляли сок в соотношении 1:1: для первого образца - абрикосовый, для второго - брусничный, для третьего образца - тыквенный, для четвертого образца - морковный. Купажирование с соком проводят с целью повышения pH пива и уменьшения содержание спирта. Во все образцы напитка добавляли порошок из топинамбура.

Физико-химические показатели образцов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Физико-химические показатели образцов пивных напитков

Table 3.

Physical and chemical indicators of beer beverage samples

Показатели | Indicators	Образцы | Sample			
	1	2	3	4
Экстрактивность начального сусла, % | Extractivity of initial wort, %	11	11	11	11
Видимый экстракт, % | Visible extract, %	2,0	2,1	2,2	2,0
Цвет, ед. ц. Color, u.s.c.	2,0	5,0	2,3	2,5
Кислотность, ед. к. | Acidity, units.k	2,5	2,5	2,5	2,5
pH	5,2	5,2	5,2	5,2
Объёмная доля спирта, % об. | Volume fraction of alcohol, %	3	2,5	2,9	2,5

Заключение

В результате исследований получены данные по применению нетрадиционного сырья для создания пивных напитков для определенной категории потребителей. Разработанная технология и полученные образцы напитков позволяют не только удовлетворить потребности некоторых групп населения, но и расширить ассортимент изделий за счёт выпуска функциональных, безглютеновых напитков с улучшенным нутриентным составом. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию вкусового баланса, изучению стабильности и сроков хранения данных продуктов, а также на оценку их пребиотического эффекта в опытах in vivo.

Литература

1 Абдулаев М.С., Надточий Л.А. Оценка пищевой ценности культуры киноа // Символ науки: междунар. науч. журн. 2016. С. 9–11.

2 Бурак Л.Ч. Перспективы производства пива с функциональными свойствами // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2021. С. 79–88.

3 ГОСТ 12787–81. Пиво. Методы определения спирта, действительного экстракта и расчет сухих веществ в начальном сусле. Москва: Стандартинформ, 2011. 11 с.

4 Криваносов И.Н., Новикова И.В., Муравьев А.С. Обзор: Непрерывное брожение пива // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 1 (99). С. 126–130.

5 Кунце В. Технология солода и пива. Санкт-Петербург: Профессия, 2009. 1064 с.

6 Кулигин Д.Р., Чусова А.Е., Новикова И.В., Коротких Е.А., Муравьев А.С., Левашов А.С. Особенности технологии безглютенового пива с использованием различных штаммов дрожжей // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024. Т. 86. № 3. С. 116–121. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-116-121.

7 Федосеева К.В., Агаселимова С.С. Использование альтернативного сырья в производстве пива и его влияние на качество готовой продукции // Актуальные вопросы современных научных исследований: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2023. С. 34–39.

8 Wanniarachchi P.C., Pavalakumar D., Jayasinghe M.A. Pseudocereals: nutrition, health benefits, and potential applications in gluten-free food product developments // Curr. Nutr. Food Sci. 2023. V. 19. № 4. P. 377–385.

9 Cilia García M., De la Cruz-Lázaro E., Sánchez-Chávez E., Jaramillo-López P.F., Márquez-Quiroz C., Osorio-Osorio R. Effects of water restriction on carbohydrates concentration, starch granules size and amylolytic activity in seeds of Phaseolus vulgaris L. and P. acutifolius A. Gray // Bot. Sci. 2021. V. 99. № 2. P. 364–376.

10 Ng C.Y., Wang M. The functional ingredients of quinoa (Chenopodium quinoa) and physiological effects of consuming quinoa: A review // Food Front. 2021. V. 2. № 3. P. 329–356.

11 Partichelli C.P., Dufour J.P., Arcuri L.S., Basso L.C. Exogenous enzymes for gluten-free beer production: A review of the industrial practice and its implications for scientific research // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2024. V. 95. P. 103709.

12 Valková V., Ďúranová H., Havrlentová M., Ivanišová E., Bojňanská T., Chlebo P., Kántor A., Kačániová M. Selected physico-chemical, nutritional, antioxidant and sensory properties of wheat bread supplemented with apple pomace powder as a by-product from juice production // Plants. 2022. V. 11. № 6. P. 788.

13 Deng Y., Lim J., Lee G.H., Nguyen T.T.H., Kim D.H., Kim I.D., Mok I.K., Mok C. Brewing Rutin-Enriched Lager Beer with Buckwheat Malt as Adjuncts // J. Microbiol. Biotechnol. 2019. V. 29. № 6. P. 877–886.

14 Gasiński A., Kawa-Rygielska J., Paszkot J., Pietrzak W., Śniegowski K., Dziekońska-Kubczak U., Mądrzak A. Second life of hops: Analysis of beer hopped with hop pellets previously used to dry-hop a beer // LWT. 2022. V. 159. P. 113186.

15 Hrabia O., Ditrych M., Ciosek A., Fulara K., Kawa-Rygielska J., Ziarno M., Rusiecka I., Poreda A. Effect of dry hopping on the oxidative stability of beer // Food Chem. 2022. V. 394. P. 133480.

16 Lafontaine S., Varnum S., Roland A., Delpech S., Dagan L., Vollmer D., Kishimoto T., Shellhammer T. Impact of harvest maturity on the aroma characteristics and chemistry of Cascade hops used for dry-hopping // Food Chem. 2019. V. 278. P. 228–239.

17 Oladokun O., James S., Cowley T., Dehrmann F., Smart K., Hort J., Cook D. Perceived bitterness character of beer in relation to hop variety and the impact of hop aroma // Food Chem. 2017. V. 230. P. 215–224.

18 Hopfer H., Mayfield S., Buffalini E., Bello J., Heymann H. Preferred beer styles influence both perceptual maps and semantic descriptions of dry hops // Food Qual. Prefer. 2021. V. 94. P. 104337.

19 Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Реализация алкогольной продукции и пива. URL: https://rosstat.gov.ru (дата обращения: 29.10.2024).

20 Miller Y.Y., Kiseleva T., Pomozova V. Using non-traditional raw materials in the production of grain beverages // BIO Web Conf. 2024. V. 103. P. 00092. doi: 10.1051/bioconf/202410300092

References

1 Abdullayev M.S., Nadtochiy L.A. Assessment of the nutritional value of quinoa culture. Symbol of Science: International Scientific Journal. 2016. pp. 9–11. (in Russian).

2 Burak L. Ch. Prospects for the production of beer with functional properties. Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products. 2021. pp. 79–88. (in Russian).

3 GOST 12787–81. Beer. Methods for determining alcohol, actual extract and calculating dry matter in the initial wort. Moscow, Standartinform, 2011. 11 p. (in Russian).

4 Krivanosov I.N., Novikova I.V., Muravyov A.S. Review: Continuous fermentation of beer. Proceedings of VSUET. 2024. vol. 86. no. 1(99). pp. 126–130. (in Russian).

5 Kuntse V. Technology of Malt and Beer. St. Petersburg, Profession, 2009. 1064 p. (in Russian).

6 Kuligin D.R., Chusova A.E., Novikova I.V., Korotkikh E.A., Muravyev A.S., Levashov A.S. Peculiarities of gluten-free beer technology using different yeast strains. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2024; 86(3):116–121. (In Russ.) https://doi.org/10.20914/2310–1202–2024–3–116–121

7 Fedoseeva K.V., Agaselimova S.S. Use of alternative raw materials in beer production and its impact on the quality of finished products. Actual issues of modern scientific research: collection of articles of the IV international scientific and practical conference. Penza, MCNS "Science and Education", 2023. pp. 34–39. (in Russian).

8 Wanniarachchi P.C., Pavalakumar D., Jayasinghe M.A. Pseudocereals: nutrition, health benefits, and potential applications in gluten-free food product developments. Current Nutrition & Food Science. 2023. vol. 19. no. 4. pp. 377–385.

9 Cilia García M., De la Cruz-Lázaro E., Sánchez-Chávez E., Jaramillo-López P.F., Márquez-Quiroz C., Osorio-Osorio R. Effects of water restriction on carbohydrates concentration, starch granules size and amylolytic activity in seeds of Phaseolus vulgaris L. and P. acutifolius A. Gray. Botanical Sciences. 2021. vol. 99. no. 2. pp. 364–376.

10 Ng C.Y., Wang M. The functional ingredients of quinoa (Chenopodium quinoa) and physiological effects of consuming quinoa: A review. Food Frontiers. 2021. vol. 2. no. 3. pp. 329–356.

11 Partichelli C.P., Dufour J.P., Arcuri L.S., Basso L.C. Exogenous enzymes for gluten-free beer production: A review of the industrial practice and its implications for scientific research. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2024. vol. 95. 103709.

12 Valková V., Ďúranová H., Havrlentová M., Ivanišová E., Bojňanská T., Chlebo P., Kántor A., Kačániová M. Selected physico-chemical, nutritional, antioxidant and sensory properties of wheat bread supplemented with apple pomace powder as a by-product from juice production. Plants. 2022. vol. 11. no. 6. 788.

13 Deng Y., Lim J., Lee G.H., Nguyen T.T.H., Kim D.H., Kim I.D., Mok I.K., Mok C. Brewing Rutin-Enriched Lager Beer with Buckwheat Malt as Adjuncts. Journal of Microbiology and Biotechnology. 2019. vol. 29. no. 6. pp. 877–886.

14 Gasiński A., Kawa-Rygielska J., Paszkot J., Pietrzak W., Śniegowski K., Dziekońska-Kubczak U., Mądrzak A. Second life of hops: Analysis of beer hopped with hop pellets previously used to dry-hop a beer. LWT. 2022. vol. 159. 113186.

15 Hrabia O., Ditrych M., Ciosek A., Fulara K., Kawa-Rygielska J., Ziarno M., Rusiecka I., Poreda A. Effect of dry hopping on the oxidative stability of beer. Food Chemistry. 2022. vol. 394. 133480.

16 Lafontaine S., Varnum S., Roland A., Delpech S., Dagan L., Vollmer D., Kishimoto T., Shellhammer T. Impact of harvest maturity on the aroma characteristics and chemistry of Cascade hops used for dry-hopping. Food Chemistry. 2019. vol. 278. pp. 228–239.

17 Oladokun O., James S., Cowley T., Dehrmann F., Smart K., Hort J., Cook D. Perceived bitterness character of beer in relation to hop variety and the impact of hop aroma. Food Chemistry. 2017. vol. 230. pp. 215–224.

18 Hopfer H., Mayfield S., Buffalini E., Bello J., Heymann H. Preferred beer styles influence both perceptual maps and semantic descriptions of dry hops. Food Quality and Preference. 2021. vol. 94. 104337.

19 Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki (Rosstat). Realizatsiya alkogol'noi produktsii i piva [Sale of alcoholic products and beer]. Available at: https://rosstat.gov.ru (accessed 29.10.2024). (in Russian).

20 Miller Y.Y., Kiseleva T., Pomozova V. Using non-traditional raw materials in the production of grain beverages. BIO Web Conf. 2024. vol. 103. 00092. doi: 10.1051/bioconf/202410300092.

Сведения об авторах

Даниил Р. Кулигин студент, кафедра машины и аппараты 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

Алла Е. Чусова к.т.н., доцент, кафедра технологии бродильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, hycovai@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1237-4870

Information about authors

Daniil R. Kuligin student, food processing machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuligin470@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-3133-4467

Alla E. Chusova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, fermentation and sugar production technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, hycovai@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1237-4870

Инна В. Новикова д.т.н., профессор, кафедра технологии бродильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, novikova_iv@vsuet.ru
https://orcid.org/0000-0002-2360-5892

Александр С. Муравьев к.т.н, доцент, кафедра машины и аппараты пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, hntrun@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-5989-0752

Наталья В. Зуева к.т.н, доцент, кафедра технологии бродильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nataspirt30@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2840-398X

Александр С. Левашов аспирант, кафедра технологии бродильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tanos.lockironan@mail.ru

Inna V. Novikova Dr. Sci. (Engin.), professor, fermentation and sugar production technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, novikova_iv@vsuet.ru
https://orcid.org/0000-0002-2360-5892

Alexander S. Muravyev Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, food processing machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, hntrun@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-5989-0752

Natalya V. Zyeva Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, fermentation and sugar production technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, nataspirt30@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2840-398X

Alexander S. Levashov graduate student, fermentation and sugar production technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tanos.lockironan@mail.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 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025

Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-135-140 Оригинальная статья/Research article
УДК 640 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Перспективы применения продуктов глубокой переработки амаранта в технологиях резилиенс-продуктов

Наталья С. Родионова [1] natalya.s.ch@mail.ru 0000-0002-6940-7998
Дмитрий М. Выродов [1] notpp@mail.ru

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

Аннотация. Исследование направлено на разработку новых пищевых продуктов для здорового долголетия (резилиенс-продуктов) на основе продуктов глубокой переработки амаранта. Установлено, что крупчатка амаранта обладает антиоксидантной активностью (АОА) 0,17 мг/г, что превышает показатель муки (0,15 мг/г). На основе этих компонентов разработаны рецептуры и технологии двух продуктов: гранолы и мюсли. Рецептуры включают другие функциональные ингредиенты: зеленую гречу, жмых тыквенных семян, орехи кешью, гидролизованную спирулину. Для гранолы применена технология декстринизации крупчатки и сушки яблочно-амарантовой крошки. В мюсли введен фруктозный сироп со спирулиной. Расчет пищевой ценности показал, что 172 г гранолы и 225 г мюсли покрывают 25–30% суточной энергетической потребности, обеспечивая 12% жиров, 30% белков и 15% углеводов. Продукты характеризуются повышенным содержанием минеральных веществ: 100 г мюсли удовлетворяют суточную потребность в меди на 40%, в железе – на 29%, в магнии – на 48%; аналогичная порция гранолы – на 120%, 50% и 171% соответственно. Выводы: разработанные продукты обладают высокой антиоксидантной активностью, сбалансированным нутриентным составом и значительным содержанием макро- и микроэлементов (калий, магний, железо, медь, селен). Они могут быть рекомендованы в качестве резилиенс-компонентов рациона для укрепления иммунитета, поддержания метаболизма, антиоксидантной защиты и профилактики заболеваний, способствуя здоровому активному долголетию.

Ключевые слова: амарант, глубокая переработка, резилиенс-продукты, антиоксидантная активность, функциональное питание, гранола, мюсли, пищевая ценность, здоровое долголетие, макроэлементы.

Prospects for the application of deep-processed amaranth products in resilience product technologies

Natalia S. Rodionova [1] natalya.s.ch@mail.ru 0000-0002-6940-7998
Dmitriy M. Virodov [1] notpp@mail.ru

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

Abstract. The study aims to develop new food products for healthy longevity (resilience products) based on deep-processed amaranth. It was found that amaranth semolina has an antioxidant activity (AOA) of 0.17 mg/g, which exceeds the flour's indicator (0.15 mg/g). Based on these components, formulations and technologies for two products were developed: granola and muesli. The formulations include other functional ingredients: green buckwheat, pumpkin seed cake, cashew nuts, hydrolyzed spirulina. For granola, the technology of semolina dextrinization and drying of apple-amaranth crumbs was applied. Fructose syrup with spirulina was introduced into muesli. The calculation of nutritional value showed that 172 g of granola and 225 g of muesli cover 25–30% of the daily energy requirement, providing 12% fats, 30% proteins and 15% carbohydrates. The products are characterized by an increased content of minerals: 100 g of muesli satisfy the daily requirement for copper by 40%, for iron by 29%, for magnesium by 48%; a similar portion of granola – by 120%, 50% and 171%, respectively. Conclusions: The developed products have high antioxidant activity, a balanced nutrient composition and significant content of macro- and microelements (potassium, magnesium, iron, copper, selenium). They can be recommended as resilience components of the diet to strengthen immunity, maintain metabolism, antioxidant protection and disease prevention, promoting healthy active longevity.

Keywords: amaranth, deep processing, resilience products, antioxidant activity, functional food, granola, muesli, nutritional value, healthy longevity, macronutrients.

Введение

Необходимость расширения ассортимента продуктов для здорового долголетия, так называемых резилиенс-продуктов (от англ. resilience), обусловлена ростом численности пациентов с аутоиммунными патологиями, снижением возраста пациентов с заболеваниями, характерными для старших возрастных групп населения. Причинами могут быть нарушения метаболизма вследствие высоких стрессовых и техногенных нагрузок, которым подвергается в настоящее время активное население. Нутритивная коррекция гомеостаза является актуальной нутрициологической и технологической задачей [19, 20]. Амарант – перспективное сырье, богатое биоактивными компонентами сырье для производства продуктов, продлевающих здоровое долголетие, что обусловлено его

Для цитирования
Родионова Н.С., Выродов Д.М. Перспективы применения продуктов глубокой переработки амаранта в технологиях резилиенс-продуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 135–140. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-135-140

For citation
Rodionova N.S., Vyrodov D.M. Prospects for the application of deep-processed amaranth products in resilience product technologies. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 135–140. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-135-140

© 2025, Родионова Н.С. и др. / Rodionova N.S. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

уникальным составом и свойствами [1, 4–15]. Семена амаранта не содержат глютен, богаты белком, который на 28–35% состоит из незаменимых аминокислот. Высокое содержание лизина, изолейцина и тирозина с фенилаланином делает амарант особенно ценным продуктом. Фракционный состав белка характеризуется высоким содержанием водорастворимых белков (от 42,5 до 51,6% от общей суммы белков) и практически полным отсутствием спирто- и щелочерастворимых белков по сравнению с другими зерновыми культурами.

Содержание липидов в амаранте колеблется от 6,7 до 7,9%, при этом триглицеролы составляют от 77 до 83%, фосфолипиды – от 2,7 до 4,3%, эфиры стеролов – от 3,1 до 6%, а неомыляемые стеролы – от 8,9 до 9,8%. Триглицеролы семян амаранта содержат насыщенные и ненасыщенные жирные кислоты, такие как миристиновая (0,2%), пальмитиновая (16,9–19,7%), стеариновая (19,5–21,6%), олеиновая (19,5–21,6%) и линолевая (42,0–43,7%). Наиболее ценными свойствами амаранта является его антиоксидантная активность, благодаря которой он оказывает замедляющее влияние на процессы старения на клеточном уровне. Наиболее уникальным антиоксидантом амаранта является сквален, его содержание достигает200 мг на 100 г (0,2 г/100 г) продукта. Содержание ещеодного известного антиоксиданта – витамина Е, колеблется от 113 до 192 мг%, при этом на α-токоферолы приходится от 5 до 10%, а на β-токоферолы – от 70 до 80%,

В настоящее время на рынке представлен достаточно широкий ассортимент продуктов переработки амаранта (мука, масло, крупчатка, белковый изолят), однако готовые пищевые или кулинарные формы на его основе практически отсутствуют.

Цель работы – оценка антиоксидантных свойств муки и крупчатки амаранта, разработка технологии продуктов для здоровьесбережения и долголетия на их основе.

Материалы и методы

Антиоксидантную активность (АОА) крупчатки (СТО 33281586–002–2022) и муки (СТО 33281586–002–2022) изучали хроматографическим методом с помощью прибора «Цвет-Яуза А01-АА»

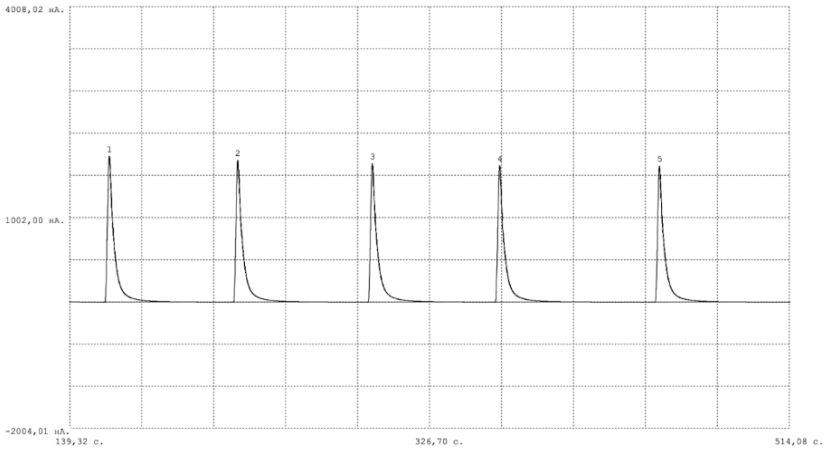


Рисунок 1. Хроматограмма муки амаранта

Figure 1. Chromatogram of amaranth flour

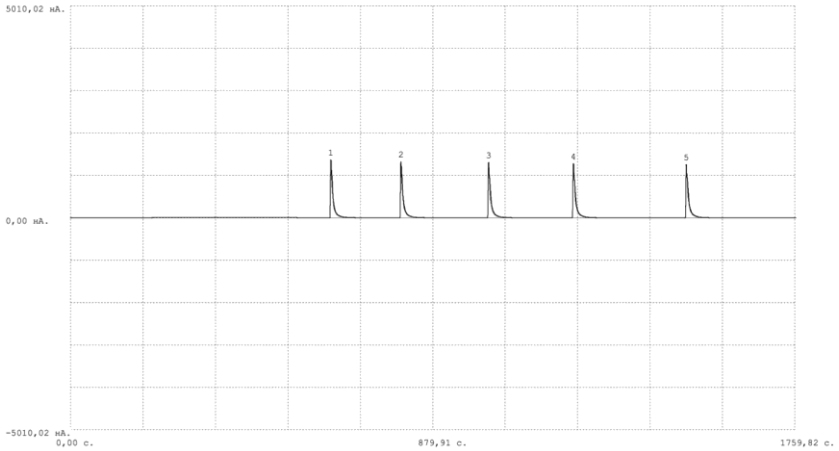


Рисунок 2. Хроматограмма крупчатки амаранта

Figure 2. Chromatogram of amaranth semolina

Установлено, что крупчатка обладает более высокой АОА в сравнении с мукой (таблица 1).

Таблица 1.

Сравнение антиоксидантной активности (АОА) крупчатки и муки

Table 1.

Comparison of Antioxidant Activity (AOA) of Grains and Flour

Образец Sample	Площадь выходной кривой исследуемого образца, S, у. е. Area, y.e.	Содержание антиоксидантов СА, мг/г Content, mg/g
Крупчатка амаранта	9138	0,17
Мука амаранта	7896	0,15

Были разработаны рецептурно технологические решения производства гранолы и мюсли, популярных продуктов для включения в рацион спортсменов, людей придерживающихся принципов правильного питания и здорового образа жизни. В качестве компонентов разрабатываемых рецептур были применены растительные продукты, обладающие биологически активными свойствами: зеленая греча [3, 18], мука семян тыквы [21, 22], орех кешью [2, 17], гидролизованная спирулина [16]. Соотношение рецептурных компонентов представлено в таблице 2.

Таблица 2.

Состав гранулы и мюсли

Table 2.

Composition of granules and muesli

Сырье Raw material	Масса, кг/т Mass, kg/g	
	Гранола Granola	Мюсли Muesli
Амарант крупчатка Amaranth semolina	12	10
Амарант мука | Amaranth flour	15	20
Яблоко | Apple	70	
Орех кешью | Cashew nuts	13	
Овсяные хлопья | Oat flakes	90	
Изюм белый | White raisins	25	15
Жмых семян тыквы | Pumpkin seed cake		100
Греча зеленая зерна Green buckwheat grains		15
Сироп фруктозный со спирулиной Fructose syrup with spirulina		12

При производстве гранолы крупчатку из амаранта подвергали термической обработке для достижения декстринизации крахмала, которую проводили при температуре 120 °С, в течение 60 мин. Муку амаранта вводили в виде крошки, для приготовления которой амарантовую муку смешивали с яблочным пюре и подвергали тепловой обработке при температуре 65 °С, продолжительности 90 мин. с последующим досушиванием при температуре 45 °С продолжительности 90 мин. Толщина яблочно-амарантового пюре в процессе сушки составляла не более 3 мм. В состав рецептуры мюсли была введена гидролизованная спирулина производства НПО «Биосоляр МГУ» (ТУ 9284–009–17230230–150 в виде фруктозного сиропа с известными функциональными свойствами [13].

Пищевая ценность и степень удовлетворенности организма при употреблении разработанных продуктов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Содержание жиров, белков и углеводов, степень удовлетворенности организма

Table 3.

Content of fats, proteins and carbohydrates, the degree of satisfaction of the body

Продукт Product	Содержание, г/100 г Content, g/100 g			Степень удовлетворенности организма, % Degree of satisfaction of the body, %		
	Ж	Б	У	Ж	Б	У
Мюсли Muesli	6,3	8,2	48,9	8,9	19,8	19,7
Гранола Granola	8,8	22,7	37,0	12,6	45,4	14,8

Разработанные продукты обладают высокой пищевой и энергетической ценностью, введение в рацион гранолы в количестве 172г, мюсли в количестве 225г обеспечит 25–30% энергетической потребности организма, при этом средняя степень удовлетворения в жирах, белках и углеводов составит 12; 30 и 15% соответственно.

На основании научных данных [8, 9, 12] был рассчитан минеральный состав новых продуктов.

Таблица 4.

Содержание макро- и микроэлементов в разработанных продуктах на 100 г смеси

Table 4.

Content of macro- and microelements in the developed products per 100 g of mixture

Показатель Index	Продукт | Product	
	Мюсли Muesli	Гранола Granola
Макроэлменты, мг | Macronutrients, mg		
K	387,2	689,2
Ca	59,7	64
Na	3,5	6,1
Mg	193,6	683
Fe	4	6,92
Cu	0,4	1,2
Микроэлементы, мкг | Micronutrients, mcg		
I	2,6	1,5
Se	5,3	5
Mb	13,9	13,4

Степень удовлетворения суточной потребности в минералах, (в %) при употреблении 100 г разработанного продукта представлена на рисунке 3.

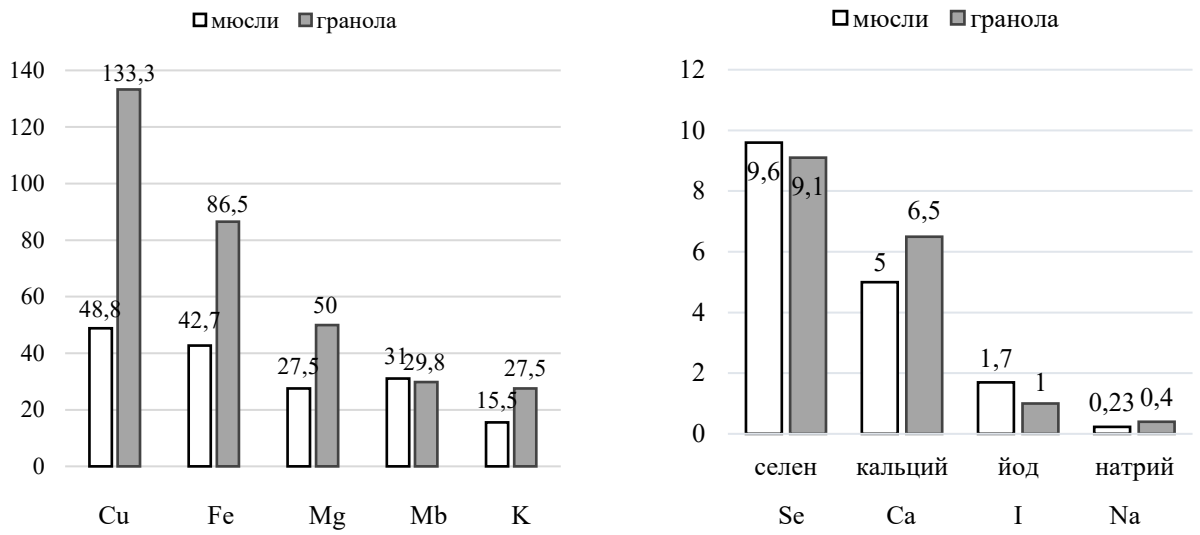


Рисунок 3. Степень удовлетворения суточной потребности в минералах, (в %) при употреблении 100 г разработанного продукта

Figure 3. The degree of satisfaction of the daily requirement for minerals (in %) when consuming 100 g of the developed product

Заключение

Разработанные продукты обладают высокой АОА 0,17 мг/г и высокими показателями пищевой ценности, степень удовлетворения в основных нутриентах при употреблении 225 г гранолы и 178 г мюсли составляет от 12% до 30%. Продукты обогащены железом, магнием, медью (больше 50 мг/100г продукта), являются источником калия, кальция, молибдена. Кроме того, содержат селен, йод, натрий, что в значительной степени повышает их биологическую ценность, способствует укреплению иммунной системы, поддержанию функций щитовидной железы, регуляции водно-солевого баланса, стабилизации метаболических процессов. Продукты обеспечивают антиоксидантную защиту организма и профилактику широкого спектра заболеваний и могут быть рекомендованы, как резилиенс-компоненты рациона для организации функционального питания для здорового и активного долголетия.

Литература

1 Белова Н.В., Иванов А.П. Применение амаранта в пищевой промышленности: современные исследования и перспективы // Технологии продуктов питания. 2020. Т. 15. № 3. С. 45–59.

2 Борисова А.В., Макарова Н.В., Хамтова Э.Х. Сравнительная характеристика содержания фенольных веществ и антиоксидантной активности некоторых видов употребляемых в пищу орехов // Химия растительного сырья. 2022. № 2. С. 95–104. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-harakteristika-soderzhaniya-fenolnyh-veschestv-i-antioksidantnoy-aktivnosti-nekotoryh-vidov-upotreblyaemyh-v-pischu (дата обращения: 29.11.2024).

3 Глаголева Л.Э., Коротких И.В. Растительный комплекс зеленой гречки в технологии производства сырников // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 4 (67). С. 132–136. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rastitelnyy-kompleks-zelenoy-grechki-v-tehnologii-proizvodstva-syrnikov/viewer (дата обращения: 29.11.2024).

4 Smith J., Brown L. The Role of Amaranth in Sustainable Agriculture // Journal of Agricultural Science and Technology. 2019. V. 11. № 4. P. 223–237.

5 Петров И.С., Кузнецова Л.М. Глубокая переработка амаранта: технологические аспекты и новейшие достижения // Научные исследования в области сельского хозяйства. 2018. Т. 7. № 2. С. 102–114.

6 Johnson M.P. Amaranth Processing Technologies and Their Application in Food Products // Food Science Innovations. 2017. V. 8. № 5. P. 78–89.

7 Зайцева О.И. Продукты глубокой переработки амаранта: инновации и потенциал // Агропромышленный вестник. 2021. № 10. С. 98–112.

8 Robinson T., Green E. Amaranth Derivatives in Resilient Product Technologies // International Journal of Food Science and Technology. 2022. V. 13. № 3. P. 185–199.

9 Джавахян М.А., Васильева И.Г., Ковалев С.В., Петрова Е.А. Амарант – перспективный источник получения сквалена // Вопр. обеспечения качества лекарственных средств. 2023. Т. 2. С. 47–58.

10 Холикназарова Ш.Р. Сфера использования амаранта на основе химического состава // Экономика и социум. 2022. № 12-1 (103). С. 1039–1050.

11 Пат. 2250046 Рос. Федерация. Биологически активная кальцийсодержащая добавка на основе амаранта для восполнения дефицита и нормализации обмена кальция в организме / Зеленков В.Н., Офицеров Е.Н.; заявл. 14.07.2003; опубл. 20.04.2005. Бюл. № 11.

12 Никитина В.В., Чекушкина Д.Ю. Перспективы использования продуктов переработки амаранта в технологиях пищевой промышленности // Пищевые инновации и биотехнологии. 2022. С. 90–91.

13 Лукин Н.Д., Сидоренко В.В., Кузнецов А.П., Михайлова И.В. Глубокая переработка крахмалсодержащего сырья: современное состояние и перспективы устойчивого развития // Пищ. пром-сть. 2021. № 11. С. 30–41.

14 Ruth O.N., Unathi K., Nomali N., Chinsamy M. Underutilization versus nutritional-nutraceutical potential of the Amaranthus food plant: A mini-review // Appl. Sci. 2021. V. 11. № 15. P. 6879. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/15/6879 (дата обращения: 29.11.2024).

15 Sattar M., Saeed F., Afzaal M., Ahmed A., Zahid M., Afzal A., Zeng X.A. An overview of the nutritional and therapeutic properties of amaranth // Int. J. Food Prop. 2024. V. 27. № 1. P. 263–272. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2024.2304266 (дата обращения: 29.11.2024).

16 Минюк Г.С., Дробецкая И.В., Тренкеншу Р.П., Вялова О.Ю. Ростовые и биохимические характеристики Spirulina (Arthrospira) platensis (Nordst.) Geitler при различных условиях азотного питания // Экология моря. 2002. №62. С. 61–66.

17 Нилова Л.П., Малютенкова С.М. Анализ биохимического состава и антиоксидантных свойств орехов, реализуемых на потребительском рынке // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. № 2 (85). С. 124–130. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-biohimicheskogo-sostava-i-antioksidantnyh-svoystv-orehov-realizuemyh-na-potrebitelskom-rynke (дата обращения: 29.11.2024).

18 Протасова О.С., Белоконова Н.А., Попова О.С. Оценка минерального состава гречневой крупы в зависимости от региона произрастания и способа обработки зерна // Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения: материалы IV Междунар. (74 Всерос.) науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2019. С. 757–764. URL: https://elib.usma.ru/bitstream/usma/3851/1/USMU_Sbornik_statei_2019_1_176.pdf (дата обращения: 29.11.2024).

19 Batsikadze G., Wüllner U., Paulus W., Kuo M.F., Nitsche M.A. Reply: Comparison of the effect of continuous and intermittent theta burst stimulation on motor cortex excitability // BMC Complement. Altern. Med. 2016. V. 16. P. 157. URL: https://bmccomplementmedtherapies.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12906-016-1130-0 (дата обращения: 29.11.2024).

20 Ильницкий А.Н., Белоусов Н.И., Осипова О.А., Фесенко Э.В. Научные исследования в области геронтологии и гериатрии в Десятилетие здорового старения (2021–2030) // Клиническая геронтология. 2021. Т. 32. № 6. С. 5–8. doi: 10.29296/25877305-2021-06-01.

21 Tomić J., Lončarević I., Pajin B., Šoronja-Simović D., Šubarić D., Šereš Z., Pezo L. Gluten-free crackers using chickpea and pumpkin seed press cake blend: Effects of gastrointestinal digestion // Food Biosci. 2024. V. 60. P. 104534. doi: 10.1016/j.fbio.2024.104534.

22 Bashir K., Tauseef S.I., Rizwan M., Rasheed R. (eds.) Pumpkin Seed: Newer Perspectives. Springer, 2025. 175 p. doi: 10.1007/978-3-031-83803-3.

23 Hadidi M., Tarahi M., Innerhofer G., Pitscheider I., Löscher A., Pignitter M. Pumpkin seed as a sustainable source of plant-based protein for novel food applications // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2025. V. 65. № 33. P. 8566–8591. doi: 10.1080/10408398.2025.2505235.

24 Liangyu Li, Wang Y., Zhang L., Chen H., Liu X. Analysis of polyphenols in millet and processing effects on antioxidant activity // Food Sci. Technol. (Campinas). 2023. V. 43. e92922. doi: 10.1590/fst.92922.

25 Patil N.D., Bains A., Chawla P. Amaranth // Cereals and Nutraceuticals. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 251–284. doi: 10.1007/978-981-99-8195-8_12.

References

1 Belova N.V., Ivanov A.P. Application of amaranth in the food industry: modern research and prospects. Tekhnologii produktov pitaniya. 2020. vol. 15. no. 3. pp. 45–59. (in Russian).

2 Borisova A.V., Makarova N.V., Khamtova E.Kh. Comparative characteristics of the content of phenolic substances and antioxidant activity of some types of edible nuts. Khimiya rastitel'nogo syr'ya. 2022. no. 2. pp. 95–104. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-harakteristika-soderzhaniya-fenolnyh-veschestv-i-antioksidantnoy-aktivnosti-nekotoryh-vidov-upotreblyaemyh-v-pischu (accessed 29.11.2024). (in Russian).

3 Glagoleva L.E., Korotkikh I.V. Plant complex of green buckwheat in the technology of cottage cheese pancakes production. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii. 2016. no. 4 (67). pp. 132–136. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/rastitelnyy-kompleks-zelenoy-grechki-v-tehnologii-proizvodstva-syrnikov/viewer (accessed 29.11.2024). (in Russian).

4 Smith J., Brown L. The Role of Amaranth in Sustainable Agriculture. Journal of Agricultural Science and Technology. 2019. vol. 11. no. 4. pp. 223–237.

5 Petrov I.S., Kuznetsova L.M. Deep processing of amaranth: technological aspects and latest achievements. Nauchnye issledovaniya v oblasti sel'skogo khozyaistva. 2018. vol. 7. no. 2. pp. 102–114. (in Russian).

6 Johnson M.P. Amaranth Processing Technologies and Their Application in Food Products. Food Science Innovations. 2017. vol. 8. no. 5. pp. 78–89.

7 Zaitseva O.I. Products of deep processing of amaranth: innovations and potential. Agropromyshlennyi vestnik. 2021. no. 10. pp. 98–112. (in Russian).

8 Robinson T., Green E. Amaranth Derivatives in Resilient Product Technologies. International Journal of Food Science and Technology. 2022. vol. 13. no. 3. pp. 185–199.

9 Dzhavakhyan M.A., Vasil'eva I.G., Kovalev S.V., Petrova E.A. Amaranth is a promising source of squalene. Voprosy obespecheniya kachestva lekarstvennykh sredstv. 2023. vol. 2. pp. 47–58. (in Russian).

10 Kholiknazarova Sh.R. The scope of amaranth use based on its chemical composition. Ekonomika i sotsium. 2022. no. 12-1 (103). pp. 1039–1050. (in Russian).

11 Patent RU 2250046 C1, Russian Federation. Biologically active calcium-containing additive based on amaranth for replenishing deficiency and normalizing calcium metabolism in the body / Zelenkov V.N., Ofitserov E.N.; declared 14.07.2003; published 20.04.2005. Bull. no. 11. (in Russian).

12 Nikitina V.V., Chekushkina D.Yu. Prospects for the use of amaranth processing products in food industry technologies. Pishchevye innovatsii i biotekhnologii. 2022. pp. 90–91. (in Russian).

13 Lukin N.D., Sidorenko V.V., Kuznetsov A.P., Mikhailova I.V. Deep processing of starch-containing raw materials: current state and prospects for sustainable development. Pishchevaya promyshlennost'. 2021. no. 11. pp. 30–41. (in Russian).

14 Ruth O.N., Unathi K., Nomali N., Chinsamy M. Underutilization versus nutritional-nutraceutical potential of the Amaranthus food plant: A mini-review. Applied Sciences. 2021. vol. 11. no. 15. 6879. Available at: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/15/6879 (accessed 29.11.2024).

15 Sattar M., Saeed F., Afzaal M., Ahmed A., Zahid M., Afzal A., Zeng X.A. An overview of the nutritional and therapeutic properties of amaranth. International Journal of Food Properties. 2024. vol. 27. no. 1. pp. 263–272. Available at: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2024.2304266 (accessed 29.11.2024).

16 Minyuk G.S., Drobetskaya I.V., Trenkenshu R.P., Vyalova O.Yu. Growth and biochemical characteristics of Spirulina (Arthrospira) platensis (Nordst.) Geitler under different nitrogen nutrition conditions. Ekologiya morya. 2002. no. 62. pp. 61–66. (in Russian).

17 Nilova L.P., Malyutenkova S.M. Analysis of the biochemical composition and antioxidant properties of nuts sold on the consumer market. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii. 2020. no. 2 (85). pp. 124–130. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-biohimicheskogo-sostava-i-antioksidantnyh-svoystv-orehov-realizuemyh-na-potrebitelskom-rynke (accessed 29.11.2024). (in Russian).

18 Protasova O.S., Belokonova N.A., Popova O.S. Assessment of the mineral composition of buckwheat groats depending on the region of growth and method of grain processing. *Aktual'nye voprosy sovremennoi meditsinskoi nauki i zdravookhraneniya: materiały IV Mezhdunar. (74 Vseros.) nauch.-prakt. konf.* Ekaterinburg, 2019. pp. 757–764. Available at: https://elib.usma.ru/bitstream/usma/3851/1/USMU_Sbornik_statei_2019_1_176.pdf (accessed 29.11.2024). (in Russian).

19 Batsikadze G., Wüllner U., Paulus W., Kuo M.F., Nitsche M.A. Reply: Comparison of the effect of continuous and intermittent theta burst stimulation on motor cortex excitability. BMC Complementary and Alternative Medicine. 2016. vol. 16. 157. Available at: https://bmccomplementmedtherapies.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12906-016-1130-0 (accessed 29.11.2024).

20 Ilnitskiy A.N., Belousov N.I., Osipova O.A., Fesenko E.V. Scientific research in the field of gerontology and geriatrics in the Decade of Healthy Aging (2021–2030). Klinicheskaya gerontologiya. 2021. vol. 32. no. 6. pp. 5–8. doi: 10.29296/25877305-2021-06-01. (in Russian).

21 Tomić J., Lončarević I., Pajin B., Šoronja-Simović D., Šubarić D., Šereš Z., Pezo L. Gluten-free crackers using chickpea and pumpkin seed press cake blend: Effects of gastrointestinal digestion. Food Bioscience. 2024. vol. 60. 104534. doi: 10.1016/j.fbio.2024.104534.

22 Bashir K., Tauseef S.I., Rizwan M., Rasheed R. (eds.) Pumpkin Seed: Newer Perspectives. Springer, 2025. 175 p. doi: 10.1007/978-3-031-83803-3.

23 Hadidi M., Tarahi M., Innerhofer G., Pitscheider I., Löscher A., Pignitter M. Pumpkin seed as a sustainable source of plant-based protein for novel food applications. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2025. vol. 65. no. 33. pp. 8566–8591. doi: 10.1080/10408398.2025.2505235.

24 Li L., Wang Y., Zhang L., Chen H., Liu X. Analysis of polyphenols in millet and processing effects on antioxidant activity. Food Science and Technology (Campinas). 2023. vol. 43. e92922. doi: 10.1590/fst.92922.

25 Patil N.D., Bains A., Chawla P. Amaranth. In: Cereals and Nutraceuticals. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. pp. 251–284. doi: 10.1007/978-981-99-8195-8_12.

Сведения об авторах

Наталья С. Родионова д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, natalya.s.ch@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6940-7998

Дмитрий М. Выродов ассистент, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, notpp@mail.ru

Information about authors

Natalia S. Rodionova Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Service and Restaurant Business, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, natalya.s.ch@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6940-7998

Dmitriy M. Virodov assistant, Department of Service and Restaurant Business, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, notpp@mail.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 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025
Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-141-152 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.7:54.061/54.062 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Антипитательные факторы зернобобовых культур: качественный и количественный анализ танинов в чечевице и продуктах ее переработки

Виктор Е. Плотников [1] viktor_plotnikov_1999@mail.ru 0000-0001-6707-8337
Магомед Г. Магомедов [1] mmg@inbox.ru 0000-0003-2494-4973
Павел Т. Суханов [1] pavel.suhanov@mail.ru 0000-0002-2588-9286
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
Дарья Е. Скосарь [1] dartch.skosar@yandex.ru 0009-0006-4260-8948

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. Карла Маркса, 67а, Воронеж, 394030, г. Воронеж

Аннотация. Питательная ценность бобовых культур существенно снижается из-за наличия в них антипитательных веществ. Чечевица также содержит определенное количество антинутриентов. Танины образуют комплексы с белками, что вызывает инактивацию многих пищеварительных ферментов и снижает усвояемость белка. Для повышения питательной ценности продуктов используются различные традиционные технологические методы обработки. В работе определяли наличие танинов качественным и количественным методом в чечевице двух различных сортов КДЦ «Кермит» и «Орловская краснозерная», а также продуктах их переработки (чечевичные экструдаты, чечевица сушеная, чечевица пророщенная, чечевичные экстракты (аквафаба)). В данной работе для качественного определения танинов использовали метод осаждения белков раствором желатина. Наиболее ярко выражено наличие танинов в нативной чечевице, менее выраженные свойства были проявлены в образцах сушеной чечевицы, в пророщенной чечевице и чечевичном экстракте была отрицательная реакция с желатином, что свидетельствует об отсутствии дубильных веществ или их незначительном количестве в данных полуфабрикатах. Для определения групповой принадлежности дубильных веществ была проведена качественная реакция полученных отфильтрованных экстрактов с солями трехвалентного железа. Качественная реакция в образце нативной чечевицы показала преобладающее количество дубильных веществ конденсированной группы из-за слабого черно-зеленого окрашивания. В образце чечевичного экструдата эта же реакция была несколько меньше, а в образцах сушеной, пророщенной чечевицы, чечевичном экстракте реакции не произошло, что также говорит об отсутствии дубильных веществ или их незначительном количестве. Оценку количественного содержания танинов в исследуемых образцах проводили методом фотоэлектроколориметриметрии. Результаты показали, что наиболее эффективный метод снижения концентрации танинов – в 4,1–3,4 раза при проращивании чечевицы. Процесс экструдирования чечевицы способствует снижению танинов – в 1,68–2,5 раза. При получении чечевичной суспензии (аквафабы) содержание танинов снизилось в 1,5–1,93 раза (в пересчете на абсолютно сухое вещество).

Ключевые слова: чечевица, продукты переработки чечевицы, антипитательные вещества, методы обработки, методы определения танинов.

Anti-nutritional factors of leguminous crops: qualitative and quantitative analysis of tannins in lentils and their processed products

Viktor E. Plotnikov [1] viktor_plotnikov_1999@mail.ru 0000-0001-6707-8337
Magomed G. Magomedov [1] mmg@inbox.ru 0000-0003-2494-4973
Pavel T. Sukhanov [1] pavel.suhanov@mail.ru 0000-0002-2588-9286
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
Daria E. Skosar [1] dartch.skosar@yandex.ru 0009-0006-4260-8948

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
2 Voronezh Branch of the Plekhanov Russian University of Economics, 67a Karl Marx St., Voronezh, 394030, Voronezh

Для цитирования
Плотников В.Е., Магомедов М.Г., Суханов П.Т., Плотникова И.В., Полянский К.К., Скосарь Д.Е. 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

For citation
Plotnikov V.E., Magomedov M.G., Sukhanov P.T., Plotnikova I.V., Polyansky K.K., Skosar D.E. Anti-nutritional factors of leguminous crops: qualitative and quantitative analysis of tannins in lentils and their processed products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 141–152. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-141-152

© 2025, 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

Abstract. The nutritional value of legumes is significantly reduced due to the presence of anti-nutritional substances in them. Lentils also contain a certain amount of antinutrients. Tannins form complexes with proteins, which causes inactivation of many digestive enzymes and reduces protein digestibility. Various traditional processing methods are used to increase the nutritional value of products. The presence of tannins was determined by qualitative and quantitative methods in lentils of two different varieties of KDC "Kermit" and "Orlovskaya Krasnozernaya", as well as their processed products (lentil extrudates, dried lentils, sprouted lentils, lentil extracts (aquafaba)). In this work, the method of precipitation of proteins with a gelatin solution was used for the qualitative determination of tannins. The presence of tannins in native lentils is most pronounced, less pronounced properties were shown in samples of dried lentils, sprouted lentils and lentil extract had a negative reaction with gelatin, which indicates the absence of tannins or their insignificant amount in these semi-finished products. To determine the group affiliation of tannins, a qualitative reaction of the obtained filtered extracts with trivalent iron salts was carried out. A qualitative reaction in a sample of native lentils showed a predominant amount of tannins of the condensed group due to a weak black-green staining. In the sample of lentil extrudate, the same reaction was slightly less, and in the samples of dried, sprouted lentils, and lentil extract, no reaction occurred, which also indicates the absence of tannins or their insignificant amount. The quantitative content of tannins in the studied samples was assessed by photoelectrocolorimetry. The results showed that the most effective method of reducing the concentration of tannins is 4.1–3.4 times when germinating lentils. The process of lentil extrusion helps to reduce tannins by 1.68–2.5 times. Upon receipt of the lentil suspension (aquafabs), the tannin content decreased by 1.5–1.93 times (in terms of an absolutely dry substance).

Keywords: lentils, lentil processing products, anti-nutritional substances, processing methods, methods for determining tannins.

Введение

Растительное сырье является ценным источником питательных и эссенциально важных веществ (белков, незаменимых аминокислот, пищевых волокон, витаминов, микроэлементов и полиненасыщенных жирных кислот) [1]. Однако, питательная ценность его существенно понижается из-за наличия в составе антинутриентов (антипитательных веществ), синтезируемых растениями [2], которые в основном накапливаются в отрубной части оболочки и меньше в семядоле, зерне или плоде. Они придают горечь сырью, являются защитной системой для растений от нападения травоядных, насекомых и патогенов, а также средством для выживания в неблагоприятных ростовых условиях. При потреблении растений с высоким содержанием антинутриентов возникает ряд неблагоприятных физиологических эффектов, что наносит вред организму за счет ингибирования действия пищеварительных ферментов и приводит к снижению поглощения питательных веществ, их перевариванию и всасыванию в кишечнике [3].

Антинутриенты часто связывают с термином «антипитательные факторы» (ANF), к которым относятся: соли фитиновой кислоты (фитаты) и фитиновая кислота, танины (дубильные вещества), алкалоиды, лектины, олигосахариды (рафиноза, стахиоза), пиримидиновые гликозиды (вицин и конвицин), оксалат кальция, сапонины и ингибиторы протеаз [2].

Фитаты связывают минералы (железо, цинк, магний и кальций) и при избыточном содержании существенно снижают их поглощение из пищи [4]. Танины относятся к классу антиоксидантных полифенолов [5], в организме они связываются с белками, что затрудняет его усвояемость и доступность аминокислот [6]. Лектины плохо усваиваются организмом, они относятся к семейству белков и связывают (склеивают) углеводы, вызывая их агглютинацию. Есть мнение, что лектины провоцируют воспалительные процессы, аллергии и аутоиммунные заболевания [7]. Оксалат кальция снижает всасывание кальция в овощах (например, шпинат, щавель). Ингибиторы протеаз препятствуют перевариванию белка, ингибируя пищеварительные ферменты, что вызывает газообразование в кишечнике [8]. Рафиноза, как и стахиоза, относятся к трисахаридам, состоящих из остатков глюкозы, фруктозы и галактозы, и в большинстве своем накапливаются в семенах и корнях во время развития растения, их концентрация в семенах увеличивается по мере созревания и высыхания семян. При ферментации в толстом кишечнике они вызывают вздутие живота и рост микрофлоры. Рафиноза гидролизуется до D-галактозы и сахарозы с помощью α-галактозидазы. Однако недавние эпидемиологические исследования показали, что многие антинутриенты в небольших количествах могут быть полезными для профилактики таких заболеваний, как рак и коронарные патологии [9].

Бобовые культуры несмотря на высокую потенциально питательную и полезную для здоровья ценность, являются одними из источников антинутриентов в рационе человека, что снижает их биологическую ценность и использование в питании [1]. Документально подтверждено наличие в зернобобовых определенных антипитательных веществ, препятствующих перевариванию пищи, % [10]: фитатов (соя – 1,0–2,22, фасоль – 0,61–2,38, горох – 0,22–1,22, нут – 0,28–1,60, маш – 0,54, чечевица – 0,27–1,51); танинов (соя – 0,2–0,5, фасоль – 0–0,93, горох – 1,5–2,6, нут – 0,21–0,45, чечевица – 0,02–0,9); рафинозы (соя – 1–1,6, фасоль – 0,12–0,29, горох – 0,3–1,2, нут – 0,182, маш – 0,9, чечевица – 0,3–1,0); стахиозы (соя – 3–6, горох – до 1,6, нут – 1,44–1,63, маш – 2,7, чечевица – 1,0–2,72),

лектинов – 2–10, в том числе в чечевице – 2–3 (от общей массы белка), ингибиторов трипсина (соя – 0,3–0,5, фасоль – 3,15–4,1, горох – 0,3–1,82, нут – 0,23–0,56, маш – 0,12–0,13, чечевица – 0,2–0,35). Максимально безопасными уровнями потребления зернобобовых являются: сои – до 100 г (расчет на сухую крупу), других бобовых – до 200 г (сухой крупы) или 300–400 г (приготовленной) [11].

Чечевица, как и все бобовые, содержит определенное количество перечисленных антинутриентов, но в меньшем количестве. По сравнению с другими она обладает меньшей активностью ингибиторов трипсина. Переваримость белков чечевицы системой пищеварительных ферментов пепсин-трипсин составляет 83%, что практически идентично для белков мяса высшего сорта [12].

Танины (или танниды, или дубильные вещества) – это водорастворимые соединения фенольной природы, представляющие собой сложную смесь из более трех десятков полифенольных соединений, состоящих из танина, катехинов, полифенолов и их производных с высокой молекулярной массой от 500 до 3000 [13]. Они оказывают дубящие свойства с характерным вяжущим вкусом и вызывают ощущение сухости и терпкости во рту. Дубильное действие танинов основано на способности образовывать прочные комплексы с полимерами – углеводами (пектиновые вещества, целлюлоза и др.), некоторыми минеральными ионами, белками и алкалоидами из-за наличия водородной связи у карбоксильного кислорода пептидной группы, что приводит к снижению доступности незаменимых аминокислот, ухудшению переваривания и усвояемости белков. Эти полифенолы содержат большое количество гидроксильных групп и поэтому способны образовывать поперечные связи с белками и другими макромолекулами. Низкомолекулярные фенольные соединения с молекулярной массой < 500 и соединения с высокой молекулярной массой > 3000 являются неэффективными дубильными веществами. Взаимодействие гидроксильной группы танинов и карбонильной группы белков может быть как обратимым, так и необратимым. Гидрофобные белки с большой молекулярной массой, открытой структурой, богатые пролином в наибольшей степени связываются с танином. Как правило, молекулам дубильных веществ требуется не менее 12 гидроксильных групп и не менее пяти фенильных групп для того, чтобы функционировать как вещества, связывающие белки [6].

Количество дубильных веществ в растении зависит от многих биологических факторов: количество солнца, влажность почвы и время суток. Для каждого растения существуют свои закономерности, определяющие индивидуальный уровень дубильных веществ [14]. Они обусловливают изменение цвета семян от светло-зелёного до жёлтого и тёмно-коричневого при хранении.

Танины придают плодам, семенам и листьям терпкий вяжущий вкус. Они подавляют рост патогенных микроорганизмов в растении, защищают его от поедания животными, так как жвачным животным вкус танинов неприятен. При попадании в организм человека и животных они образуют комплексы с белками, которые вызывают инактивацию многих пищеварительных ферментов и снижают усвояемость белка. При избыточном попадании в организм они оказывают токсичное действие на печень, нервную систему, легкие, почки, при этом нарушается минеральный обмен.

С другой стороны растения, содержащие дубильные вещества, обладают высоким содержанием антиоксидантов, способствующих укреплению здоровья. Их используют в медицине, как противовоспалительные, кровоостанавливающие и бактерицидные средства. Они способствуют заживлению ран, укрепляют стенки кровеносных сосудов. Положительно влияют на работу желудочно-кишечного тракта, подавляют деятельность болезнетворных микроорганизмов, способствуют выведению отложений, помогают усвоению полезных соединений [15].

Некоторые культурные растения содержат разнообразное количество дубильных веществ. В большей степени они распространены среди представителей двудольных (паслёновые, бобовые, крестоцветные, розоцветные) и содержатся в максимальных количествах в семенах злаковых (сорго, просо, ячмень и др.), бобовых (горох, фасоль, соя, чечевица, нут и др.), зеленых недозревших овощах, фруктах и ягодах (яблоки, бананы, гранат, ежевика, вишня, кизил, смородина, клюква, финики, айва, виноград, боярышник, персики, груши, хурма, сливы, малина, абрикосы, клубника, земляника и др.). Достаточно много их содержится в какао-бобах, кофе, чае, соках, вине, орехах (миндаль, грецкий), коре дуба, ивы и бука, рожковом дереве, некоторых листовых и специях (ревень, гвоздика, эстрагон, тмин, тимьян, ваниль, корица) (таблица 1) [16].

Таблица 1.

Содержание танинов в некоторых видах растительного сырья

Table 1.

Tannin content in some types of plant materials

Наименование сырья Name of the raw material	Содержание танинов, % Tannin content, %
*Бобовые культуры	Legumes*	
Фасоль | Beans	0…0,93
Соя | Soy	0,2…0,5
Горох | Peas	1,5…2,9
Чечевица | Lentil – черная | black – коричневая | brown	0,02–0,9 0,33 0,21
Нут | Chickpeas	0,09…0,4
*Зерновые культуры	Grain crops*	
Сорго | Sorghum – белой окраски | white coloring – бурой окраски | brown color	1,29 ± 0,56 6,10 ± 2,00
Ячмень | Barley	0,1…0,3
Просо | Millet	0,1…3,0
Другое растительное сырье | Other vegetable raw materials	
Яблоки | Apples	0,025…0,34
Гранат | Pomegranate	9,36…15,71
Хурма | Persimmon	0,1…0,5
Вишня | Cherry	0,13…0,34
Кизил | Dogwood	0,3…0,61
Черная смородина | Black currant	0,332…0,42
Какао-бобы | Cocoa beans	3,0…6,0
Какаовелла | Kakaovella	0,7…1,3
Чай черный листовой | Black leaf tea	5,5…32,6
Чай зеленый листовой | Green leaf tea	28,5…41,4

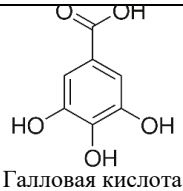
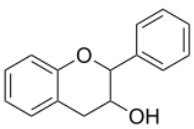
Существует два основных класса дубильных веществ, входящих в состав растительного сырья: гидролизуемые (галлотанины, эллаготанины) и конденсированные (проантоцианидины, полифлавоноидные танины, танины катехольного типа, танины пирокатекольного типа, негидролизуемые танины или флаволаны) (таблица 2) [17].

Таблица 2.

Классификация дубильных веществ (танинов)

Table 2.

Classification of tannins

Класс танинов Tannin class	Структурная формула The structural formula	Источник A source
Гидролизуемые Hydrolysable	 Галловая кислота Gallic acid	Растения Plants
Конденсированные флобатанины Condensed phlobatanins (изомеризованные конденсированные танины С С-кольцом | isomerized condensed tannins C C-ring)	 Флаван-3-ол Flavan 3-ol	Растения Plants

Конденсированные дубильные вещества – это продукты конденсации катехинов (флаван-3-олов), лейкоантоцианидинов (флаван–3,4–диолов), реже оксистильбенов (фенилэтиленов). Содержатся и преобладают они в коре калины, корневищах лапчатки, плодах черники, черемухи, траве зверобоя, листьях чая.

Дубильные вещества конденсированной группы образуют полимерные молекулы с помощью углерод-углеродных связей (-С-С-). Прочные ковалентные связи придают соединениям устойчивость к воздействию кислот, щелочей и ферментов. При действии минеральных кислот молекула конденсированных дубильных веществ окисляется с увеличением молекулярной массы и образованием продуктов окислительной конденсации – флобафенов красно-коричневого цвета [17].

Чаще всего в растениях встречается смесь гидролизуемых и конденсированных дубильных веществ с преобладанием той или иной группы, поэтому классифицировать их достаточно сложно. В состав смесей дубильных веществ входят также простые фенолы (резорцин, пирокатехин, пирогаллол, флороглюцин и др.) и свободные фенолкарбоновые кислоты (галловая, эллаговая, протокатеховая и др.) [18].

Например, большинство ягод, таких как клюква, клубника, черника, содержат как гидролизуемые, так и конденсированные танины. В хмеле присутствуют конденсированные танины. В чае они представлены катехинами с галловыми эфирами, их содержание в заварке из прессованного чая составляет 4%, из зеленого – до 20%. Так как тахины хуже растворяются в холодной воде, то при охлаждении заварки они придают мутность [19].

Содержащиеся в семенах чечевицы танины, состоящие из сложных эфиров фенокислот с моносахаридами или многоатомными спиртами, являются важным лекарственным средством, а в организме они связывают бактериальные токсины и ядовитые соли Hg, Pb и др., выводят их из организма. Большинство негидролизуемых танинов относятся к классу флаванолов (например, катехин) – укрепляют стенки кровеносных капилляров и способствуют эффективному использованию организмом человека аскорбиновой кислоты [20].

Потребление продуктов с высоким содержанием танинов без соответствующей предварительной обработки может способствовать дефициту питательных веществ и микроэлементов. Правильная обработка сырья позволяет раскрыть весь питательный потенциал этих важнейших сельскохозяйственных культур [21].

Для повышения питательной ценности продуктов используются различные традиционные технологические методы обработки (таблица 3): очистка от примесей, промывание, замачивание, измельчение, термическая обработка, проращивание, ферментация. Они позволяют нейтрализовать негативное действие антинутриентов (фитатов, танинов, ингибиторов ферментов, сапонинов и др.) [22], превращая сырье в полноценный и питательный продукт для здорового рациона [23].

Таблица 3.
Эффективные методы обработки продуктов
Table 3.
Effective food processing methods

Основные методы обработки Basic processing methods	Характеристика и основное предназначение Characteristics and main purpose
Очистка, промывание, длительное замачивание Cleaning, rinsing, prolonged soaking	Многие антипитательные вещества, в том числе танины, являются водорастворимыми и вымываются при замачивании в воде. Many anti-nutrients, including tannins, are water-soluble and are washed out when soaked in water.
Измельчение (фрезерование) и очистка Grinding (milling) and cleaning	Так как танины концентрируются в отрубях и оболочке зерна, то процесс помола и удаления оболочки значительно снижает их содержание, при этом также удаляется часть полезных минералов и клетчатки. Since tannins are concentrated in the bran and the shell of the grain, the process of grinding and removing the shell significantly reduces their content, while also removing some of the useful minerals and fiber.
Термическая обработка (варка, автоклавирование, экструзия, ИК-излучение и др.) Heat treatment (cooking, autoclaving, extrusion, IR radiation, etc.)	Обработка под давлением (автоклавирование) является высокоэффективным методом снижения уровня таниновпо сравнению с обычной варкой, что приводит к значительному улучшению усвояемости белка. Pressure treatment (autoclaving) is a highly effective method of reducing tannin levels compared to conventional cooking, which leads to a significant improvement in protein digestibility.
Проращивание Germination	При проращивании зерна активируются естественные ферменты, которые способствуют разложению антипитательных веществ и в целом для многих культур оно способствует улучшению питательного профиля. During grain germination, natural enzymes are activated that promote the decomposition of anti-nutrients, and in general, for many crops, it helps to improve the nutritional profile.

Важно отметить, что удаление внешнего слоя оболочки и подготовка семян значительно снижают присутствие антипитательных соединений. Количество таких веществ можно уменьшить с помощью длительного замачивания, ферментации или проращивания сырья. При термической обработке активность ингибиторов трипсина почти полностью снижается [24].

Вымачивание – один из простых и наиболее эффективных способов удаления антипитательных факторов. Бобовые замачивают в избытке воды на длительное время с периодической сменой воды. При замачивании снижается содержание и активность фитата, ингибиторов протеаз, лектинов, танинов. Так, после 12-ти часового выдерживания гороха в воде, содержание в нем фитата уменьшается до 9%. Замачивание гороха в течение 6–18 ч снижает лектины на 38–50%, танины – на 13–25% и ингбиторы протеаз – на 28–30%. Вымачивание семян нута приводит к снижению доли танинов в нем на 53% [25]. Тем не менее, уменьшение количества антинутриентов зависит от типа бобовых. Так, замачивание фасоли и соевых бобов незначительно влияет на ингибиторы протеаз.

При проращивании или ферментации в семенах происходят интенсивные изменения, которые приводят к деградации антипитательных веществ (фитатов, ингибиторов протеаз, рафинозы). Снижение в зерне содержания рафинозы, а также и стахиозы, происходит за счет расщепления их до простых легкоусвояемых форм. При прорастании количество фитата уменьшается на 37–81% в различных типах зерен и бобовых, также снижается уровень лектинов и ингибиторов протеаз. Во время ферментации эффективно деградируют фитаты и лектины. Например, ферментация предварительно набухшей коричневой фасоли в течение 48 ч вызывает снижение содержания фитата на 88% [24].

Высокая температура, особенно при кипячении, может разрушить антинутриенты, такие как лектины, танины, ингибиторы протеаз. Имеются данные, что при термической обработке активность ингибиторов трипсина почти полностью снижается на 60–95%. Напротив, фитаты являются термостойкими и не так легко деградируют при кипячении. Так, при кипячении гороха в течение 80 мин ингибиторы протеаз снижаются на 70%, лектины – на 79% и танины – на 69% [26]. После отваривания их количество в фасоли и чечевицы снижается до 40 – 80 мг/100 г, в маше до 18–30 мг/100 г, а в соевом молоке и тофу до 30 – 50 мг/100 г. [27].

Сочетание нескольких методов может существенно уменьшить количество антинутриентов, иногда даже полностью. Так, вымачивание, проращивание и молочнокислая ферментация уменьшают фитаты практически

полностью. Кроме того, вымачивание и кипячение приводят к сокращению лектинов, танинов и ингибиторов протеаз на 98–100% [28].

Таким образом, содержание отдельных антинутриентов снижается наиболее эффективно при сочетании следующих методов: фитатов (при замачивании, проращивании и ферментации); лектинов (при замачивании, кипячении, нагревании и брожении); танинов (при замачивании и кипячении); ингибиторов протеаз (при замачивании, проращивании и кипячении); оксалата кальция (при замачивании и кипячении).

На сегодняшний день актуальным является исследование влияния различных способов обработки на содержание антипитательных веществ, в том числе танинов в бобовых, в частности чечевице и продуктах ее переработки.

Цель работы – определение наличие танинов качественным и количественным методом в чечевице двух различных сортов и продуктах их переработки (чечевичные экструдаты, чечевица сушеная, чечевица пророщенная, чечевичные экстракты (аквафаба)).

Материалы и методы

В качестве объектов выбраны образцы нативной чечевицы двух сортов КДЦ «Кермит» (выращенной в Воронежской области) и «Орловская краснозерная» (выращенной в Липецкой области) урожая 2024 г. Перед использованием образцы чечевицы очищали от посторонних примесей, промывали в холодной воде и замачивали на 12 ч. Чечевичные экструдаты готовили при следующих параметрах процесса экструдирования: давление – 30 атм (3 МПа), продолжительность экструзии от загрузки до выхода – 10–15 с, температура в предматричной зоне – 120 ± 1 °С, температура на выходе продукта – 158 ± 1 °С. Чечевицу пророщенную готовили путем замачивания и проращивания в воде в течение 8 сут. Чечевичные экстракты (аквафаба) получали при уваривании чечевицы в воде в течение 40 мин при соотношении 1:5, после чего разделяли получившийся экстракт от вареной чечевицы, которую высушивали конвективным способом до чечевицы сушеной при температуре 50–60 °С до необходимой влажности.

Существует три метода качественного анализа дубильных веществ: осаждение белков или алкалоидов, реакция с фенольными соединениями и деполимеризация [17].

В данной работе для качественного определения танинов использовали метод осаждения белков раствором желатина. Из сырья танины выделяются в виде смеси полимеров и представляют собой аморфные вещества желтого или желто-бурого цвета, без запаха, вяжущего вкуса. Они хорошо растворяются в воде (особенно в горячей) с образованием коллоидных растворов, которые хорошо осаждаются желатином или алкалоидами [29].

Реакция осаждения желатином является специфической реакцией, для этого используют 1 %-ый раствор желатина, приготовленный на 10 %-ом растворе натрия хлорида. При этом появляется хлопьевидный осадок или муть, исчезающие при добавлении избытка желатина. Отрицательная реакция с желатином свидетельствует об отсутствии дубильных веществ. Для проведения метода анализа используемое сырье экстрагировали в горячей дистиллированной воде при соотношении 1:10 (10 г продукта и 100 г дистиллированной воды) в термоустойчивой колбе на 200–250 мл при нагревании в течение 30–40 мин на водяной бане при температуре 60–70 °С, поскольку в холодной воде дубильные вещества растворяются плохо [4, 5]. Экстракты в горячем виде фильтровали через двойной слой марли с ватой, заранее смоченной в дистиллированной воде. Далее отфильтрованные экстракты разливали в пробирки (рисунок 1, пробирка (1)). Наличие дубильных веществ определяли по образованию осадка, образующегося при их взаимодействии с раствором желатина (рисунок 1, пробирка (2)).

Результаты и обсуждение

Наиболее ярко выражено наличие танинов было проявлено в нативной чечевице. Дубильные вещества образовывали помутнение по всему объему пробирок и дали небольшой осадок, который растворился в избытке раствора желатина. Менее выраженные свойства были проявлены в образцах сушеной чечевицы. В пророщенной чечевице и чечевичном экстракте была отрицательная реакция с желатином, что свидетельствует об отсутствии дубильных веществ или их незначительном количестве в данных полуфабрикатах.

Как вещества фенольной природы, дубильные вещества легко окисляются перманганатом калия в кислой среде и другими окислителями, образуют окрашенные комплексы с солями тяжелых металлов, трехвалентного железа, бромной водой. Для определения групповой принадлежности дубильных веществ была проведена качественная реакция полученных отфильтрованных экстрактов с солями трехвалентного железа, которые по появляющемуся окрашиванию позволяют определить группу дубильных веществ. Так, появление черно-синего окрашивания указывает на значительное содержание дубильных веществ первого класса – гидролизуемых. Появление черно-зеленого окрашивания свидетельствует о наличии дубильных веществ, относящихся к веществам второго класса – конденсированных (рисунок 1, пробирка (3)).

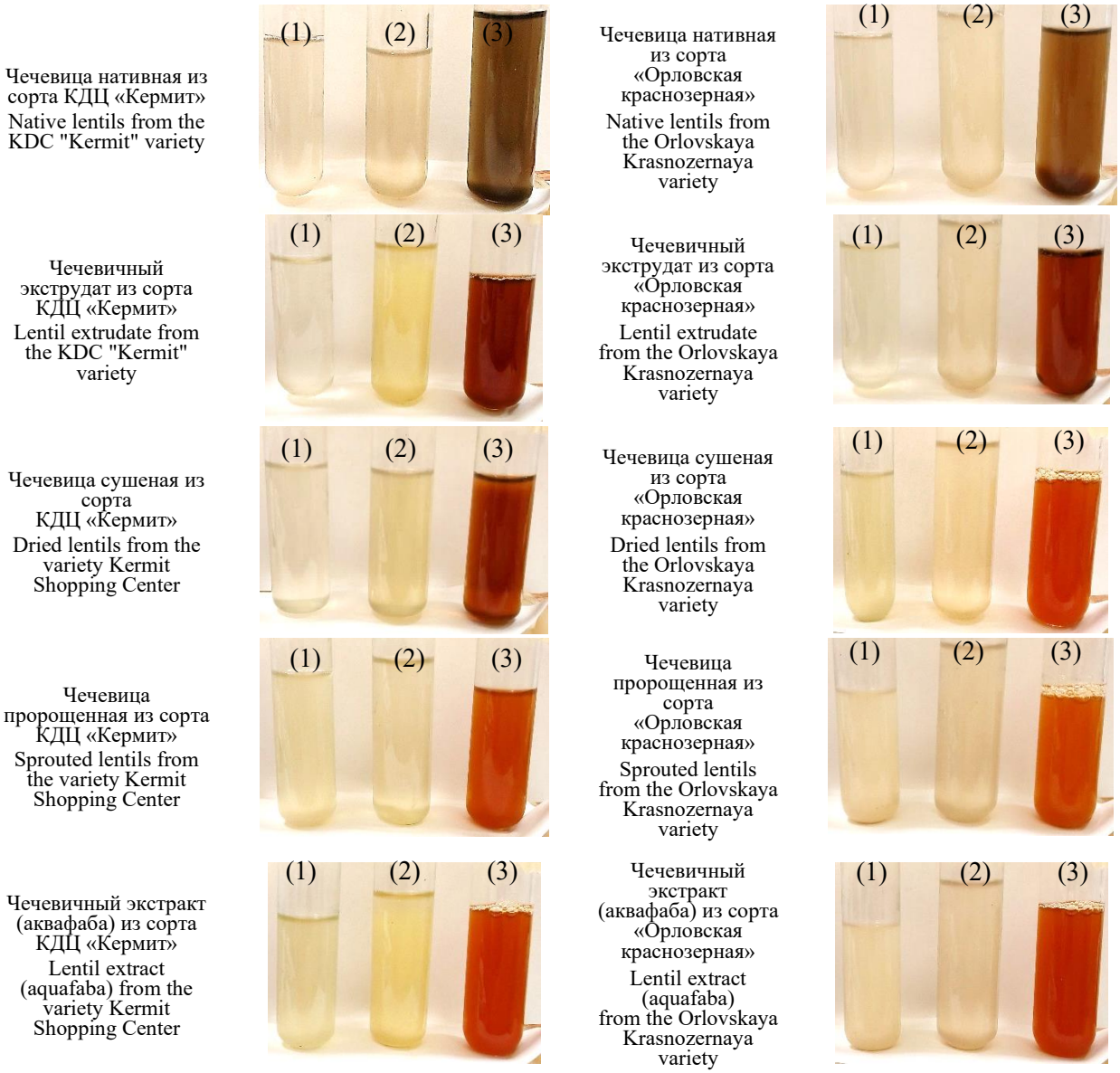


Рисунок 1. Результаты качественной реакции определения дубильных веществ в продуктах из чечевицы различных сортов: пробирка (1) – экстракт отфильтрованный; пробирка (2) – экстракт с внесением 1%-ого раствора желатина, приготовленного на 10%-ном растворе натрия хлорида; пробирка (3) – экстракт с внесением солей трехвалентного железа.

Figure 1. Results of the qualitative reaction for the determination of tannins in products made from lentils of different varieties: test tube (1) – filtered extract; test tube (2) – extract with the addition of a 1% gelatin solution prepared in a 10% sodium chloride solution; test tube (3) – extract with the addition of trivalent iron salts.

Качественная реакция в образце нативной чечевицы показала преобладающее количество дубильных веществ конденсированной группы из-за слабого черно-зеленого окрашивания. В образце чечевичного экструдата эта же реакция была несколько меньше, а в образцах сушеной, пророщенной чечевицы, чечевичном экстракте реакции не произошло, что также говорит об отсутствии дубильных веществ или их незначительном количестве.

Оценку количественного содержания танинов в исследуемых образцах проводили методом фотоэлектроколориметриметрии в центре коллективного пользования «Контроль и управление энергоэффективных проектов» ФГБОУ ВО «Воронежского государственного университета инженерных технологий».

Количественный метод определения танинов основан на экстрагировании дубильных веществ водой при кипячении и последующем измерении оптической плотности растворов дубильных веществ, окрашенных в результате реакции с хлоридом железа (III) при pH 10 на фотоколориметре [13].

Для анализа использовали водный раствор танина с концентрацией 10 мг в 100 $см^3$; карбоната натрия с массовой долей 15%; хлорида железа (III) с массовой долей 1%; тимолфталеина.

При выполнении эксперимента использовали следующее оборудование: весы лабораторные марки РМВ-53; электромельница; водяная баня; электрическая плитка; фотоколориметр марки КФК-3 КМ фирмы *UNICO*.

Методика определения заключается в следующем: 5 г измельченного продукта помещали в колбу вместимостью 250 см^3 и добавляли 200 см^3 кипящей воды. Колбу выдерживали 2 ч на кипящей водяной бане с периодическим помешиванием суспензии. Затем содержимое колбы охлаждали до 20 °С и количественно переносили в мерную колбу вместимостью 250 см^3, добавляли воду до метки дистиллированной водой. Для компенсации объема, занимаемого продуктом, в колбу добавляли еще 2,5 см^3 дистиллированной воды. Содержимое колбы тщательно перемешивали и фильтровали через складчатый фильтр. Пипеткой отбирали 50 см^3 фильтрата, переносили в мерную колбу вместимостью 250 см^3 и разбавляли дистиллированной водой до метки.

Во время экстрагирования дубильных веществ из продукта готовили стандартный раствор танина концентрацией 10 мг%, к которому прибавляли 3–4 капли раствора тимолфталеина и титровали раствором карбоната натрия до темно-синего окрашивания (pH 10). Затем добавляли 0,5 см^3 раствора хлорида железа (III), перемешивали и выдерживали 3 мин. Окрашенный раствор помещали в кювету спектрофотометра с толщиной поглощающего слоя 5 мм и измеряли оптическую плотность раствора при 354 нм по отношению к воде. Полученные значения оптической плотности фотометрируемого раствора корректировали, учитывая увеличение его объема за счет добавления растворов хлорида железа (III) и карбоната натрия. Оптическую плотность раствора танина, A_T, с учетом поправки на разбавление рассчитывали по формуле

$$A_T = A \cdot [10 + (V_1 + V_2)]/10, \qquad (1)$$

где A – измеренная оптическая плотность раствора танина; V_1 – объем раствора хлорида железа (III) с массовой долей 1%, см^3; V_2 – объем раствора карбоната натрия с массовой долей 15%, израсходованного на титрование, см^3.

Оптическую плотность раствора дубильных веществ, $A_{дуб}$, измеряли аналогично A_T. Для этого 10 см^3 приготовленного раствора дубильных веществ переносили пипеткой в колбу вместимостью 50 см^3, добавляли 3–4 капли раствора тимолфталеина и титровали раствором карбоната натрия (обычно количество раствора карбоната натрия в растворе танина не превышает 4 капель до темно-синего окрашивания. Затем добавляли 0,5 см^3 раствора хлорида железа (III), перемешивали, выдерживали 3 мин и измеряли оптическую плотность в кювете с толщиной поглощающего слоя 3 мм при 400 нм по отношению к щелочному раствору дубильных веществ продукта, но без добавления хлорида железа (III).

Полученное значение оптической плотности раствора дубильных веществ, $A_{дуб}$, рассчитывали по формуле

$$A_{дуб} = A_{дуб1} \cdot [10 + (V_1 + V_2)]/10, \qquad (2)$$

где $A_{дуб1}$ – измеренная оптическая плотность раствора дубильных веществ; V_1 – объем раствора хлорида железа (III) с массовой долей 1%, см^3; V_2 – объем раствора карбоната натрия с массовой долей 15%, израсходованного на титрование, см^3.

Количество дубильных веществ в продукте, X, %, рассчитывали по формуле

$$X = П \cdot A_{дуб} / A_T, \qquad (3)$$

где $П$ – постоянный коэффициент, связанный с содержанием дубильных веществ в продукте, % (для чечевицы принято – 0,446).

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 4. Расхождение между повторными опытами не превышает 0,5%.

Таблица 4.
Содержание танинов в чечевице и продуктах ее переработки

Table 4.
Tannin content in lentils and their processed products

Продукт Product	Массовая доля влаги в продукте, % Mass fraction of moisture in the product, %		Содержание танинов в продукте, % The tannin content in the product, %	
	Сорт чечевицы «Кермит» The Kermit KDC lentil variety	Сорт чечевицы «Орловская краснозерная» The Orlovskaya Krasnozernaya lentil variety	Сорт чечевицы КДЦ «Кермит» The Kermit KDC lentil variety	Сорт чечевицы «Орловская красно-зерная» The Orlovskaya Krasnozernaya lentil variety
Чечевица нативная Native lentils	12,6	10,8	0,58 ± 0,003	0,37 ± 0,002
Чечевичный экструдат Lentil Extrudate	7,5	7,0	0,23 ± 0,002	0,22 ± 0,002
Чечевица сушеная Dried lentils	8,4	8,0	0,20 ± 0,001	0,18 ± 0,001
Чечевица проращенная Sprouted lentils	8,8	8,6	0,14 ± 0,001	0,11 ± 0,001
Чечевичная суспензия (аквафаба) Lentil suspension (aquafaba)	91,4	91,8	0,023 ± 0,001	0,019 ± 0,001

Заключение

Как следует из таблицы 3, существующие способы обработки чечевицы по-разному влияют на содержание и свойства танинов. Наиболее эффективный метод снижения концентрации танинов – в 4,1–3,4 раза при проращивании чечевицы, в результате чего, по-видимому, активируется фермент полифенолоксидаза, который расщепляет танины на более простые компоненты [30]. Процессы экструдирования чечевицы и высушивания также способствуют снижению танинов – в 1,7–2,5 и 2,1-2,9 раза (соответственно) за счет частичной деградации их молекул и полимеризации до более крупных полимеров, что приводит к изменению их антипитательных свойств, при этом они становятся менее «агрессивными» по отношению к питательным веществам и менее активно вступают в реакцию с белками и ионами железа, что снижает их антипитательные свойства. При получении чечевичной суспензии (аквафабы) путем уваривания нативной чечевицы в водном растворе, содержание танинов снизилось в 1,5–1,9 раза (в пересчете на абсолютно сухое вещество).

Литература

1 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.

2 Ахангаран М., Афанасьев Д.А., Чернуха И.М., Машенцева Н.Г., Гаравири М. Биоактивные пептиды и антипитательные вещества нута: характеристика и свойства (обзор) // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2022. Т. 183. № 1. С. 214–223. doi: 10.30901/2227-8834-2022-1-214-223.

3 Фролов Д.И., Назарова Е.И. Пищевые и антипитательные вещества семян фасоли // Инновационная техника и технология. 2023. Т. 10. № 4. С. 32–37.

4 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.

5 Бобрышева Т.Н., Анисимов Г.С., Золоторева М.С., Бобрышев Д.В., Будкевич Р.О., Москалев А.А. Полифенолы как перспективные биологически активные соединения // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № 1. С. 92–107. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107.

6 Кубасова Е.Д., Крылов И.А., Корельская Г.В., Пантюхова К.А., Кубасов Р.В. Противоопухолевые и противовоспалительные свойства дубильных веществ растительного происхождения и перспективы их использования в фармации // Медико-фармацевтический журнал "Пульс". 2022. Т. 24. № 12. С. 55–60. doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2022-24-12-55-60.

7 Sudheendra C., Prasad M.P., Biradar M.S., Uma Reddy Y.S. Anti-nutritive and therapeutic properties of lectins // Biological and Chemical Hazards in Food and Food Products. Oakville: Apple Academic Press, 2022. P. 281–298.

8 Wongdee K., Rodrat M., Teerapornpuntakit J., Krishnamra N., Charoenphandhu N. Factors inhibiting intestinal calcium absorption: hormones and luminal factors that prevent excessive calcium uptake // Journal of Physiological Sciences. 2019. V. 69. P. 683–696. doi: 10.1007/s12576-019-00688-3.

9 Elango D., Rajendran K., Van der Laan L., Sebastiar S., Raigne J., Thaiparambil N.A., El Haddad N., Raja B., Wang W., Ferela A., Chiteri K.O., Thudi M., Varshney R.K., Chopra S., Singh A., Singh A.K. Raffinose family oligosaccharides: friend or foe for human and plant health? // Frontiers in Plant Science. 2022. V. 13. P. 829118. doi: 10.3389/fpls.2022.829118.

10 Возиян В.И., Таран М.Г., Якобуца М.Д., Авадэний Л.П. Питательная ценность сортов сои, гороха, фасоли и содержание в них антипитательных веществ // Зернобобовые и крупяные культуры. 2013. № 1 (5). С. 26–29.

11 Acquah C., Ohemeng-Boahen G., Power K.A., Tosh S.M. The effect of processing on bioactive compounds and nutritional qualities of pulses in meeting the Sustainable Development Goal 2 // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2021. V. 5. P. 681662. doi: 10.3389/fsufs.2021.681662.

12 Беляева И.А., Коверченко А.А., Холодова Е.Н. Использование чечевицы для повышения биологической ценности продуктов питания // Современная наука и инновации. 2016. № 3. С. 94–101.

13 Орлова А.А., Повыдыш М.Н. Обзор методов качественного и количественного анализа танинов в растительном сырье // Химия растительного сырья. 2019. № 4. С. 29–45. doi: 10.14258/jcprm.2019045459.

14 Полухина Т.С. Сравнительное изучение динамики накопления суммы дубильных веществ в сырье Salvia officinalis L. и Salvia stepposa L. // Медико-фармацевтический журнал "Пульс". 2020. Т. 22. № 8. С. 38–42. doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-8-38-42.

15 Эшматов Ф.Х., Максумова Д.К., Додаева Л.К., Додаев К.О., Ахмедова З.Р. Средства воздействия на таннин в гранатовом соке и кожуре // Пищевая промышленность. 2016. № 2. С. 36–38.

16 Алехина Е.А., Ефремов А.Н., Емельянова О.А. Растения семейства Hydrocharitaceae – новый источник дубильных веществ? // Химия растительного сырья. 2018. № 3. С. 179–184. doi: 10.14258/jcprm.2018033723.

17 Михалина А.Д. Качественные реакции для определения дубильных веществ различных химических классов // Научный журнал молодых ученых. 2019. № 2 (15). С. 1–5.

18 Афонина С.Н., Лебедева Е.Н., Сетко Н.П. Биохимия компонентов чая и особенности его биологического действия на организм (обзор) // Оренбургский медицинский вестник. 2017. № 4 (20). С. 17–33.

19 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.

20 Фаттахова Г.А., Канарский А.В. Сапонины как биологически активные вещества растительного происхождения // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 16. С. 196–202.

21 Sinha S.K., Amresh K. Condensed tannin: a major anti-nutritional constituent of faba bean (Vicia faba L.) // Horticulture International Journal. 2018. V. 2. № 2. P. 31–32. doi: 10.15406/hij.2018.02.00022.

22 Бурак Л.Ч. Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК. 2021. № 3. С. 59–73. doi: 10.24412/2311-6447-2021-3-59-73.

23 Kaur N., Kaur M., Kaur A., Singh J., Kaur S., Kaur P. Natural food toxins as anti-nutritional factors in plants and their reduction strategies // Food Chemistry: The Role of Additives, Preservatives and Adulteration. Amsterdam: Elsevier, 2021. P. 217–248.

24 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.

25 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.

26 Алешин В.Н., Войченко О.Н., Минакова А.Д., Лобанов В.Г. Влияние условий термической обработки на активность лектинов семян клещевины и сои // Известия вузов. Пищевая технология. 2009. № 2–3. С. 76–78.

27 Калашникова С.В., Тертычная Т.Н. Снижение активности антипитательных веществ в соевых бобах // Технологии и продукты здорового питания. 2021. С. 262–265.

28 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.

29 Антонова Н.П., Калинин А.М., Прохватилова С.С., Шефер Е.П., Матвеенкова Т.Е. Оценка эквивалентности методов определения дубильных веществ, используемых для анализа лекарственного растительного сырья // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. 2015. № 1. С. 11–15.

30 Рябинина Е.И., Зотова Е.Е., Никитина Т.Н., Пономарева Н.И. Способ ингибирования полифенолоксидазы в яблочных выжимках при получении сорбентов // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2021. № 3. С. 132–138.

References

1 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. 6. doi: 10.1186/s43014-020-0020-5.

2 Akhangaran M., Afanasev D.A., Chernukha I.M., Mashentseva N.G., Garaviri M. Bioactive peptides and anti-nutritional substances of chickpeas: characteristics and properties (review). Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2022. no. 183(1). pp. 214–223. doi: 10.30901/2227-8834-2022-1-214-223. (in Russian).

3 Frolov D.I., Nazarova E.I. Nutritional and anti-nutritional substances of bean seeds. Innovative technique and technology. 2023. vol. 10. no. 4. pp. 32–37. (in Russian).

4 Shikh E.V., Makhova A.A., Dorogun O.B., Elizarova E.V. The role of phytates in human nutrition. Voprosy pitaniia. 2023. vol. 92. no. 4. pp. 20–28. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-4-20-28. (in Russian).

5 Bobrysheva T.N., Anisimov G.S., Zolotoreva M.S., Bobryshev D.V., Budkevich R.O., Moskalev A.A. Polyphenols as promising biologically active compounds. Voprosy pitaniia. 2023. vol. 92. no. 1. pp. 92–107. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-1-92-107. (in Russian).

6 Kubasova E.D., Krylov I.A., Korel'skaya G.V., Pantyukhova K.A., Kubasov R.V. Antitumor and anti-inflammatory properties of tannins of plant origin and prospects for their use in pharmacy. Mediko-farmatsevticheskii zhurnal "Pul's". 2022. no. 24(12). pp. 55–60. doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2022-24-12-55-60. (in Russian).

7 Sudheendra C. et al. Anti-nutritive and therapeutic properties of lectins. Biological and Chemical Hazards in Food and Food Products. Apple Academic Press, 2022. pp. 281–298.

8 Wongdee, K., Rodrat, M., Teerapornpuntakit, J. et al. Factors inhibiting intestinal calcium absorption: hormones and luminal factors that prevent excessive calcium uptake. The Journal of Physiological Sciences. 2019. vol. 69. pp. 683–696. doi: 10.1007/s12576-019-00688-3.

9 Elango D., Rajendran K., Van der Laan L., Sebastiar S., Raigne J., Thaiparambil N.A., El Haddad N., Raja B., Wang W., Ferela A., Chiteri K.O., Thudi M., Varshney R.K., Chopra S., Singh A., Singh A.K. Raffinose Family Oligosaccharides: Friend or Foe for Human and Plant Health? Frontiers in Plant Science. 2022. vol. 13. 829118. doi: 10.3389/fpls.2022.829118.

10 Vozijan V.I., Taran M.G., Yakobutsa M.D., Avadenii L.P. Nutritional value of soybean, pea, bean varieties and the content of anti-nutritional substances in them. Nauchno-proizvodstvennyi zhurnal «Zernobobovye i krupyanye kul'tury». 2013. no. 1(5). pp. 26–29. (in Russian).

11 Caleb Acquah, Godfred Ohemeng-Boahen, Krista A. Power and Susan M. Tosh. The Effect of Processing on Bioactive Compounds and Nutritional Qualities of Pulses in Meeting the Sustainable Development Goal 2. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2021. vol. 5. 681662. doi: 10.3389/fsufs.2021.681662.

12 Belyaeva I.A., Koverchenko A.A., Kholodova E.N. The use of lentils to increase the biological value of food products. Sovremennaia nauka i innovatsii. 2016. no. 3. pp. 94–101. (in Russian).

13 Orlova A.A., Povydysh M.N. Review of methods for qualitative and quantitative analysis of tannins in plant materials. Khimiia rastitel'nogo syr'ya. 2019. no. 4. pp. 29–45. doi: 10.14258/jcprm.2019045459. (in Russian).

14 Polukhina T.S. Comparative study of the dynamics of accumulation of the sum of tannins in raw materials of SALVIA OFFICINALIS L. and SALVIA STEHOSA L. Mediko-farmatsevticheskii zhurnal "Pul's". 2020. vol. 22. no. 8. pp. 38–42. doi: 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-8-38-42. (in Russian).

15 Eshtmatov F.Kh., Maksumova D.K., Dodaeva L.K., Dodaev K.O., Akhmedova Z.R. Means of influencing tannin in pomegranate juice and peel. Pishchevaya promyshlennost'. 2016. no. 2. pp. 36–38. (in Russian).

16 Alekhina E.A., Efremov A.N., Emel'yanova O.A. Plants of the Hydrocharitaceae family - a new source of tannins? Khimiia rastitel'nogo syr'ya. 2018. no. 3. pp. 179–184. doi: 10.14258/jcprm.2018033723. (in Russian).

17 Mikhailina A.D. Qualitative reactions for the determination of tannins of various chemical classes. Nauchnyi zhurnal molodykh uchenykh. 2019. no. 2 (15). pp. 1–5. (in Russian).

18 Afonina S.N., Lebedeva E.N., Setko N.P. Biochemistry of tea components and features of its biological effect on the body (review). Orenburgskii meditsinskii vestnik. 2017. no. 4 (20). pp. 17–33. (in Russian).

19 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. Vestnik Rossiiskoi sel'skokhoziaistvennoi nauki. 2018. no. 3. pp. 71–73. (in Russian).

20 Fattakhova G.A., Kanarskii A.V. Saponins as biologically active substances of plant origin. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. pp. 196–202. (in Russian).

21 Sinha S.K., Amresh K. Condensed tannin: a major anti-nutritional constituent of faba bean (Vicia faba L.). Horticulture International Journal. 2018. vol. 2. no. 2. pp. 31–32. doi: 10.15406/hij.2018.02.00022.

22 Burak L.Ch. Existing methods of food processing and their impact on nutritional value and chemical composition. Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya. 2021. no. 3. pp. 59–73. doi: 10.24412/2311-6447-2021-3-59-73. (in Russian).

23 Kaur N. et al. Natural food toxins as anti-nutritional factors in plants and their reduction strategies. Food Chemistry: The Role of Additives, Preservatives and Adulteration. 2021. pp. 217–248

24 Koshchaeva O.V., Khmara I.V., Fedorenko K.P., Shkredov V.V. The effect of sprouting on the chemical composition and content of anti-nutritional substances in soybean seeds. Nauchnyi zhurnal KubGAU. 2014. no. 97(03). pp. 1–25. (in Russian).

25 Eliseeva L.G., Makhotina I.A., Kalachev S.L. Increasing the safety of plant-based food products by reducing the content of phytates. Voprosy bezopasnosti. 2019. no. 1. pp. 9–17. doi: 10.25136/2409-7543.2019.1.28874. (in Russian).

26 Aleshin V.N., Voichenko O.N., Minakova A.D., Lobanov V.G. Effect of thermal treatment conditions on the activity of lectins in castor bean and soybean seeds. Izvestiia vuzov. Pishchevaia tekhnologiia. 2009. no. 2–3. pp. 1–2. (in Russian).

27 Kalashnikova S.V., Tertychnaya T.N. Reducing the activity of anti-nutritional substances in soybeans. Tekhnologii i produkty zdorovogo pitaniya. 2021. pp. 262–265. (in Russian).

28 Strizhko M.N. Antinutrients in grain-based plant-based drinks: a review of the subject area. Food Metaengineering. 2023. no. 1(1). pp. 63–89. doi: 10.37442/fme.2023.1.3. (in Russian).

29 Antonova N.P., Kalinin A.M., Prokhvatilova S.S., Shefer E.P., Matveenkova T.E. Assessment of the equivalence of methods for determining tannins used for the analysis of medicinal plant materials. Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertizy sredstv meditsinskogo primeneniia. 2015. no. 1. pp. 11–15. (in Russian).

30 Ryabinina E.I., Zotova E.E., Nikitina T.N., Ponomareva N.I. Method of inhibiting polyphenol oxidase in apple pomace during sorbent production. Vestnik Smolenskoi gosudarstvennoi meditsinskoi akademii. 2021. no. 3. pp. 132–138. (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

Магомед Г. 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, mmg@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0003-2494-4973

Павел Т. Суханов д.х.н., профессор, кафедра физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, pavel.suhanov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2588-9286

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

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

Magomed G. 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, mmg@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0003-2494-4973

Pavel T. Sukhanov Dr. Sci. (Chem.), professor, physical and analytical chemistry department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, pavel.suhanov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-2588-9286

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

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, 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

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

Вклад авторов

Виктор Е. Плотников обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Магомед Г. Магомедов предложил методику проведения эксперимента
Павел Т. Суханов предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания
Инесса В. Плотникова написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат
Константин К. Полянский консультация в ходе исследования
Дарья Е. Скосарь обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провела эксперимент, выполнила расчёты

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Konstantin K. Polyanskii Dr. Sci. (Engin.), Technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036; 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

Daria E. Skosar student, 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

Contribution

Viktor E. Plotnikov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Magomed G. Magomedov proposed a scheme of the experiment
Pavel T. Sukhanov proposed a scheme of the experiment and organized production trials
Inessa V. Plotnikova wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism
Konstantin K. Polyanskii consultation during the study
Daria E. Skosar review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025
Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-153-161 Оригинальная статья/Research article
УДК 637.544.19 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка варено-копченых колбасных изделий с использованием растительных белково-углеводных комплексов

Анна А. Дерканосова [1] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Елена Е. Курчаева [2] e.kurchaeva1102@ya.ru 0000-0001-5958-0909
Алла Е. Куцова [1] alla-toporkova@yandex.ru 0000-0002-5778-6150
Инна С. Косенко [1] inullya@mail.ru 0000-0003-2829-9940

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Мичурина, 1, Воронеж, 394087, Россия

Аннотация. Для обеспечения населения питанием, соответствующим его физиологическим потребностям, государственная политика сосредоточена на поиске способов восстановления биологически активных ресурсов. В Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года и Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года указаны перспективы обеспечения здорового питания населения. В связи с отставаниями в производстве мяса некоторых видов животных, для России представляют интерес животные и птицы с ускоренным созреванием, чье мясо можно увеличить за счет внутренних запасов. Исследования в области производства колбасных изделий в современной пищевой промышленности акцентируют внимание на поиске новых источников питательных веществ и внедрении разнообразных видов сырья для увеличения полезности и биологической активности конечной продукции. Предложение использовать смесь сорта "Победа 104" маши и сорта "Московская 39" пшеницы в качестве растительного компонента возникло после анализа состава злаков и бобов. Оптимальное соотношение этих компонентов, где одна часть пшеницы соответствует шести частям маши, позволяет получить ингредиент с улучшенным профилем аминокислот и повышенным содержанием ценных микроэлементов. Разработка рецептуры варено-копченой колбасы включает в себя сочетание мяса кролика и цыплят-бройлеров в пропорции 1:3. Органолептические свойства этого продукта не отличаются от образца без добавления растительных компонентов благодаря изученному подходу к производству. Продукция относится к категории пищевых продуктов с повышенным содержанием белка, йода, селена, что обеспечивает покрытие более 15% суточной потребности человека в них. Экономический анализ показал, что внедрение растительного компонента не только не влияет на качество колбасы, но и увеличивает срок ее хранения в соответствии с требованиями стандартов. Новая продукция обладает улучшенными характеристиками питательности и биологической ценности, и рекомендуется для разнообразия питания различных групп населения.

Ключевые слова: варено – копченые колбасы, экструдированная зерновая композиция, функционально – технологические свойства, селен, обогащенный продукт.

Development of boiled and smoked sausage products using vegetable protein-carbohydrate complexes

Anna. A. Derkanosova [1] aa-derk@ya.ru 0000-0002-9726-9262
Elena E. Kurchaeva [2] e.kurchaeva1102@ya.ru 0000-0001-5958-0909
Alla E. Kutsova [1] alla-toporkova@yandex.ru 0000-0002-5778-6150
Inna S. Kosenko [1] inullya@mail.ru 0000-0003-2829-9940

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
2 Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurina St., Voronezh, 394087, Russia

Abstract. In order to provide the population with nutrition appropriate to their physiological needs, government policy is focused on finding ways to restore biologically active resources. The Concept of Long-term Socio-economic Development of the Russian Federation until 2030 and the Strategy for Improving the Quality of Food Products in the Russian Federation until 2030 indicate the prospects for ensuring a healthy diet for the population. Due to the lag in meat production of some animal species, Russia is interested in animals and birds with accelerated maturation, whose meat can be increased at the expense of domestic stocks. Research in the field of sausage production in the modern food industry focuses on the search for new sources of nutrients and the introduction of various types of raw materials to increase the usefulness and biological activity of the final product. The proposal to use a mixture of Masha's Pobeda 104 and Moskovskaya 39 wheat varieties as a plant component arose after analyzing the composition of cereals and beans. The optimal ratio of these components, where one part of wheat corresponds to six parts of mash, makes it possible to obtain an ingredient with an improved amino acid profile and an increased content of valuable trace elements. The development of a recipe for boiled and smoked sausage includes a combination of rabbit meat and broiler chickens in a 1:3 ratio. The organoleptic properties of this product do not differ from the sample without the addition of plant components due to the studied production approach. The products belong to the category of food products with a high content of protein, iodine, selenium, which provides coverage of more than 15% of a person's daily need for them. The economic analysis showed that the introduction of the vegetable component not only does not affect the quality of the sausage, but also increases its shelf life in accordance with the requirements of the standards. The new products have improved nutritional and biological value characteristics, and are recommended for a variety of diets for different population groups.

Keywords: boiled and smoked sausages, extruded grain composition, functional and technological properties, selenium, enriched product.

Для цитирования
Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Куцова А.Е., Косенко И.С. Разработка варено-копченых колбасных изделий с использованием растительных белково-углеводных комплексов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 153–161. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-153-161

For citation
Derkanosova A.A., Kurchaeva E.E., Kutsova A.E., Kosenko I.S. Development of boiled and smoked sausage products using vegetable protein-carbohydrate complexes. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 153–161. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-153-161

© 2025, 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

Производство качественных мясных продуктов важно для населения и становится все более сложной задачей, требующей улучшения технологий и автоматизации процессов. Для успешного выполнения этой задачи необходимо развивать сельское хозяйство и перерабатывающие отрасли, сокращать затраты и повышать дисциплину труда. Ключевым фактором в этом процессе является профессиональный рост персонала и совершенствование комплексной технологии переработки сельскохозяйственного сырья. Мясная промышленность играет важную роль в агропромышленном комплексе и обеспечивает население основными продуктами питания.

Мясная промышленность имеет значительное значение для народного хозяйства, поскольку она способствует развитию животноводства, устанавливает стандарты для скота, устраняет сезонность, развивает новые формы торговли мясом и меняет быт с помощью выпуска полуфабрикатов и готовых кулинарных изделий.

В связи с этим, государственная политика направлена на поиск путей решения по возобновлению биологически активных ресурсов, которые будут удовлетворять физиологическим потребностям организма. Перспективы обеспечения населения здоровым питанием обозначены в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года, Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года. Учитывая имеющиеся отставания по производству мяса некоторых видов животных, для России представляют существенный интерес скороспелые животные и птицы, производство мяса которых можно увеличить за счет внутренних резервов.

Необходимость добавления антиоксидантов в мясные продукты с высоким содержанием ненасыщенных жиров доказана рядом авторов [1–3], поскольку эти жирные кислоты подвержены быстрому окислению. Хотя традиционно используются искусственные антиоксиданты, подходы, использующие натуральные антиоксиданты, очень популярны. Эти антиоксиданты могут оказывать благотворное влияние на здоровье, а также играть технологическую роль в предотвращении окисления продукта.

Цель работы – разработка варено-копченых колбас с применением белково-углеводной композиции, обогащенной микроэлкмнтами.

Установлена причинно-следственная связь между потреблением селена с пищей и защитой ДНК, белков, липопротеинов и липидов от окислительного повреждения, поскольку селен входит в состав селенопротеинов, некоторые из которых обладают важными антиоксидантными свойствами (Данилов Ю.Д., 2017). Рекомендуемая суточная норма потребления селена для человека (55 мкг/день) в настоящее время не соблюдается в большинстве европейских стран. Кроме того, эта рекомендуемая норма потребления не учитывает тот факт, что более высокие уровни потребления селена, по-видимому, приносят дополнительную пользу для здоровья, помимо его предполагаемого воздействия на активность селеноэнзимов [5, 15].

Материалы и методы

Проводилась оценка объектов исследования с применением нужного набора органолептических и физико-химических анализов. Для опытного создания образцов варено-копченых колбасных изделий с добавлением растительных ингредиентов и стандартного образца, технологический процесс был адаптирован под лабораторные условия [15]. Изготавливался фарш для контрольного и экспериментального вариантов. Взятие проб готовой продукции осуществлялось в соответствии с требованиями ГОСТ 31904–2012. При разработке рецептуры вареной ветчинно-рубленой колбасы использовалось следующее основное сырье: мясо кролика по ГОСТ 27747–2016; мясо цыплят-бройлеров по ГОСТ 31962–2013, экструдированная смесь из зерна, полученную в лабораторных условиях; шпик свиной хребтовой по ГОСТ Р 55485–2013. Проводилась органолептическая оценка образцов согласно требованиям ГОСТ 9959–2015 и заполнялся лист дегустационной оценки.

Определение физико-химических показателей проводили по следующим методикам: содержание йода по ГОСТ 31660–2012, селена по ГОСТ 31707–2012, массовую долю белок по ГОСТ 25011–2017, массовую долю жира по ускоренной методике по требованиям ГОСТ 23042–2015.

Массовая доля углеводов в пересчете на глюкозу определялась по ГОСТ 31470–2012. Массовая доля поваренной соли определялась по методу Мора согласно ГОСТ 9957–2015. Массовая доля нитритов определялась по ГОСТ 8558.1–2015. Массовая доля фосфатов определялась по ГОСТ 9794–2015 фотометрическим методом. Содержание золы определяется по методике, описанной в ГОСТ 31727–2012.

Определение содержания минеральных веществ в мясе проводили по ГОСТ 31727–2012 путем последовательно выполняемых операций высушивания, обугливания, озоления пробы при температуре 525–575 °С и определении содержания золы.

Результаты

По мнению ведущих экспертов мясного рынка, было выявлено, что на рынке Воронежа представлена продукция всех товарных групп колбасных изделий во всех ценовых сегментах, причем доля производителей ЦЧЗ составляет около 95%. Потребляют колбасные изделия около 90% населения столицы. В суммарной емкости рынка колбасных изделий доля колбас составляет около 36%, сосисок – 30%, ветчин – 19%, остальная продукция приходится на мясные деликатесы [7, 8].

В ходе опроса, проведенного среди жителей Воронежа, выяснилось, что 80% опрошенных отрицательно относятся к наличию соевых добавок в колбасных изделиях и стараются избегать покупки такой продукции. Только 11% респондентов указали, что информация о составе продукта является для них важным критерием при выборе, несмотря на широко распространенное неприятие соевых добавок. Одновременно, 38% участников опроса обращают внимание на соответствие продукции стандартам ГОСТ или ТУ, в то время как для 21% данная информация не играет роли. Среди потребителей 41% не придавали значения этому аспекту. Важным ожиданием потребителей от колбасных изделий является их качественная стабильность.

Более половины белка в рационе человека приходится на мясные продукты. Ожидается, что к 2030 году уровень потребления мяса в мире возрастет до 72%. В условиях острой конкуренции, производителям необходимо оперативно адаптироваться к изменениям, проводя не только анализ текущих, но и прогноз будущих потребностей рынка.

В рамах работы были проведены маркетинговые исследования, направленные на изучение предпочтений потребителей в сегменте колбасных изделий с добавлением натуральных биоактивных веществ. Для сбора данных использовалось анкетирование через Google Forms среди жителей Воронежа в возрастной категории от 17 до 60 лет. В ходе исследования было опрошено 1000 человек, что позволило получить разделенные по полу, возрасту и виду деятельности результаты.

Были определены потребительские предпочтения на разные виды колбасных изделий (таблица 1) и факторы, которыми руководствуются респонденты при выборе того или иного вида колбасных изделий.

Таблица 1.

Определение доли спроса потребителей на виды колбасных изделий

Table 1.

Determining the share of consumer demand for types of sausage products

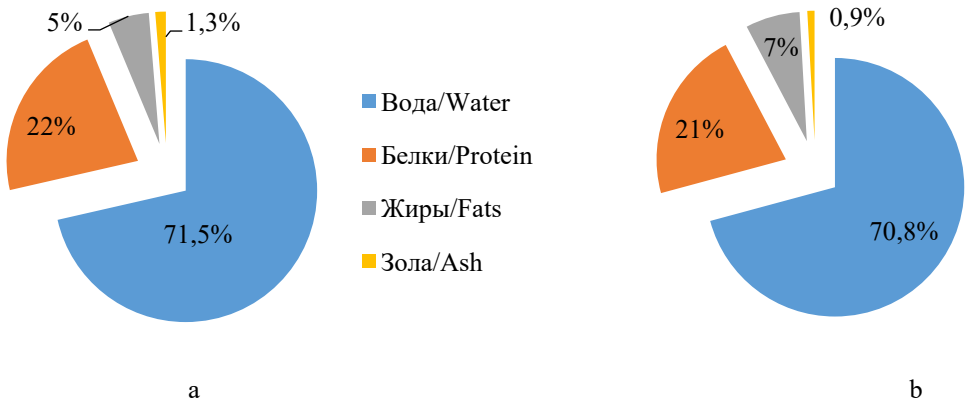
Образец Sample	Количество респондентов Number of respondents
Вареные колбасные изделия Boiled sausages	557 57,7%
Копченые колбасы Smoked sausages	289 28,9%
Мясные деликатесы Meat delicacies	124 12,4%

Как видно из представленных данных таблицы 1, большинство респондентов отдают предпочтение вареным колбасным изделиям, так как они отличаются высокими вкусовыми и пищевыми достоинствами и относительно низкой стоимостью.

Необходимо подчеркнуть, что 91,8% опрошенных предпочитают колбасную продукцию отечественного производства, что говорит о большом потенциале в области развития рынка колбасных изделий с натуральными биологически активными добавками.

Для работки мясных систем в качестве основного сырья использовали мясо кролика, полученное после ручной обвалки в условиях ООО «Липецкий кролик» и мясо – цыплят бройлеров. Проведенный сравнительный анализ их химического состава, представленный на рисунках 1 и 2.

Белок крольчатины более богат незаменимыми аминокислотами, чем белок мяса цыплят-бройлеров. Именно НАК имеют большую биологическую ценность, так как они не способны синтезироваться в организме человека и должны в достаточных количествах поступать с пищей. Мясо кролика отличается высоким содержанием среди НАК лизина – 10,89, лейцина – 8,10 г/100 г. белка. Среди ЗАК можно отметить большое количество глутамина (14,55 г/100 г. белка), аспаргина (8,89 г/100 г.) и аланина (7,89 г/100 г.).



a b

Рисунок 1. Химический состав мяса кролика и цыплят-бройлеров

Figure 1. Chemical composition of rabbit meat and broiler chickens

Общее количество незаменимых аминокислот в белке мяса, как кролика, так и мясе цыплят-бройлеров превосходит идеальный белок. Если рассматривать отдельные НАК, то видно, что по каждой из них белок кроличьего мяса имеет запас, однако следует отметить, что запас изолейцина, валина и серосодержащих аминокислот ограничен.

Белок мяса цыплят-бройлеров недостаточно обеспечен такими аминокислотами как лейцин, изолейцин и валин. В обоих видах мяса наблюдается большой запас лизина (198 и 204%) и триптофана (161 и 140%).

Таблица 2.

Белково-качественный показатель (БКП)

Table 2.

Protein-quality index (PQI)

Аминокислота Amino Acid	Вид мяса/ Type of meat	
	Мясо кролика/ Rabbit meat	Мясо цыпленка – бройлера/ Broiler chicken meat
Содержание триптофана, мг/г белка/ Tryptophan content, mg/g protein	16,1	13,0
Содержание оксипролина мг/г белка/ Oxyproline content mg/g of protein	2,7	8,9
Отношение триптофана к оксипролину	6,0	1,5

По нашим данным БКП крольчатины составил 6,0 и в 4 раза превышает этот же показатель по мясу цыплят-бройлеров. То есть, совершенно четко видно, белок мяса кролика обладает очень высокой биологической ценностью (таблица 2).

Для создания инновационного продукта, обладающего улучшенными пищевыми качествами и пригодного для диетического питания, мы полагаем оправданным применение кроличьего мяса. В качестве основы для варено – копченых колбас использовали фарш из мяса цыплят-бройлеров и проводили замену шротом мяса кролика в количестве 5, 10, 15, 20, 25% и исследовали ФТС модельных образцов. Результаты представлены на рисунке 2.

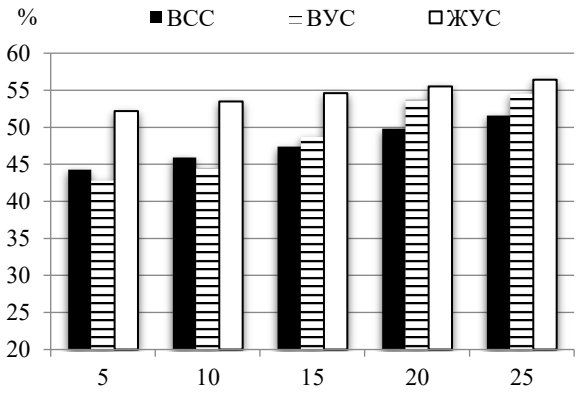


Рисунок 2. Функционально-технологические свойства фарша в зависимости от дозировки мяса кролика ручной обвалки

Figure 2. Functional and technological properties of minced meat depending on the dosage of hand-rolled rabbit meat

Применение крольчатины, по нашему мнению, обосновано при разработке продукта, превосходящего аналоги по пищевой ценности и отвечающего требованиям диетического рациона. Согласно данные рисунка 2 целесообразно вводить в фарш 25% мяса кролика ручной обвалки от массы мяса птицы. При таком количестве наблюдаются высокие значения функционально-технологических свойств, а именно, ВСС составляет 51,6%, ВУС – 54,5%, а ЖУС – 56,4%, что выше при внесении 5% крольчатины на 7,3, 11,7 и 4,2% соответственно.

Для получения зерновой композиции, обогащенной микроэлементами использовали семена маша и пшеницы, которые подвергали дополнительной обработке путем проращивания в среде йодида калия и селенита натрия [16] с последующим проведение горячей экструзии.

На рисунке 3 представлен полученный экструдат.



Рисунок 3. Экструдированная комплексная смесь

Figure 3. Extruded complex mixture

На основе полученных экспериментальных данных обоснован состав фаршевой основы для продукта, состоящей из шрота мяса кролика в количестве 25% от общей массы фарша и мяса цыплят-бройлеров в количестве 75%, тем самым обеспечена сбалансированность состава белков в готовом продукте и повышен уровень минерального состава.

При создании контрольного образца и ассортимента варено-копченых колбас собственной разработки использовался состав рецептуры колбасы варено-копченой «Любительская» категория А (ГОСТ Р 55455–2013), в которой произвели замену говядины на шрот из мяса птицы и кролика, а также вносили 17% от массы несоленого сырья, представляющего собой смесь экструдированной пшеницы и маша в соотношении 1:6, обогащенную селеном и йодом.

Контрольный образец изготавливается по авторской рецептуре, без добавления растительного ингредиента

Технология производства варено-копченых колбас базировалась на традиционной технологической схеме.

Таблица 3.

Органолептические и физико-химические показатели варено-копченых колбасных изделий

Table 3.

Organoleptic and physico-chemical parameters of boiled and smoked sausages

Показатель | Indicator	Характеристика | Characteristic	
	«Любительская» (контроль) | "Lubitelskay" (control)	«Новокупеческая» (опыт) | "Novokupecheskay" (experiment)
Внешний вид | Appearance	Батоны с чистой, сухой поверхностью | Loaves with a clean, dry surface	
Вид на разрезе | Split view	Мышечная ткань розового или светло-розового цвета | The muscle tissue is pink or light pink in color	
	–	Кусочки шпика и мышечной ткани размером не более 6 мм Pieces of bacon no more than 6 mm in size
Консистенция| Consistency	Упругая | Elastic	
Запах и вкус | Smell and taste	Свойственные данному виду продукта со слабовыраженным ароматом пряностей, в меру соленый, без постороннего привкуса и запаха | Characteristic of this type of product with a slightly pronounced aroma of spices, moderately salty, without foreign taste and smell	
Массовая доля жира, % Mass fraction of fat, %	37,50	26,50
Массовая доля белка, % Mass fraction of protein, %	14,20	17,50
Массовая доля влаги, % Mass fraction of moisture, %	47,00	49,30
Массовая доля углеводов, % Mass fraction of carbohydrates, %	1,30	6,70
Массовая доля пищевых волокон, % Mass fraction of dietary fiber, %	–	4,30
Массовая доля поваренной соли, % Mass fraction of table salt, %	4,00	3,80
Массовая доля нитрита натрия, % Mass fraction of sodium nitrite, %	0,005	0,005
Выход, %/ Output, %	102,00	115,00

Таблица 1.

Аминокислотный состав и биологическая ценность колбасных изделий

Table 1.

Amino acid composition and biological value of sausage products

Наименование аминокислоты The name of the amino acid	Наименование изделия/ Product name		
	Белок по шкале ФАО / ВОЗ, г/100 г белка | Protein according to the FAO/WHO scale, g / 100 g of protein	Любительская (контроль), г/100 г белка Lubitelskay (control), g / 100 g of protein	«Новокупеческая» (опыт), г/100 г белка «Novokupecheskay» (experiment)
Валин/Valin	5,0	5,28	5,48
Изолейцин/ Isoleucine	4,0	4,57	4,95
Лейцин/ Leucine	7,0	9,21	9,32
Лизин/ Lysine	5,5	7,59	7,62
Метионин + цистин/ Methionine + cystine	3,5	4,43	4,24
Треонин/ Threonine	4,0	5,22	5,14
Триптофан/ Tryptophan	1,0	1,72	1,76
Фенилаланин + тирозин/	6,0	8,72	9,12
КРАС, %/ CDAS, %	-	28,26	24,65
БЦ, %/ BV, %	-	71,74	75,35

Обсуждение

Применение злаков в производстве мясных изделий набирает обороты, что подтверждается исследованиями ученых, как в России, так и за рубежом. Используя эти культуры, можно сократить производственные потери и повысить стабильность качества изделий.

В частности, для повышения плотности и сохранения влаги в мясном фарше обычно применяют муку из злаков, включая пшено и рис. Вместе с тем, злаки и крупы имеют несбалансированный состав аминокислот. С целью улучшения питательной ценности изделий рекомендуется сочетание различных растительных компонентов и их добавление в продукцию. В рамках американских исследований были изучены характеристики сосисок с низким содержанием жира, в состав которых входили овсяные отруби. Обработка таких изделий теплом приводила к уменьшению количества испаряемой влаги и увеличению необходимой силы для их разрезания [9, 11–13, 15].

Важным аспектом в современном обществе является проблема дефицита необходимых питательных веществ в рационе. Недостаток белка, йода и селена играет ключевую роль в увеличении вероятности возникновения различных заболеваний [4, 6, 10]. Белки, как высокомолекулярные азотсодержащие соединения, состоят из полипептидных цепей, связанных пептидными связями и имеющих важное значение для правильного питания человека. Среди клинически значимых проявлений дефицита энергии и протеина выделяют квашиоркор (тяжелая дистрофия, обусловленная недостаточным потреблением белков) и алиментарный маразм [17].

Главным поставщиком селена выступает цельнозерновая пшеничная мука. На данный момент выбор функциональных и обогащенных продуктов на российском рынке невелик.

Было установлено, что ввод растительный экструдированного компонента также увеличивает водосвязывающую способность фарша до уровня 88,4%, в результате чего количество влаги в готовом продукте также увеличивается [14].

В ходе органолептической оценки готового продукта выяснено, что он отвечает требованиям нормативной документации, предъявляемым к данному виду колбасных изделий. Органолептические и физико-химические показатели опытного и контрольного образца представлены в таблице 3. Замещение части мясных компонентов на растительные аналоги в количестве до 17% приводит к улучшению показателей качества белка, увеличивая его биологическую ценность на 1,36% и повышая аминокислотный индекс для ограничивающей аминокислоты на 17,8%. В частности, экспериментальный образец варенокопченой колбасы "Новокупеческая" демонстрирует увеличение аминокислотного индекса для треонина на 23,5% и рост биологической ценности на 2,44% в сравнении с контрольным образцом. В состав указанного образца колбасы вводится максимально разрешенный объем растительного компонента, равный 17% от веса мясного сырья. Несмотря на то, что такое добавление способствует повышению содержания определенных микроэлементов в продукте, в рамках данного исследования акцент был сделан на анализе протеина, йода и селена как ключевых элементов для обеспечения сбалансированного питания. Это привело к решению не включать в экспериментальный анализ другие минеральные вещества, ограничив исследование лишь указанными микроэлементами.

При употреблении 100 г. разработанного продукта потребность в пищевых волокнах будет удовлетворяться на 17,2% от суточной нормы потребления, равной 25 г. в сутки, в белке на 19,44% от суточной потребности равной 90 г.

В исследуемом образце варено-копченой колбасы «Новокупеческая» содержание селена составило 16,77 мкг / 100 г. продукта, йода составило 36,51 мкг / 100 г. продукта.

Включение растительного компонента, богатого йодом и селеном, как частичной альтернативы мясному сырью, дает возможность выпускать продукты, не отличающиеся по вкусу от традиционных аналогов.

В ходе создания опытных образцов выяснилось, что итоговый выход продукции способен достигать 115% (см. рисунок 4), основываясь на суммарной массе использованных специй, сырья и прочих составляющих.

Стоит отметить, что, за исключением контрольного образца, ассортимент новой продукции ограничивается двумя наименованиями.

Полученный образец варено – копченой колбасы "Новокупеческая" (рисунок 4) относится к категории обогащенных продуктов благодаря высокому уровню белка, что подразумевает наличие улучшенного профиля аминокислот.



Рисунок 4. Образец варено-копченой колбасы «Новокупеческая»

Figure 4. Samples of boiled and smoked sausage "Novokupecheska"

Готовые образцы варено-копченых колбас подвергали перечню физико-химических исследований. По результатам анализа общего химического состава установлено, что разработанный продукт обладает более высокой пищевой ценностью за счет снижения массовой доли жира и повышенным содержанием белка.

Заключение

Развитие новых источников ключевых пищевых элементов и внедрение в производственный процесс альтернативных сырьевых ресурсов для повышения питательной и биологической стоимости продукции являются основополагающими принципами современной стратегии производства пищевых товаров, включая колбасные изделия.

Сочетание растительных компонентов в соотношении одна часть пшеницы на шесть частей маша позволяет получать ингредиент с улучшенным аминокислотным составом и обогащенным целевыми микроэлементами. Обосновано соотношение мясного сырья при составлении пищевой системы – мясо кролика: мясо цыплят-бройлеров в разрабатываемом продукте равное 1: 3. Создана рецептура обогащенных варено-копченой по органолептическим показателям не отличающейся от контрольного образца без добавления растительного ингредиента. Образцы варено-копченых колбас можно отнести к категории обогащенных продуктов питания, так как употребление 100 г данных изделий способствует удовлетворению более 15% среднесуточной физиологической потребности человека в сбалансированном белке, микроэлементах йоде и селене. Органолептические свойства колбас не ухудшаются при добавлении растительного ингредиента, сроки годности зафиксированы в пределах нормы. Расчет экономической эффективности показал, что уровень рентабельности для внедрения нового варено – копченой колбасы «Новокупеческая» составил 44,40%, тогда как в контрольном варианте этот показатель составил 10,02%, что доказывает целесообразность производства нового продукта. Разработанный новый продукт отличается повышенной пищевой и биологической ценностью и может быть использован для обогащения рационов питания всех групп населения.

Литература

1. Gao Q., Wang Y., Kuang M., Zhang W. A Study on the Application of Natural Antioxidant Lignan in Boiled and Smoked and Boiled Sausages // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 768. № 2. P. 022049. doi: 10.1088/1757-899x/768/2/022049.

2. Chepurna O., Shtonda O., Osypenkova I., Kurylenko Yu. Determination of the dependence of the fatty acid composition of boiled-smoked sausages with the addition of vegetable raw materials // Technology Audit and Production Reserves. 2025. V. 1. № 3 (81). P. 45–50. doi: 10.15587/2706-5448.2025.323966.

3. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Quality and safety monitoring production of boiled-smoked sausages // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 677. P. 022089. doi: 10.1088/1755-1315/677/2/022089.

4. Азоян Д.Т. Применение дигидрокверцетина в варено-копченых колбасах // Промышленность и сельское хозяйство. 2023. № 6 (59). С. 5–9.

5. Варламова Е.Н., Погосян Д.Г. Обогащение варено-копченых колбас микроэлементами // Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. (Пенза, 25–26 апреля 2023 г.). Пенза: Пензенский гос. аграр. ун-т, 2023. С. 310–313.

6. Васильев А.С., Чумакова Е.Н., Фаринюк Ю.Т. Варено-копченая колбаса из мяса диких животных // Вестник КрасГАУ. 2024. № 5 (206). С. 207–215. doi: 10.36718/1819-4036-2024-5-207-215.

7. Гизатов А.Я., Гизатова Н.В. Использование продуктов природного генеза при производстве варено-копченых колбас // Научные исследования XXI века. 2022. № 5 (19). С. 8–11.

8. Кузнецова О.А., Семенова А.А., Кузлякина Ю.А. Идентификация видов копчёных колбас: нужны ли новые критерии? // Мясная индустрия. 2024. № 2. С. 16–22. doi: 10.37861/2618-8252-2024-02-16-22.

9. Узаков Я.М., Кененбай Ш.Ы., Кузнецова О.Н. Использование функционального компонента в производстве варено-копченой колбасы // Мясная индустрия. 2021. № 4. С. 49–52. doi: 10.37861/2618-8252-2021-04-49-52.

10. Островская К.Э. Колбаса варено-копченая из мяса птицы // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета: тез. докл. (Волгоград, 26–30 апреля 2021 г.). Волгоград: Волгоградский гос. техн. ун-т, 2021. С. 349–350.

11. Пьяникова Э.А., Ковалева А.Е., Сидоров Е.Ю. Влияние комплексной растительной добавки на качественные показатели мясного колбасного изделия // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 3. С. 66–75. doi: 10.24412/2311-6447-2022-3-66-75.

12.Токышева Г.М., Макангали К.К., Бегалы М.Н. Исследование качества варено-копченой колбасы из козлятины с добавлением растительных добавок // Научный Альманах ассоциации France-Kazakhstan. 2023. № 1. С. 12–18.

13. Цюра Д.В., Шилова А.А. Перспективы использования растительных компонентов при производстве колбасных изделий // Вестник молодежной науки. 2022. № 5 (37). С. 21–25.

14. Пилякина В.Д., Дерканосова Н.М., Стахурлова А.А. Мука из экструдата нута как высокобелковый обогащающий ингредиент // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2024. № 4 (87). С. 40–45. doi: 10.33979/2219-8466-2024-87-4-40-45.

15. Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Данилов Ю.Д., Семенова И.А., Мирошник А.С. Использование нового пищевого ингредиента в производстве мясных продуктов функционального назначения // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4 (52). С. 219–229.

16. Горлов И.Ф., Данилов Ю.Д., Сложенкина М.И. Использование экструдата нута и пшеницы для производства продуктов функциональной направленности // Мясная индустрия. 2017. № 7. С. 46–49.

17. Данилов Ю.Д., Мирошник А.С., Семенова И.А., Горлов И.Ф. Изучение возможности использования экструдированных нута и пшеницы в технологии колбасных изделий повышенной биологической ценности // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 2 (50). С. 257–270.

18. Айрапетян А.А., Манжесов В.И. Разработка технологии вареной колбасы с применением растительных компонентов // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 139–144. doi: 10.20914/2310-1202-2020-1-139-144.

19. Biletska Y., Djukareva G., Ryzhkova T., Bilan M., Safronova O., Priss O., Kyselov O., Yushchenko N., Dorohovych V. Substantiating the use of germinated legume flour enriched with iodine and selenium in the production of cooked-smoked sausages // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2020. V. 3. № 11 (105). P. 46–54.

20. Serikkyzy M., Jumabekova G., Zheldybayeva A., Tashybayeva A., Abzhamal A., Oryntayev Z., Kambarova G., Nurgazy M. Improving the organoleptic and structural-chemical properties of semi-smoked sausages // Saudi Journal of Biological Sciences. 2022. V. 29. № 3. P. 1510–1514.

References

1. Gao Q., Wang Y., Kuang M., Zhang W. A Study on the Application of Natural Antioxidant Lignan in Boiled and Smoked and Boiled Sausages. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. vol. 768. no. 2. p. 022049. doi: 10.1088/1757-899X/768/2/022049

2. Chepurna O., Shtonda O., Osypenkova I., Kurylenko Yu. Determination of the dependence of the fatty acid composition of boiled-smoked sausages with the addition of vegetable raw materials. Technology Audit and Production Reserves. 2025. vol. 1. no. 3 (81). pp. 45–50. doi: 10.15587/2706-5448.2025.323966

3. Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. Quality and safety monitoring production of boiled-smoked sausages. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 677. p. 022089. doi: 10.1088/1755-1315/677/2/022089

4. Azoian D.T. Application of dihydroquercetin in boiled-smoked sausages. Industry and Agriculture. 2023. no. 6 (59). pp. 5–9. (in Russian)

5. Varlamova E.N., Pogosyan D.G. Enrichment of boiled-smoked sausages with microelements. Regional problems of sustainable development of the agro-industrial complex in the conditions of digital transformation: collection of articles of the All-Russian scientific-practical conference (Penza, April 25–26, 2023). Penza: Penza State Agrarian University, 2023. pp. 310–313. (in Russian)

6. Vasiliev A.S., Chumakova E.N., Faringuk Yu.T. Boiled-smoked sausage from wild animal meat. Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University. 2024. no. 5 (206). pp. 207–215. doi: 10.36718/1819-4036-2024-5-207-215 (in Russian)

7. Gizatov A.Ya., Gizatova N.V. The use of products of natural origin in the production of boiled-smoked sausages. Scientific Research of the XXI Century. 2022. no. 5 (19). pp. 8–11. (in Russian)

8. Kuznetsova O.A., Semenova A.A., Kuzlyakina Yu.A. Identification of types of smoked sausages: are new criteria needed? Meat Industry. 2024. no. 2. pp. 16–22. doi: 10.37861/2618-8252-2024-02-16-22 (in Russian)

9. Uzakov Ya.M., Kenenbay Sh.Y., Kuznetsova O.N. The use of a functional component in the production of boiled-smoked sausage. Meat Industry. 2021. no. 4. pp. 49–52. doi: 10.37861/2618-8252-2021-04-49-52 (in Russian)

10. Ostrovskaya K.E. Boiled-smoked sausage from poultry meat. Competition of scientific research works of students of Volgograd State Technical University: abstracts of reports (Volgograd, April 26–30, 2021). Volgograd: Volgograd State Technical University, 2021. pp. 349–350. (in Russian)

11. Pyanikova E.A., Kovaleva A.E., Sidorov E.Yu. The influence of a complex plant additive on the quality indicators of a meat sausage product. Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products. 2022. no. 3. pp. 66–75. doi: 10.24412/2311-6447-2022-3-66-75 (in Russian)

12. Tokysheva G.M., Makangali K.K., Begaly M.N. Study of the quality of boiled-smoked sausage from goat meat with the addition of plant additives. Scientific Almanac of the France-Kazakhstan Association. 2023. no. 1. pp. 12–18. (in Russian)

13. Tsyura D.V., Shilova A.A. Prospects for the use of plant components in the production of sausage products. Bulletin of Youth Science. 2022. no. 5 (37). pp. 21–25. (in Russian)

14. Pilyakina V.D., Derkanosova N.M., Stakhurlova A.A. Flour from chickpea extrudate as a high-protein enriching ingredient. Technology and Commodity Science of Innovative Food Products. 2024. no. 4 (87). pp. 40–45. doi: 10.33979/2219-8466-2024-87-4-40-45 (in Russian)

15. Gorlov I.F., Slozhenkina M.I., Danilov Yu.D., Semenova I.A., Miroshnik A.S. The use of a new food ingredient in the production of meat products for functional purposes. Bulletin of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2018. no. 4 (52). pp. 219–229. (in Russian)

16. Gorlov I.F., Danilov Yu.D., Slozhenkina M.I. The use of chickpea and wheat extrudate for the production of functionally oriented products. Meat Industry. 2017. no. 7. pp. 46–49. (in Russian)

17. Danilov Yu.D., Miroshnik A.S., Semenova I.A., Gorlov I.F. Study of the possibility of using extruded chickpeas and wheat in the technology of sausage products of increased biological value. Bulletin of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2018. no. 2 (50). pp. 257–270. (in Russian)

18. Airapetyan A.A., Manzhesov V.I. Development of technology for boiled sausage using plant components. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. vol. 82. no. 1. pp. 139–144. doi: 10.20914/2310-1202-2020-1-139-144 (in Russian)

19. Biletska Y., Djukareva G., Ryzhkova T., Bilan M., Safronova O., Priss O., Kyselov O., Yushchenko N., Dorohovych V. Substantiating the use of germinated legume flour enriched with iodine and selenium in the production of cooked-smoked sausages. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. vol. 3. no. 11 (105). pp. 46–54.

20. erikkyzy M., Jumabekova G., Zheldybayeva A., Tashybayeva A., Abzhamal A., Oryntayev Z., Kambarova G., Nurgazy M. Improving the organoleptic and structural-chemical properties of semi-smoked sausages. Saudi Journal of Biological Sciences. 2022. vol. 29. no. 3. pp. 1510–1514.

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@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Елена Е. Курчаева д.с-х.н., профессор, кафедра товароведения и экспертизы товаров, Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, e.kurchaeva1102@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5958-0909

Алла Е. Куцова к.т.н., доцент, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alla-toporkova@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-5778-6150

Инна С. Косенко к.т.н., доцент, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, inullya@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2829-9940

Information about authors

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@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-9726-9262

Elena E. Kurchaeva Doc. Sci. (Agric.), professor, commodity science and product expertise department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina St., 1, Voronezh, 394087, Russia,, e.kurchaeva1102@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5958-0909

Alla E. Kutsova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of technology of products of animal origin, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alla-toporkova@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-5778-6150

Inna S. Kosenko Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of technology of products of animal origin, Voronezh State University of Engineering Technologie, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, inullya@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2829-9940

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 11/08/2025 **После редакции** 05/09/2025 **Принята в печать** 18/09/2026

Received 11/08/2025 **Accepted in revised** 05/09/2025 **Accepted** 18/09/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-162-169 Оригинальная статья/Research article
УДК 637.5.07 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование пищевой ценности, качества и безопасности оригинальных мясных изделий с использованием побочных продуктов убоя кроликов

Людмила В. Антипова [1] antipova.l54@yandex.ru 0000-0002-1416-0297
Марина С. Болдырева [2] bms88@yandex.com 0009-0000-9728-9362
Залина Х. Кумалагова [3] umalagova.zalina@yandex.ru 0009-0003-7603-1823

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия
2 Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кв. Молодежный, 20А, г. Луганск, 291034, Россия
3 Северо-Осетинская медицинская академия, Пушкинская улица, 40, Республика Северная Осетия – Алания, 362025, Россия

Аннотация. Исследована пищевая ценность, качество и безопасность оригинальных мясных изделий, разработанных с использованием побочных продуктов убоя кроликов (субпродуктов и кишечника) и растительного сырья. Объектами исследования служили колбаса ливерная с пшеном, зельц, желудок фаршированный и закуска хрустящая. Химический анализ показал, что все продукты обладают повышенным содержанием белка (15,6–28,4%) и относятся к низкокалорийным: энергетическая ценность варьировалась от 134 ккал/100 г (зельц) до 300 ккал/100 г (закуска хрустящая). Определен аминокислотный состав белков: продукты содержат полный набор протеиногенных аминокислот, с преобладанием лизина, лейцина, аланина и глицина. Расчет аминокислотного скора выявил, что лимитирующей аминокислотой во всех образцах является триптофан, в то время как по остальным незаменимым аминокислотам продукты соответствуют или превышают эталонный белок. Коэффициент различия аминокислотного скора составил 33–43,8%, что указывает на потенциальную избыточность части аминокислот, не используемых на пластические нужды. Органолептическая оценка по 9-балльной шкале подтвердила высокие потребительские свойства изделий: общая средняя оценка составила от 7,8 до 8,2 балла. Физико-химические показатели (массовая доля влаги, жира, белка, поваренной соли) соответствуют нормативным требованиям для мясной продукции. Микробиологические исследования и анализ на содержание токсичных элементов (ртуть, мышьяк, кадмий, свинец) подтвердили безопасность продуктов в соответствии с ТР ТС 034/2013. Таким образом, использование побочного сырья убоя кроликов позволяет создавать оригинальные, безопасные мясные продукты с высокой пищевой ценностью, сбалансированным аминокислотным составом и хорошими органолептическими характеристиками, что способствует расширению ассортимента и решению задачи рационального использования сырьевых ресурсов.

Ключевые слова: кролики, побочные продукты переработки, субпродукты, кишечник, химический состав, пищевая ценность, аминокислотный состав и скор, оригинальные мясные и мясорастительные продукты.

Investigation of the nutritional value, quality and safety of original meat products using by-products of rabbit slaughter

Ludmila V. Antipova [1] antipova.l54@yandex.ru 0000-0002-1416-0297
Marina S. Boldyreva [2] bms88@yandex.com 0009-0000-9728-9362
Zalina H. Kumalagova [3] umalagova.zalina@yandex.ru 0009-0003-7603-1823

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
2 Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Molodezhny sq., 20A, Lugansk, 291034, Russia
3 North Ossetian medical academy, Pushkinskaya street, 40, republic of North Ossetia – Alania, 362025, Russia

Abstract. The nutritional value, quality, and safety of original meat products developed using rabbit slaughter by-products (offal and intestines) and plant raw materials were studied. The objects of the study were liver sausage with millet, brawn, stuffed stomach, and crispy snack. Chemical analysis showed that all products have a high protein content (15.6–28.4%) and are low-calorie: the energy value ranged from 134 kcal/100 g (brawn) to 300 kcal/100 g (crispy snack). The amino acid composition of the proteins was determined: the products contain a complete set of proteinogenic amino acids, with a predominance of lysine, leucine, alanine, and glycine. The calculation of the amino acid score revealed that the limiting amino acid in all samples is tryptophan, while for other essential amino acids, the products meet or exceed the reference protein. The amino acid score difference coefficient was 33–43.8%, indicating a potential excess of some amino acids not used for plastic needs. Organoleptic evaluation on a 9-point scale confirmed the high consumer properties of the products: the overall average score ranged from 7.8 to 8.2 points. Physico-chemical indicators (mass fraction of moisture, fat, protein, table salt) comply with regulatory requirements for meat products. Microbiological studies and analysis for the content of toxic elements (mercury, arsenic, cadmium, lead) confirmed the safety of the products in accordance with TR CU 034/2013. Thus, the use of rabbit slaughter by-products allows for the creation of original, safe meat products with high nutritional value, balanced amino acid composition, and good organoleptic characteristics, which contributes to the expansion of the assortment and the solution of the task of rational use of raw materials.

Keywords: rabbits, by-products of rabbit slaughter, by-products, chemical composition, nutritional value, amino acid composition, amino acid score, original meat and meat-growing products using by-products of rabbit slaughter.

Для цитирования
Антипова Л.В., Болдырева М.С., Кумалагова З.Х. Исследование пищевой ценности, качества и безопасности оригинальных мясных изделий с использованием побочных продуктов убоя кроликов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 162–169. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-162-169

For citation
Antipova L.V., Boldyreva M.S., Kumalagova Z.H. Investigation of the nutritional value, quality and safety of original meat products using by-products of rabbit slaughter. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 162–169. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-162-169

© 2025, Антипова Л.В. и др. / Antipova L.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Мясные продукты занимают значительную долю в структуре розничного товарооборота среди других товарных групп. Они являются источником поступления полноценных белков, минеральных веществ, насыщенных и полиненасыщенных высших жирных кислот, витаминов и других питательных и биологически активных веществ, в связи с чем имеют важное значение в рационе питания современного человека. Современные представления о молекулярно-биологических основах питания ставят проблему максимально возможного привлечения новых биоресурсов мясного происхождения для производства продуктов питания, удовлетворяющих современные запросы потребителей, связанных со здоровым питанием и отвечающих современным технологическим нормам.

С учетом требований нутрициологии и технологии актуальны поиск востребованных сырьевых ресурсов и разработка новых рецептур мясных продуктов заданного химического состава, сбалансированных по содержанию и качеству белков, жиров и углеводов, воды, минеральных веществ и витаминов. Представляет интерес продукты питания повышенной пищевой и биологической ценности на основе функциональных пищевых систем, в том числе комбинированных. Разрабатываются и внедряются новейшие технологии, которые оптимизируют и снижают затраты на сырье, в том числе за рационального использования малоиспользуемых продуктов убоя животных, пищевых добавок, оптимальных режимов хранения и пр. [1, 2].

Цель данной работы состоит в определении химического состава, показателей пищевой и биологической ценности, качества и безопасности оригинальных мясных изделий с использованием побочного сырья убоя кроликов, полученных по разработанным нами рецептурам и технологиям производства при использовании растительного сырья для балансирования состава и улучшения функционально-технологических свойств: колбаса ливерная с пшеном, зельц, желудок фаршированный, закуска хрустящая [1].

Материалы и методы

Объектами исследования являются оригинальных мясные изделия с использованием побочного сырья убоя кроликов и растительного сырья (таблица 1). Образцы продуктов вырабатывали по разработанной авторами технологии в условиях научно-производственной лаборатории «Живые системы» (ВГУИТ, г. Воронеж).

Таблица 1.

Объекты исследования

Table 1.

Objects of research

Продукт | Product	Состав продукта | Product composition	Внешний вид | Appearance
Колбаса ливерная с пшеном | Liver sausage with millet	субпродукты кролика (печень, почки, легкие, сердце), внутренний жир, крупа пшено шлифованное, соль, черный молотый перец, свежий чеснок / rabbit by-products (liver, kidneys, lungs, heart), internal fat, millet grits, salt, ground black pepper, fresh garlic	
Зельц | Brawn	мясо кроличьих голов, мясо шейно-грудной и пояснично-крестцовой частей вареное, бульон, желатин, соль, молотый черный перец, молотый кориандр / rabbit head meat, boiled meat of the cervical-thoracic and lumbosacral parts, broth, gelatin, salt, ground black pepper, ground coriander	
Желудок фаршированный | Stuffed stomach	мясо из тазобедренной части и длиннейшей мышцы спины, внутренний жир, соль, молотый черный перец, молотый кориандр, молотая гвоздика / meat from the hip and the longest back muscle, internal fat, salt, ground black pepper, ground coriander, ground cloves	
Закуска хрустящая | The snack is crispy	тонкий кишечник, куриные яйца, мука, соль, молотый душистый перец, паприка сушеная, чеснок сушеный / small intestine, chicken eggs, flour, salt, ground allspice, dried paprika, dried garlic	

Экспериментальные исследования проводили в условиях ЦКП «Испытательный центр» и НОЦ «Живые системы» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

Массовую долю белка определяли по ГОСТ 25011–2017 методом минерализации органических веществ пробы с последующим определением азота по количеству образовавшегося аммиака (метод Кьельдаля) [3].

Массовую долю жира определяли по ГОСТ 23042–2015 с помощью многократной экстракции жира растворителем из высушенной анализируемой пробы в экстракционном аппарате Сокслета с последующим удалением растворителя и высушиванием выделенного жира до постоянной массы [4].

Массовую долю влаги определяли влагомером термогравиметрическим инфракрасным FD-610 по ГОСТ 29027–91 [5].

Массовую долю хлористого натрия определяли по ГОСТ 9957–2015 [6].

Аминокислотный состав определяли по ГОСТ 34132–2017 с помощью жидкостного хроматографа Shimadzu LC-20 Prominence методом ионообменной хроматографии с постколоночной дериватизацией нингидрином [7].

Энергетическую ценность определяли расчетным методом по ТР ТС 022/2011 [8].

Органолептическую оценку разработанных мясных и мясо-растительных продуктов из побочного сырья убоя кроликов проводили по 9-балльной шкале согласно стандартной методике по ГОСТ 9959–2015 [9].

Исследования микробиологических показателей мясных изделий проводили по ГОСТ Р 54354–2011 [10].

Содержание токсичных элементов определяли стандартными методами: ртути – по ГОСТ 26927–86, мышьяка – по ГОСТ 26930–86, кадмия – по ГОСТ 26933–86, свинца – по ГОСТ 26932–86 [11–14].

Результаты и обсуждение

Пищевая и биологическая ценность мясных изделий определяется их химическим составом, энергетической ценностью, вкусовыми свойствами и уровнем усвояемости [15].

В результате проведенных исследований (рисунок 1) установлен химический состав и энергетическая ценность разработанных мясных продуктов с использованием побочного сырья убоя кроликов.

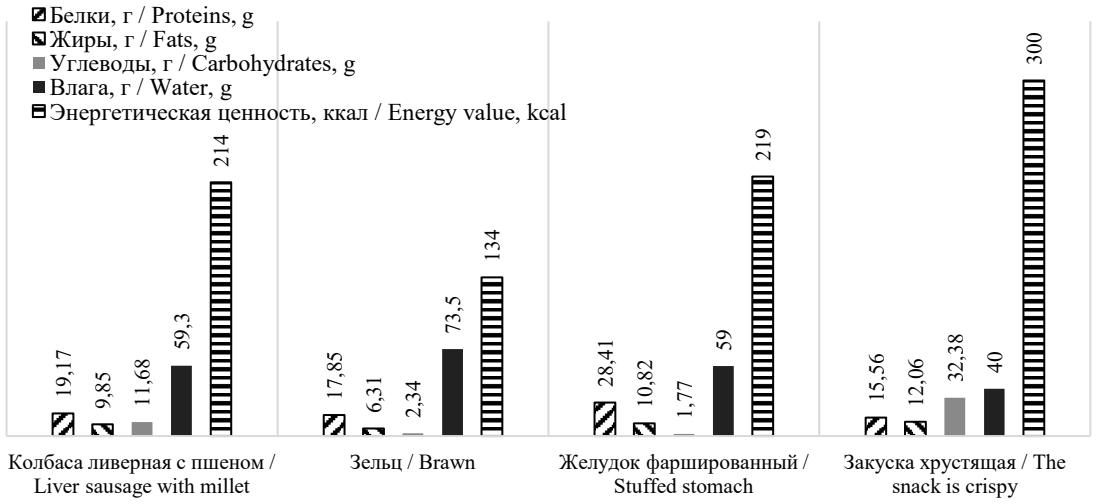


Рисунок 1. Химический состав и энергетическая ценность мясных продуктов с использованием побочного сырья убоя кроликов

Figure 1. Chemical composition and energy value of meat products using by-products of rabbit slaughter

Отмечено, что в соответствии с ТР ТС 022/2011 разработанные оригинальные мясные изделия можно отнести к продуктам с повышенным содержанием белка [8]. Энергетическая ценность колбасы ливерной с пшеном составляет 214 ккал (или 35,5%); зельца – 134 ккал (23,7%); желудка фаршированного – 219 ккал (36,1%); закуски хрустящей – 300 ккал (49,6%). Таким образом, продукты относятся к низкокалорийным продуктам, что соответствует современным тенденциям в питании значительной доли населения, – страдающих избыточной массой тела.

Известно, что биологическая ценность и качество белка напрямую зависят от соотношения в нем аминокислот. В ходе исследований нами определено содержание аминокислот в белках оригинальных мясных изделий, в том числе незаменимых [16].

В таблице 2 приведены результаты анализа аминокислотного состава белков разработанных новых мясных продуктов.

Таблица 2.

Аминокислотный состав разработанных мясных продуктов

Table 2.

Amino acid composition of the developed meat products

Аминокислота Amino acid	Массовая доля, % | Mass fraction, %			
	Колбаса ливерная с пшеном Liver sausage with millet	Зельц Brawn	Желудок фаршированный Stuffed stomach	Закуска хрустящая The snack is crispy
Аспарагиновая кислота + аспаргин Aspartic acid + aspargine	1,79	1,72	2,88	1,20
Треонин | Threonine	0,91	0,82	1,42	0,63
Серин | Serin	0,91	0,74	1,17	0,85
Глутаминовая кислота + глутамин Glutamic acid + glutamine	2,68	2,84	4,68	2,92
Глицин | Glycine	1,18	1,77	1,47	0,70
Аланин | Alanin	1,21	1.26	1,72	0,74
Цистеин | Cysteine	0,22	0,00	0,07	0,21
Валин | Valin	1,11	0.82	1,49	0,76
Метионин | Methionine	0,44	0,32	0,75	0,33
Изолейцин | Isoleucine	0,86	0.70	1,39	0,61
Лейцин | Leucine	1,79	1,38	2,38	1,13
Тирозин | Tyrosine	0,76	0,49	1,10	0,53
Фенилаланин | Phenylalanine	0,97	0,66	1,23	0,70
Гистидин | Histidine	0,55	0,48	0,87	0,33
Лизин | Lysine	1,45	1,44	2,60	0,78
Аргинин | Arginine	1,29	1,19	1,88	0,80
Пролин | Proline	0,99	1,17	1,18	2,27
Триптофан | Tryptophan	0,09	0,05	0,13	0,06

Из данных таблицы видно, что в структуре белков исследуемых продуктов содержатся все протеиногенные аминокислоты. Обращает внимание значительная доля предшественников вкуса (аспарагиновая и глутаминовая аминокислоты), а также превалирующими выступают лизин, лейцин, а среди заменимых – аланин, глицин, треонин.

Биологическая ценность белков определяется с помощью расчета аминокислотного скора, который показывает отношение доли незаменимой аминокислоты в исследуемом белке к значению этой же аминокислоты в эталонном белке. (рисунок 2) [17].

Однако объективной оценкой качества белка принят аминокислотный скор, результаты расчета которого приведены на рисунке 2.

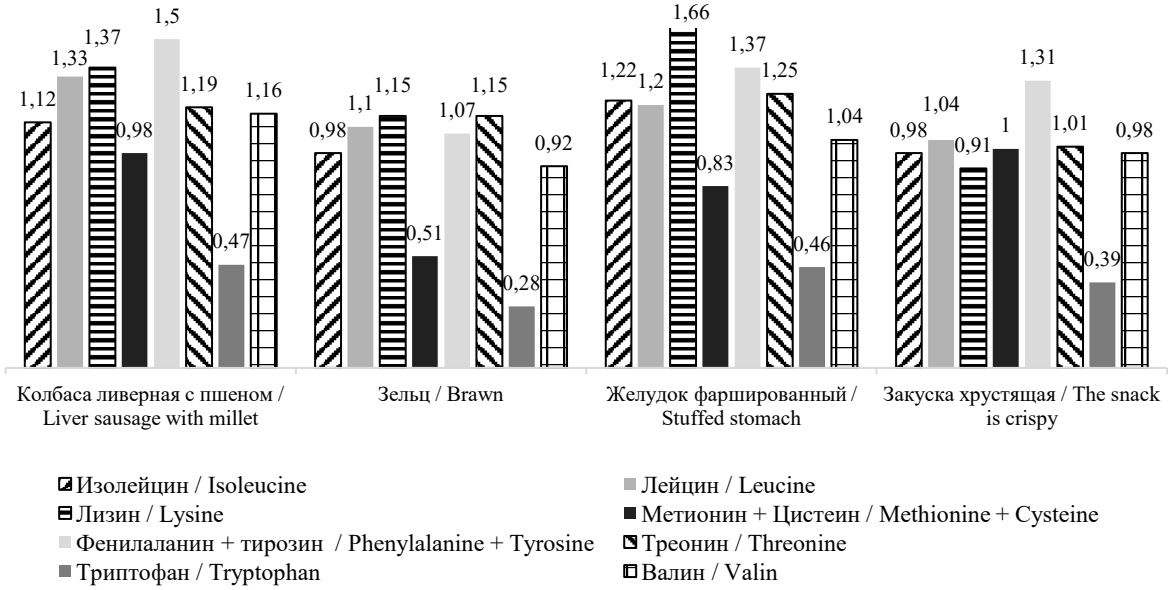


Рисунок 2. Аминокислотный скор мясных продуктов с использованием побочного сырья убоя кроликов

Figure 2. Amino acid score of meat products using by-products of rabbit slaughter

Расчеты показали, что лимитирующей биологическую ценность аминокислотой у всех разработанных продуктах является триптофан, по остальным незаменимым аминокислотам продукты практически идентичны или превосходят эталонный белок.

Для того чтобы определить среднюю величину избытка суммы незаменимых аминокислот, не используемых на пластические нужды, нами рассчитаны коэффициенты различия аминокислотного скора (рисунок 3).

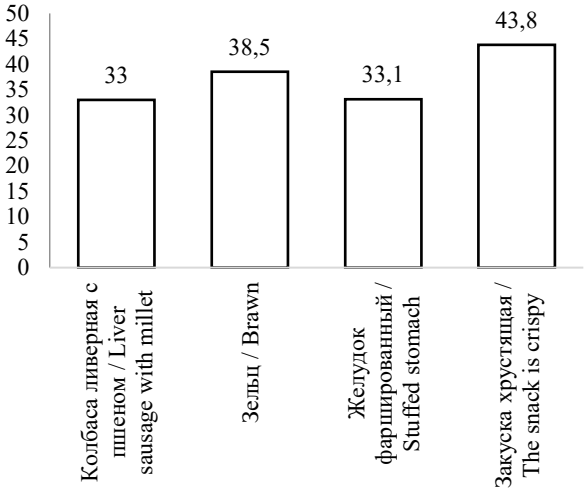


Рисунок 3. Коэффициенты различия аминокислотного скора продуктов с использованием побочного сырья убоя кроликов, %

Figure 3. Coefficients of difference in amino acid score of products using by-products of rabbit slaughter, %

Расчеты показали, что доля неиспользуемых на пластические цели незаменимых аминокислот составляет в среднем 33–38,5%. Исключение представляет закуска хрустящая, где этот показатель имеет максимальную величину – 43,8%.

Результаты доказывают происхождение этих продуктов – кишечник кроликов, белки которого представлены в основном соединительно-тканными. Их роль в питании сводится к интенсификации секреторной функции, моторики кишечника и выведению токсикантов из организма в процессе пищеварения. В связи с чем такие продукты показаны в употреблении как перекусы или дополнительное питание.

Органолептические свойства мясных изделий – определяющие показатели при выборе потребителями и формировании покупательских предпочтений [18]. Результаты проведенной дегустационной оценки разработанных мясных продуктов, по 9-ти балльной шкале с учетом известных рекомендаций, приведены в таблице 2 и на рисунке 4.

Таблица 3.

Дегустационная оценка новых мясных продуктов
с использованием субпродуктов и кишечника кроликов

Table 3.

Tasting evaluation of new meat products using offal and rabbit intestines

Показатель Indicator	Средняя оценка, баллы | Average score, points			
	Колбаса ливерная с пшеном Liver sausage with millet	Зельц Brawn	Желудок фаршированный Stuffed stomach	Закуска хрустящая The snack is crispy
Внешний вид | Appearance	8,2	7,8	7,8	8,8
Цвет и вид на разрезе | Color and view on the section	7,2	8,2	8,2	8,2
Консистенция | Consistency	7,6	8,6	8,0	7,6
Запах (аромат) | Smell (aroma)	8,2	8,0	8,4	8
Вкус | Taste	8,2	7,6	8,2	8,2
Сочность | Juiciness	7,2	7,2	7,8	-
Общая средняя оценка, баллы | Overall average score, points	7,8	7,9	8,1	8,2

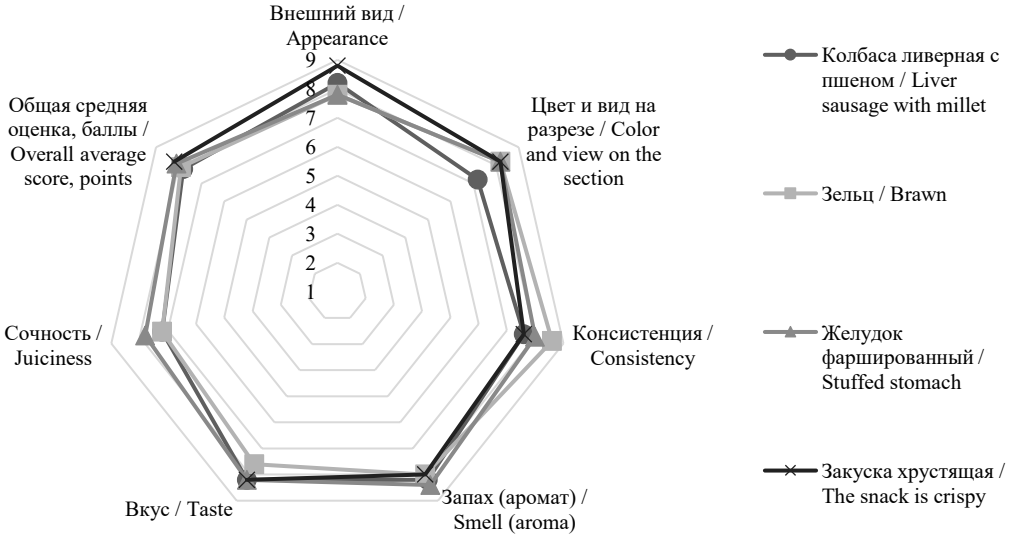


Рисунок 4. Профилограмма органолептического анализа мясных продуктов с использованием побочного сырья убоя кроликов

Figure 4. Profilogram of organoleptic analysis of meat products using by-products of rabbit slaughter

Результаты органолептических исследований показали, что разработанные мясные изделия обладают высокими потребительскими свойствами: имеют достаточно выраженный цвет, привлекательный внешний вид и вид на разрезе, консистенцию и запах, свойственные продуктам из используемого сырья, их сочность соответствует требованиям к продуктам избранных ассортиментных линеек.

Качество и безопасность мясных изделий является неукоснительным требованием для продуктов питания. Показатели зависят от качества сырья, поступающего на переработку, технического уровня оборудования и технологии производства [19].

Качество оригинальных мясных изделий определяли по следующим физико-химическим показателям: массовая доля влаги, жира, белка и поваренной соли (таблица 4).

Таблица 4.

Оценка физико-химических показателей качества мясных продуктов с использованием побочного сырья убоя кроликов

Table 4.

Assessment of physico-chemical quality indicators of meat products using by-products of rabbit slaughter

Продукт Product	Массовая доля, % | Mass fraction, %			
	Влага Moisture	Жир Fat	Белок Protein	Поваренная соль Table salt, %
Колбаса ливерная с пшеном | Liver sausage with millet	59,3	9,9	19,2	1,1
Зельц | Brawn	73,5	6,3	17,6	2,1
Желудок фаршированный | Stuffed stomach	59,0	10,8	28,4	1,8
Закуска хрустящая | Crispy Snack	40,0	12,1	15,6	2,6

Исследуемые мясные изделия по физико-химическим показателям полностью соответствуют нормативным требованиям, действующим в отрасли для данного ассортимента продуктов.

Безопасность новых мясных изделий по санитарно-гигиеническому благополучию и характерны отсутствием токсичных веществ и пестицидов. В соответствии с ТР ТС 034/2013 все исследуемые продукты проанализированы и являются безопасными по микробиологическим и гигиеническим показателям [20].

Заключение

Проведенные исследования показали, что разработанные оригинальные мясные продукты с использованием побочного сырья убоя кроликов, в том числе при комбинации с растительными компонентами, соответствуют современным требованиям нутрициологии, имеют хорошие качественные показатели, безопасны для употребления и отвечают широкому потребительскому спросу за счет разнообразия ассортимента и невысокой стоимости.

Литература

1 Величко Н.А., Машанов А.И., Речкина Е.А., Рыгалова Е.А. Технология мяса и мясных продуктов: учебное пособие. Москва: ИНФРА-М, 2024. 270 с.

2 Сидорова М.В., Панов В.П., Семак А.Э. и др.; под общ. ред. Сидоровой М.В. Морфология мясопромышленных животных (анатомия и гистология): учебник. Москва: ИНФРА-М, 2022. 307 с.

3 Антипова Л.В., Болдырева М.С. Новые ассортиментные линейки мясных продуктов питания с использованием побочного сырья убоя кроликов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024. Т. 86. № 2. С. 166–173.

4 Аюпов А.Ф., Шайдуллин Р.Р., Нуртдинова А.З., Юсупова З.Ф. Применение биологических объектов при производстве мясных продуктов из нетрадиционных видов сырья // Молодежь и наука. 2017. № 6. С. 17.

5 Гизатов А.Я., Габидуллина К.Р. Особенности переработки низкосортного сырья методом биотрансформации // Модернизация аграрного образования: сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции (16–17 декабря 2020 г.). Томск; Новосибирск: Издательский центр «Золотой колос», 2020. С. 197.

6 Болотов С.В., Зоидзе Е.Г. Использование нетрадиционных видов мясного сырья в производстве мясопродуктов // Молодежная наука – развитию агропромышленного комплекса. 2023. С. 279–284.

7 Mohamed R.K., Hassanein A.M.M., Hassan H.M.A., El-Araby D.A., Salem M.Z.M., El-Shall N.A. Physicochemical Quality Attributes Fatty Acids Profiles, Sensory Properties, and Microstructure of Rabbit Meat Fed with Agro By-Products Extracts // Egyptian Journal of Chemistry. 2024. V. 67. № 10. P. 271–280.

8 Ali U., Muwakhid B., Masyithoh D. Effects of blend by-products as fibre source on the growth performance, nutrient digestibility, and meat quality of rabbits // Advances in Animal and Veterinary Sciences. 2024. V. 12. № 9. P. 1664–1669.

9 Siudak Z., Kowalska D. Dietary Supplements Used in Rabbit Nutrition and Their Effect on the Fatty Acid Profile of Rabbit Meat – A Review // Journal of Animal and Feed Sciences. 2023. V. 33. № 2. P. 159–169.

10 Рудаков О.Б., Рудакова Л.В. Аминокислотный анализ белков мяса // Мясные технологии. 2020. № 2. С. 29–35.

11 Ахремко А.Г. Совершенствование протеомного метода для качественного определения белкового состава мяса и мясных продуктов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва: Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова, 2021. 140 с.

12 Honrado A., Sucasas L., Bedia M., García-Torres S., Carabaño R., de la Fuente J., López-Pedrouso M. Low-fat fresh sausage from rabbit meat: An alternative to traditional rabbit consumption // Meat Science. 2022. V. 194. P. 108973.

13 Anongo T.T., Duru S., Ikurior S.J., Onyimonyi A.E., Omede A.A. Meat yield, organ weight and blood profile of grower rabbits fed diets containing rice offal, rice bran and rice grain rejects // Nigerian Journal of Animal Science and Technology (NJAST). 2024. V. 7. № 3. P. 11–17.

14 Honrado A., Sucasas L., Bedia M., García-Torres S., Carabaño R., de la Fuente J., Lorenzo J.M., López-Pedrouso M., Franco D. Dry cured low-fat rabbit sausage: A much healthier disruptive food that enhances rabbit meat consumption // International Journal of Gastronomy and Food Science. 2023. V. 33. P. 100765.

15 Jadori M.S., Yakubu B., Afolabi K.D., Yahaya M.A., Akpa D.F., Igbadun H.E. Effect of Utilizing Varying Levels of Millet Offal as Replacement for Maize Offal in the Diets of Growing Rabbit // African Journal of Agricultural Science and Food Research. 2024. V. 16. № 1. P. 68–83.

16 Kpehe A.T., Tuleun C.D., Kaankuka F.G. Nutrient digestibility, visceral organ changes and carcass yield of rabbits fed with diets containing graded levels of rumen filtrate-fermented rice offal // Nigerian Journal of Biotechnology. 2021. V. 38. № 1. P. 14–23.

17 Babicz M., Kropiwiec-Domańska K., Szyndler-Nędza M., Kasprzyk A. Analysis of technological and consumption quality of offal and offal products obtained from pulawska and polish landrace pigs // Animals. 2020. V. 10. № 6. P. 964.

18 Imbabi T., Dawood M.A., Gewaily M., Abdo S., Sewilam H. Supplementing rabbit diets with butylated hydroxyanisole affects oxidative stress, growth performance, and meat quality // Animal. 2021. V. 15. № 9. P. 100339.

19 Sanah I., Boudjellal A., Becila S. Morphometric traits, carcass characteristics and biochemical composition of meat between local and synthetic Algerian rabbit genotypes // Journal of Indonesian Tropical Animal and Agriculture. 2024. V. 49. № 1. P. 51–66.

20 Martignon M., Bannelier C., Gidenne T. Feeding behaviour of the growing rabbit fed freely or restricted, and impact on performances and digestive organs // World Rabbit Science. 2022. V. 30. № 2. P. 119–130.

21 Антипова Л.В., Дунченко Н.И. Химия пищи: учебник. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 856 с.

22 Елисеева Л.Г., Родина Т.Г., Рыжакова А.В. и др.; под ред. Елисеевой Л.Г. Товароведение однородных групп продовольственных товаров: учебник. 5-е изд. Москва: Дашков и К, 2022. 949 с.

23 Бессонова Л.П., Дунченко Н.И., Антипова Л.В. Научные основы обеспечения качества и безопасности пищевых продуктов: монография. 2-е изд., испр. и доп. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2021. 392 с.

References

1 Velichko N.A., Mashanov A.I., Rechkina E.A., Rygalova E.A. Meat and meat products technology: textbook. Moscow: INFRA-M, 2024. 270 p. (in Russian)

2 Sidorova M.V., Panov V.P., Semak A.E. et al.; under general ed. Sidorova M.V. Morphology of meat industry animals (anatomy and histology): textbook. Moscow: INFRA-M, 2022. 307 p. (in Russian)

3 Antipova L.V., Boldyreva M.S. New assortment lines of meat food products using rabbit slaughter by-products. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 166–173. (in Russian)

4 Ayupov A.F., Shaydullin R.R., Nurtdinova A.Z., Yusupova Z.F. The use of biological objects in the production of meat products from non-traditional types of raw materials. Youth and Science. 2017. no. 6. p. 17. (in Russian)

5 Gizatov A.Ya., Gabidullina K.R. Features of processing low-grade raw materials by biotransformation method. Modernization of agricultural education: collection of scientific papers based on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference (December 16–17, 2020). Tomsk; Novosibirsk: Publishing Center "Golden Ear", 2020. p. 197. (in Russian)

6 Bolotov S.V., Zoidze E.G. Use of non-traditional types of meat raw materials in the production of meat products. Youth science for the development of the agro-industrial complex. 2023. pp. 279–284. (in Russian)

7 Mohamed R.K., Hassanein A.M.M., Hassan H.M.A., El-Araby D.A., Salem M.Z.M., El-Shall N.A. Physicochemical Quality Attributes Fatty Acids Profiles, Sensory Properties, and Microstructure of Rabbit Meat Fed with Agro By-Products Extracts. Egyptian Journal of Chemistry. 2024. vol. 67. no. 10. pp. 271–280.

8 Ali U., Muwakhid B., Masyithoh D. Effects of blend by-products as fibre source on the growth performance, nutrient digestibility, and meat quality of rabbits. Advances in Animal and Veterinary Sciences. 2024. vol. 12. no. 9. pp. 1664–1669.

9 Siudak Z., Kowalska D. Dietary Supplements Used in Rabbit Nutrition and Their Effect on the Fatty Acid Profile of Rabbit Meat – A Review. Journal of Animal and Feed Sciences. 2023. vol. 33. no. 2. pp. 159–169.

10 Rudakov O.B., Rudakova L.V. Amino acid analysis of meat proteins. Meat Technologies. 2020. no. 2. pp. 29–35. (in Russian)

11 Ahremko A.G. Improvement of the proteomic method for qualitative determination of the protein composition of meat and meat products: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbatov, 2021. 140 p. (in Russian)

12 Honrado A., Sucasas L., Bedia M., García-Torres S., Carabaño R., de la Fuente J., López-Pedrouso M. Low-fat fresh sausage from rabbit meat: An alternative to traditional rabbit consumption. Meat Science. 2022. vol. 194. p. 108973.

13 Anongo T.T., Duru S., Ikurior S.J., Onyimonyi A.E., Omede A.A. Meat yield, organ weight and blood profile of grower rabbits fed diets containing rice offal, rice bran and rice grain rejects. Nigerian Journal of Animal Science and Technology (NJAST). 2024. vol. 7. no. 3. pp. 11–17.

14 Honrado A., Sucasas L., Bedia M., García-Torres S., Carabaño R., de la Fuente J., Lorenzo J.M., López-Pedrouso M., Franco D. Dry cured low-fat rabbit sausage: A much healthier disruptive food that enhances rabbit meat consumption. International Journal of Gastronomy and Food Science. 2023. vol. 33. p. 100765.

15 Jadori M.S., Yakubu B., Afolabi K.D., Yahaya M.A., Akpa D.F., Igbadun H.E. Effect of Utilizing Varying Levels of Millet Offal as Replacement for Maize Offal in the Diets of Growing Rabbit. African Journal of Agricultural Science and Food Research. 2024. vol. 16. no. 1. pp. 68–83.

16 Kpehe A.T., Tuleun C.D., Kaankuka F.G. Nutrient digestibility, visceral organ changes and carcass yield of rabbits fed with diets containing graded levels of rumen filtrate-fermented rice offal. Nigerian Journal of Biotechnology. 2021. vol. 38. no. 1. pp. 14–23.

17 Babicz M., Kropiwiec-Domańska K., Szyndler-Nędza M., Kasprzyk A. Analysis of technological and consumption quality of offal and offal products obtained from pulawska and polish landrace pigs. Animals. 2020. vol. 10. no. 6. p. 964.

18 Imbabi T., Dawood M.A., Gewaily M., Abdo S., Sewilam H. Supplementing rabbit diets with butylated hydroxyanisole affects oxidative stress, growth performance, and meat quality. Animal. 2021. vol. 15. no. 9. p. 100339.

19 Sanah I., Boudjellal A., Becila S. Morphometric traits, carcass characteristics and biochemical composition of meat between local and synthetic Algerian rabbit genotypes. Journal of Indonesian Tropical Animal and Agriculture. 2024. vol. 49. no. 1. pp. 51–66.

20 Martignon M., Bannelier C., Gidenne T. Feeding behaviour of the growing rabbit fed freely or restricted, and impact on performances and digestive organs. World Rabbit Science. 2022. vol. 30. no. 2. pp. 119–130.

21 Antipova L.V., Dunchenko N.I. Food chemistry: textbook. 3rd ed., stereotype. St. Petersburg: Lan, 2020. 856 p. (in Russian)

22 Eliseeva L.G., Rodina T.G., Ryzhakova A.V. et al.; ed. by Eliseeva L.G. Commodity science of homogeneous groups of food products: textbook. 5th ed. Moscow: Dashkov and K, 2022. 949 p. (in Russian)

23 Bessonova L.P., Dunchenko N.I., Antipova L.V. Scientific foundations for ensuring the quality and safety of food products: monograph. 2nd ed., rev. and add. St. Petersburg: GIORD, 2021. 392 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Людмила В. Антипова д.т.н., профессор, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, antipova.l54@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-1416-0297

Марина С. Болдырева старший преподаватель, кафедра товароведения и экспертизы товаров, Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кв. Молодежный, 20А, г. Луганск, 291034, Россия, bms88@yandex.com
https://orcid.org/0009-0000-9728-9362

Залина Х. Кумалагова к.т.н., доцент, кафедра химии и физики, Северо-Осетинская медицинская академия, Пушкинская улица, 40, Республика Северная Осетия – Алания, 362025, Россия, umalagova.zalina@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0003-7603-1823

Information about authors

Ludmila V. Antipova Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Animal Products Technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, antipova.l54@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-1416-0297

Marina S. Boldyreva senior lecturer, Department of Commodity Science and Product Expertise, Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Molodezhny sq., 20A, Lugansk, 291034, Russia, bms88@yandex.com
https://orcid.org/0009-0000-9728-9362

Zalina H. Kumalagova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Chemistry and Physics, North Ossetian medical academy, Pushkinskaya street, 40, republic of North Ossetia – Alania, 362025, Russia, umalagova.zalina@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0003-7603-1823

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 29/07/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025
Received 29/07/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-170-176 Оригинальная статья/Research article
УДК 635.752:664.859:66.098 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Перспективная технология получения пищевой клетчатки из корневого цикория

Полина Н. Шаповалова [1] shapovalova@rgau-msha.ru 0009-0001-7406-7668
Альберт Х.-Х. Нугманов [1] nugmanov@rgau-msha.ru 0000-0002-4093-9982
Сергей А. Масловский [2] smaslowskij@rambler.ru 0000-0001-9183-6564
Павел Д. Осмоловский [1] pavel.osmolovsku@mail.ru 0000-0003-1131-1552
Арина А. Одинцова [1] odintsowaarina@rgau-msha.ru 0000-0002-8033-7820

1 Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия
2 РОСИНФОРМАГРОТЕХ, ул. Лесная, 60, Московская обл., Пушкинский р-н, 141261, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты исследований по разработке технологии получения пищевой клетчатки из рафината, образующегося при экстрагировании целевых компонентов из сырья корневого. В качестве объекта исследований был взят отечественный сорт Ярославский 1, отличающийся повышенным содержанием инулина, достигающим 18,0%. Экстрагирование инулина из корнеплодов осуществляли после их измельчения на терочной поверхности с каплевидными отверстиями методом водной экстракции при гидромодуле 1:3 и температуре 90 °С. Полученный после диффузии рафинат подвергался сепарированию с возвращением в технологический процесс диффузного сока, а твердый остаток подвергали СВЧ сушке. Установлены оптимальные параметры СВЧ сушки – мощность излучения 540 Вт, продолжительность – 32 мин. При этом остаточная влажность высушиваемого объекта стремится к 10%, что позволяет обеспечить его длительное хранение. Готовый продукт после измельчения на ножевой мельнице представлял собой гомогенный порошок с размером отдельных частиц от 0,3 до 0,5 светло-коричневого цвета, с горьковатым привкусом, обусловленным остаточным содержанием интибина. Аромат слабовыраженный, свойственный исходному сырью. Усредненное содержание клетчатки в готовом продукте составляло 77,6 или 87,2% от общего содержания сухих веществ. Также выявлено наличие белков (3,6%) и следовое количество жиров. Предлагаемый продукт может быть использован в качестве добавки при производстве различных видов пищевых продуктов (мясных, молочных, хлебобулочных, кондитерских и др.) с целью их обогащения клетчаткой, или реализовываться как БАД пребиотического действия «Растительная клетчатка».

Ключевые слова: Цикорий корневой, экстракция, инулиновый концентрат, инулин, рафинат, СВЧ-сушка, клетчатка..

A promising technology for obtaining dietary fiber from chicory root

Polina N. Shapovalova [1] shapovalova@rgau-msha.ru 0009-0001-7406-7668
Albert H.-H. Nugmanov [1] nugmanov@rgau-msha.ru 0000-0002-4093-9982
Sergey A. Maslowskij [2] smaslowskij@rambler.ru 0000-0001-9183-6564
Pavel D. Osmolovskiy [1] pavel.osmolovsku@mail.ru 0000-0003-1131-1552
Arina A. Odintsova [1] odintsowaarina@rgau-msha.ru 0000-0002-8033-7820

1 Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia,
2 ROSINFORMAGROTECH, 60 Lesnaya St., Moscow Region, Pushkinsky District, 141261, Russia

Abstract. This paper presents the results of research into the development of a technology for producing dietary fiber from raffinate formed during the extraction of target components from raw materials of root origin. The study utilized the domestic Yaroslavsky 1 variety, characterized by a high inulin content of up to 18.0%. Inulin was extracted from the root vegetables after grinding them on a grating surface with teardrop-shaped holes using water extraction at a water ratio of 1:3 and a temperature of 90 °C. The raffinate obtained after diffusion was separated, returning the diffuse juice to the process, and the solid residue was microwave-dried. Optimal microwave drying parameters were established: a radiation power of 540 W and a duration of 32 minutes. The residual moisture content of the dried product approaches 10%, which ensures its long-term shelf life. The finished product, after grinding in a knife mill, was a homogeneous powder with a particle size of 0.3 to 0.5 mm, light brown in color, and had a slightly bitter taste due to residual intibin. The aroma was mild, characteristic of the original raw material. The average fiber content in the finished product was 77.6, or 87.2% of the total dry matter content. Protein (3.6%) and trace amounts of fat were also detected. The proposed product can be used as an additive in the production of various food products (meat, dairy, bakery, confectionery, etc.) to enrich them with fiber, or sold as a prebiotic dietary supplement "Plant Fiber."

Keywords: chicory root, extraction, inulin, inulin concentrate, raffinate, microwave drying, fiber.

Введение

Согласно современной теории, рацион питания человека должен ежедневно содержать весь установленный набор нутриентов в необходимом количестве и соотношении, а также балластные вещества. Роль последних в питании современного человека научно обоснована работами многих ученых [1, 2]. Балластные вещества представлены в основном клетчаткой – комплексом сложных нерастворимых углеводов, которые не подвергаются кислотному и ферментативному гидролизу в желудочно-кишечном

Для цитирования
Шаповалова П.Н., Нугманов А.Х., Масловский С.А., Осмоловский П.Д., Одинцова А.А. Перспективная технология получения пищевой клетчатки из корневого цикория // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 170–176. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-170-176

For citation
Shapovalova P.N., Nugmanov A.Kh., Maslovsky S.A., Osmolovsky P.D., Odintsova A.A. A promising technology for obtaining dietary fiber from chicory root. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 170–176. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-170-176

© 2025, Шаповалова П.Н. и др. / Shapovalova P.N. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

тракте человека и частично разрушающиеся в толстом кишечнике под воздействием микрофлоры, чем и объясняются их пищевые свойства. Основными источниками клетчатки являются отруби, непросеянная мука и хлеб из нее плоды, ягоды, овощи картофель [3, 4]. Суточная норма потребления клетчатки составляет 25–35 или 15–20 г на 1000 ккал пищевого рациона [5]. Более 90% потребляемых человеком продуктов (мясо, молочные продукты, рыба, яйца и т. д.) вообще не содержат клетчатки в среднем городской житель получает в составе рациона от 10 до 50 г [6]. Данный факт обуславливает важность производства пищевой клетчатки обогащения продуктов питания.

В литературе описаны различные способы и технологии обогащения клетчаткой мясных [1, 7], молочных продуктов [8], хлебобулочных [9], кондитерских изделий [10].

Основой для увеличения объемов производства пищевой клетчатки и повышения ее качества является организация сырьевой базы и совершенствование технологий ее получения. Говоря о сырье, перспективном для производства подобной продукции необходимо отметить корневой цикорий. Его используют в качестве сырья при производстве чайных и кофейных напитков, кондитерских и хлебопекарных изделий, маринадов, а также в медицинской промышленности [11, 12].

Важное значение имеет корневой цикорий как сырье для производства инулина [13]. В литературе описаны различные приемы, направленные на интенсификацию процесса извлечения инулина. В частности, приводится способ экстракции горячей водой, ультразвуковая экстракция, микроволновая экстракция, использование ферментов, сверхкритическая флюидная экстракция [14, 15].

При производстве инулина в качестве побочного продукта образуется рафинат – измельченная масса корнеплодов, содержащая остаточные количества биологически активных соединений, содержавшихся в исходном сырье. Перспективным способом его утилизации, соответствующим принципам экономики замкнутого цикла, является переработка на пищевую клетчатку.

Анализируя литературные источники по данному вопросу, можно отметить, что проблема получения пищевой клетчатки из корнеплодов цикория после экстракции из него инулина изучена недостаточно и имеет большой научный потенциал.

Материалы и методы

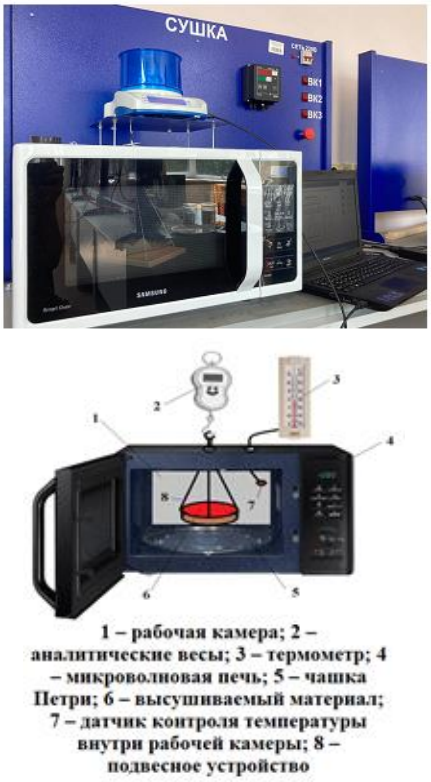
Исследования проводили на базе кафедры Технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. В качестве объекта исследований были взяты корнеплоды цикория сорта Ярославский-1, выращенный на Ростовской опытной станции по цикорию – филиале ФГБНУ ФНЦО.

Биохимические показатели качества сырья определяли по общепринятым методикам: содержание сухих веществ – термогравиметрическим методом по ГОСТ 28561–90, сахаров – перманганатным методом по ГОСТ 8756.13–87, аскорбиновой кислоты – титриметрическим методом по ГОСТ 24556–89, инулин – хроматографическим методом.

Технологическая схема лабораторной переработки корнеплодов цикория осуществлялась по технологической схеме, описанной в [15].

Определение кинетических показателей процесса сушки проводили с использованием лабораторного стенда на базе микроволновой печи SAMSUNG SMART OVEN максимальной мощностью (N) 1000 Вт, работающей на частоте (f) 2450 МГц (рис. 1)

Определение качества полученной пищевой клетчатки проводили путем оценки ее органолептического описания и определения ее химического состава по ГОСТ 13496.2–91, ГОСТ 13496.4–2019, ГОСТ 13496.4–2016.



1 – рабочая камера; 2 – аналитические весы; 3 – термометр; 4 – микроволновая печь; 5 – чашка Петри; 6 – высушиваемый материал; 7 – датчик контроля температуры внутри рабочей камеры; 8 – подвесное устройство

Рисунок 1. – Лабораторный стенд для определения кинетических показателей процесса сушки»

Figure 1. Laboratory stand for determining the kinetic parameters of the drying process

Результаты и обсуждение

Сорт корневого цикория Ярославский 1 выведен на Ростовской опытной станции по цикорию – филиале ФГБНУ ФНЦО, включен в Реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в 2022 году. Отличается корнеплодом цилиндрической формы, что оптимально для механизированной уборки. Продолжительность вегетационного периода 128 дней, урожайность – 182,0 ц/га.

Таблица 1.
Биохимические показатели качества корнеплодов цикория корневого сорта Ярославский 1

Table 1.
Biochemical quality indicators of chicory root crops of the Yaroslavsky 1 root variety

Показатель | Indicator	Значение | Value
Сухое вещество, % | Dry matter, %	21,60
Массовая доля инулина, мг/100 г Mass fraction of inulin, mg/100 g	18,0
Витамин С, мг % | Vitamin C, mg%	2,40
Сумма сахаров, % | Total sugars, %	12,52
моно-сахара | mono sugars	1,45
ди-сахара | di-sugar	11,07

Сорт Ярославский 1 отличается высоким содержанием сухих веществ (показатель, находящийся в прямой корреляционной зависимости с содержанием клетчатки), богат легкоусваиваемыми сахарами (12,25%) и инулином (18,0%). Ранее проведенные исследования [16] показали, что данный сорт по содержанию инулина превосходит многие отечественные и зарубежные сорта, и поэтому представляет большой интерес для данного способа переработки.

Получение инулинового концентрата осуществляли путем измельчения корнеплодов на терочной поверхности с каплевидными отверстиями и экстрагирования методом водной экстракции при гидромодуле 1:3 при температуре 90 °С.

При проведении лабораторных исследований кинетики сушки определяли такую характеристику, как съём сухого продукта с единицы рабочей площади в час Y, кг/(м^2·ч):

$$Y = \frac{M}{F\tau} \quad (1)$$

где M – масса полуфабриката, подвергаемого сушке; F – площадь, занимаемая сырьем, м^2; τ – продолжительность сушки, час;

Параметры сушки рафината на лабораторном стенде представлены в таблице 2

Таблица 2.
Режимные параметры процесса микроволновой сушки исследуемого рафината

Table 2.
Process parameters of microwave drying of the studied raffinate

$W_н$, кг/кг	f, МГц	N, Вт	h, см	$W_к$, кг/кг
0,64	2450	360	5,0	0,1
		540		
		720		
		900		

Результат проведённых экспериментальных исследований процесса микроволновой сушки цикория корневого и расчета удельной производительности Y, кг/(м^2·ч) представлен в таблице 3

Таблица 3.
Данные по экспериментальному исследованию процесса сушки на опытной установке

Table 3.
Data on the experimental study of the drying process in a pilot plant

Мощность СВЧ, Вт Microwave power, W	Съем сухого продукта с единицы площади, кг/(м^2·час) Consumption of dry product per unit area, kg/(m^2·hour)	Время, мин Time, min
360	14,75	56
540	25,89	32
720	31,91	26
900	подгорание продукта burning of the product	

Из представленной таблицы следует, что с увеличением мощности от 360 до 720 Вт отмечается сокращение продолжительности сушки от 25 до 26 мин и соответственно увеличивается величина съема сухого продукта с единицы площади от 17,55 до 31,91 кг/(м^2·час). Увеличение мощности СВЧ до 900 Вт недопустимо, так как при этом отмечалось очаговое подгорание рафината.

При мощности 540 и 720 Вт температура внутри камеры находилась на уровне 100–110 °С, но увеличение мощности не привело к существенному сокращению продолжительности сушки, и целесообразным следует считать только 2 мощностных параметра – 360 и 540 В.

Установлено, что при мощности излучения 540 Вт средняя температура объекта обезвоживания составляла 98,3 °С. Это объясняется тем, что при микроволновой сушке пищевого продукта, энергия эффективно поглощается водой, содержащейся в сырье. Как только вода достигает температуры, близкой к точке кипения, большая часть энергии, поглощаемой от микроволн, используется для фазового перехода – испарения воды. Этот процесс требует значительного количества энергии, и до тех пор, пока в продукте остается достаточное количество воды для испарения, температура продукта

не будет значительно превышать температуру кипения воды (около 100 °С). Мощность микроволновки (540 Вт) может быть достаточной для поддержания этого процесса испарения, но недостаточной для быстрого удаления всей воды и значительного повышения температуры продукта выше температуры кипения за 30 минут. Другими словами, энергия, которую продукт получает от микроволновки, в основном расходуется на то, чтобы превратить воду в пар, а не на повышение температуры самого продукта, т. е. пока есть вода для испарения, температура будет стабилизироваться около 100 °С.

Динамика изменения влажности рафината в зависимости от продолжительности сушки представлена на рисунке 2

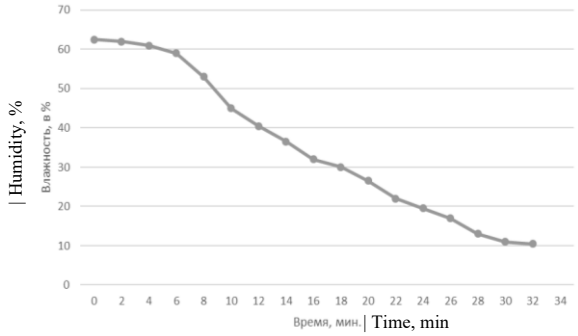


Рисунок 2. Динамика изменения влажности рафината в процессе сушки при мощности СВЧ 540 Вт

Figure 2. Dynamics of changes in raffinate moisture content during drying at a microwave power of 540 W

Таким образом, оптимальными параметрами для СВЧ сушки рафината цикория следует признать следующие: мощность СВЧ излучения 540 Вт, продолжительность – 32 мин. При этом остаточная влажность приближается 10%, при которых невозможно развитие на готовом продукте патогенной микрофлоры и обеспечивается его длительное хранение.

Технологическая схема получения пищевой клетчатки из корнеплодов цикория включала в себя следующие операции: сепарация рафината с отделением твёрдой фракции с возвращением в технологический процесс полученного на этом этапе диффузного сока, микроволновая сушка твердой фракции при установленных параметрах, измельчение на ножевой дробилке, фасовка.

Готовый продукт имел вид однородного порошка светло-коричневого цвета с размером частиц 0,3–0,5 мм. Вкус нейтральный, с легким горьковатым привкусом, обусловленный наличием остаточного содержания интибина. Аромат слабовыраженных, характерный для исходного сырья.

Полученный продукт анализировали по основным показателям, определяющим ее потребительских характеристики (остаточная влажность, массовая доля клетчатки, белков, жиров) по методикам, указанным выше. Результаты их определения и статистическая обработка полученных данных представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Химический состав пищевой клетчатки, полученной из рафината цикория, %

Table 4.

Chemical composition of dietary fiber obtained from chicory raffinate, %

Показатель Indicator	Среднее значение, $\bar{x}$ The average value, $\bar{x}$	Дисперсия, S^2 Variance, S^2	Стандартное отклонение, S Standard deviation, S	Коэффициент вариации, V Coefficient of variation, V	Относительная ошибка выборочной средней $S_{\bar{x}}$ Relative error of the sample mean $S_{\bar{x}}$
Сухое вещество Dry matter	89,0 ± 0,62	1,9	1,4	1,6	0,7
Клетчатка | Fiber	77,6 ± 0,61	1,9	1,4	1,8	0,7
Белки | Proteins	3,6 ± 0,11	0,1	0,3	8,3	3,05
Жиры |Fats	0,14 ± 0,02	0,0	-	-	14,2

На основании проведенных исследований было установлено, что при массовой доле сухих веществ в готовом продукте 89% содержание сухой клетчатки составляет 77,6%, или 87,2% от общего содержания сухих веществ. За счет концентрирования нерастворимых в воде белков при высушивании рафината их концентрация в конечном продукте возрастает до 3,6%. Также были выявлен жир в следовых количествах.

Таким образом, полученный продукт может быть использован для обогащения клетчаткой различных видов продуктов питания, в том числе и хлебобулочных изделиях, сочетаемость которых с продуктами переработки цикория доказана ранее проведенными работами [17], а также может реализовываться как пищевая добавка пребиотического действия.

Для получения экстракта и готового продукта авторами была разработана и запатентована установка, принцип действия которой заключается в активации процесса экстракции и сушке рафината с использованием СВЧ энергии [18].

Заключение

На основании проведенной научно-исследовательской работы можно сделать следующие выводы:

1. Цикорий сорта Ярославский 1 является ценным сырьем переработки вследствие высокого содержания в корнеплодах нативного инулина (до 18%) и цилиндрической формы корнеплода, оптимальной для его механизированной уборки.

2. Получение пищевой клетчатки является оптимальным способом использования рафината, образующегося после отделения диффузного сока из измельченных корнеплодов цикория корневого.

3. Установлены оптимальные параметры СВЧ сушки рафината из цикория Они имеют следующий вид: мощность СВЧ – 540 Вт, продолжительность 32 мин. Остаточная влажность высушиваемого продукта обеспечивает его стойкость при хранении и устойчивость к микробной порче.

4. Готовый продукт содержит 77,6% сырой клетчатки, что составляет 87,2% от общего содержания в нем сухих веществ, 3,6% белков и следовое количество жиров. По своим органолептическим характеристикам его можно использовать для обогащения клетчаткой различных видов продуктов питания, а также реализовывать как пищевую добавку пребиотического действия «Растительная клетчатка».

Литература

1 Мартышкин А.А., Калиничев Е.А. Использование инновационных компонентов при производстве функциональных мясных продуктов // Высокоэффективные технологии в агропромышленном комплексе. 2022. С. 132–136.

2 Косанов С.У., Ибраимова А.И., Турдумаматов С.Т., Акбарова С.Ж. Обоснование технологии производства снековой продукции из плодов дыни // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 5-2 (119). С. 57–61.

3 Коннова О.И., Арабова З.М., Алексанян И.Ю., Нугманов А.Х.-Х., Бакин И.А., Мустафина А.С. Перспективы повышения эффективности процессов экстракции каротиноидов из побочных продуктов переработки биологического сырья // Современная наука и инновации. 2023. № 4 (44). С. 152–159.

4 Евсеева С.С., Андреева Е.В., Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И.Ю. Определение параметров плодоовощных сырьевых материалов для рациональной организации экстракции природных красителей // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2020. № 3. С. 150–159.

5 Поладашвили Р.О., Галстян Н.В. Пищевые волокна – важная составляющая сбалансированного здорового питания // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 68-2. С. 68–71.

6 Кичигина Е.Ю. Значение пищевых волокон в питании человека // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития. 2020. С. 94–97.

7 Есимова Л.Б., Котельникова Ю.А., Кореневская П.А., Грикшас С.А. Обоснование использования пищевой клетчатки в производстве мясных продуктов // Научные основы развития АПК: сборник научных трудов по материалам XXII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Томск, 15 мая 2020 г.). Томск: Издательский центр «Золотой колос», 2020. С. 20–23.

8 Гаврилова Н.Б., Туманова И.А., Семенова Е.А., Федорова О.С. Современная биотехнология производства молочного десерта с функциональными ингредиентами // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024. Т. 86. № 1. С. 70–83.

9 Бекболатова М.Б., Шаймерденова Д.А., Чаканова Ж.М., Жалелов Е.М., Байгарин Е.Ж. Обогащение хлеба тонкодисперсными порошками отрубей зерновых культур // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. Т. 11. № 1. С. 65–76.

10 Тютиков А.С., Журавлев Р.А. Перспективы использования овсяной клетчатки с целью обогащения мучных кондитерских изделий // Инновации в индустрии питания и сервисе: электронный сборник материалов V Международной научно-практической конференции (Краснодар, 11 ноября 2022 г.). Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2023. С. 504–506.

11 Полянина Т.Ю., Вьютнова О.М., Смирнова И.В., Новикова И.А. Золотой корешок // Известия ФНЦО. 2020. № 3–4. С. 100–104. doi: 10.18619/2658-4832-2020-3-4-100-104.

12 Гаспарян Ш.В., Масловский С.А., Замятина М.Е., Корнев А.В., Рыбина С.Д. Использование цикория обыкновенного в качестве сырья для производства маринованной продукции // Агро-инновации. 2019. № 2 (2). С. 38–47.

13 Rambaud C., Croy M., Choque E. The great diversity of products from Cichorium intybus L. culture: how to valorize chicory byproducts: a review // Discover Plants. 2025. V. 2. № 1. P. 107.

14 Бызов В.А. Системный анализ состояния и перспективы развития производства инулина (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. Т. 23. № 6. С. 757–776.

15 Нугманов А.Х.-Х., Бакин И.А., Мустафина А.С., Шаповалова П.Н. Исследование технологических методов экстракции инулина из корней обыкновенного цикория (Cichorium intybus L.) // Хранение и переработка сельхозсырья. 2024. № 4. С. 33–44. doi: 10.36107/spfp.2024.4.597.

16 Бызов В.А., Костюченко М.Н., Соловьева А.А., Иванов Д.С. Системный анализ технологии производства корне- и клубнеплодов для переработки на инулин // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 3 (116). С. 66–84.

17 Бегеулов М.Ш., Масловский С.А., Корнев А.В., Рыбина С.Д. Использование продуктов переработки корнеплодов цикория в хлебопечении // Хлебопродукты. 2021. № 1. С. 36–39.

18 Пат. 2840780 C1 Рос. Федерация. Устройство для получения растительных экстрактов и гидролатов под воздействием СВЧ-энергии / Нугманов А.Х.-Х., Бакин И.А., Журавлев А.В. и др.; заявитель ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; заявл. 07.05.2024; опубл. 28.05.2025.

19 Akram H., Zafar H., Abbasi B.H. The chicory root (Cichorium intybus var. sativum) frontier: pioneering biotechnological advancements // Phytochemistry Reviews. 2025. V. 24. P. 5659–5683. doi: 10.1007/s11101-025-10085-x.

20 Puhlmann M.L. Back to the chicory roots: Dietary fibers rediscovered to benefit human health: диссертация. Wageningen University and Research, 2024. 185 p.

21 Omary L., Belzer C., de Clercq N.C., Aydin Ö., Prodan A., Levin E., Bergman J.J.H.M., Gerdes V.E.A., de Vos W.M., Nieuwdorp M. Intrinsic chicory root fibers modulate colonic microbial butyrate-producing pathways and improve insulin sensitivity in individuals with obesity // Cell Reports Medicine. 2025. V. 6. № 7. P. 102237. doi: 10.1016/j.xcrm.2025.102237.

22 Puhlmann M.-L., Jokela R., van Dongen K.C.W., van den Bosch T.P.P., van Baarlen P., Smidt H., Wells J.M., de Vos W.M. Dried chicory root improves bowel function, benefits intestinal microbial trophic chains and increases faecal and circulating short chain fatty acids in subjects at risk for type 2 diabetes // Gut Microbiome. 2022. V. 3. P. e4. doi: 10.1017/gmb.2022.4.

References

1. Martyshkin A.A., Kalinichev E.A. The use of innovative components in the production of functional meat products. High-efficiency technologies in the agro-industrial complex. 2022. pp. 132–136. (in Russian)

2. Kosanov S.U., Ibraimova A.I., Turdumamatov S.T., Akbarova S.Zh. Justification of the technology for the production of snack products from melon fruits. International Research Journal. 2022. no. 5-2 (119). pp. 57–61. (in Russian)

3. Konnova O.I., Arabova Z.M., Aleksanyan I.Yu., Nugmanov A.Kh.-Kh., Bakin I.A., Mustafina A.S. Prospects for increasing the efficiency of carotenoid extraction processes from by-products of biological raw material processing. Modern Science and Innovations. 2023. no. 4 (44). pp. 152–159. (in Russian)

4. Evseeva S.S., Andreeva E.V., Nugmanov A.Kh.-Kh., Aleksanyan I.Yu. Determination of parameters of fruit and vegetable raw materials for rational organization of extraction of natural dyes. Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products. 2020. no. 3. pp. 150–159. (in Russian)

5. Poladashvili R.O., Galstyan N.V. Dietary fiber – an important component of a balanced healthy diet. Trends in the development of science and education. 2020. no. 68-2. pp. 68–71. (in Russian)

6. Kichigina E.Yu. The importance of dietary fiber in human nutrition. Agro-industrial complex: problems and development prospects. 2020. pp. 94–97. (in Russian)

7. Yesimova L.B., Kotelnikova Yu.A., Korenevskaya P.A., Grikshas S.A. Justification of the use of dietary fiber in the production of meat products. Scientific foundations for the development of agro-industrial complex: collection of scientific papers based on the materials of the XXII All-Russian (National) scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation (Tomsk, May 15, 2020). Tomsk: Publishing Center "Golden Ear", 2020. pp. 20–23. (in Russian)

8. Gavrilova N.B., Tumanova I.A., Semenova E.A., Fedorova O.S. Modern biotechnology for the production of dairy dessert with functional ingredients. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2024. vol. 86. no. 1. pp. 70–83. (in Russian)

9. Bekbolatova M.B., Shaimerdenova D.A., Chakanova Zh.M., Zhalelov E.M., Baigarin E.Zh. Enrichment of bread with finely dispersed powders of cereal bran. Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2023. vol. 11. no. 1. pp. 65–76. (in Russian)

10. Tyutikov A.S., Zhuravlev R.A. Prospects for the use of oat fiber for the enrichment of flour confectionery products. Innovations in the food industry and service: electronic collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference (Krasnodar, November 11, 2022). Krasnodar: Kuban State Technological University, 2023. pp. 504–506. (in Russian)

11. Polyanina T.Yu., Vyutnova O.M., Smirnova I.V., Novikova I.A. Golden root. Proceedings of the Federal Scientific Center for Vegetable Growing. 2020. no. 3–4. pp. 100–104. doi: 10.18619/2658-4832-2020-3-4-100-104 (in Russian)

12. Gasparyan Sh.V., Maslovsky S.A., Zamyatina M.E., Kornev A.V., Rybina S.D. The use of common chicory as a raw material for the production of pickled products. Agro-innovations. 2019. no. 2 (2). pp. 38–47. (in Russian)

13. Rambaud C., Croy M., Choque E. The great diversity of products from Cichorium intybus L. culture: how to valorize chicory byproducts: a review. Discover Plants. 2025. vol. 2. no. 1. p. 107.

14. Byzov V.A. Systematic analysis of the state and prospects for the development of inulin production (review). Agrarian Science of the Euro-North-East. 2022. vol. 23. no. 6. pp. 757–776. (in Russian)

15. Nugmanov A.Kh.-Kh., Bakin I.A., Mustafina A.S., Shapovalova P.N. Research of technological methods for extracting inulin from the roots of common chicory (Cichorium intybus L.). Storage and Processing of Farm Products. 2024. no. 4. pp. 33–44. doi: 10.36107/spfp.2024.4.597 (in Russian)

16. Byzov V.A., Kostiuchenko M.N., Solovyova A.A., Ivanov D.S. Systematic analysis of the technology for the production of root and tuber crops for processing into inulin. AgroEcoEngineering. 2023. no. 3 (116). pp. 66–84. (in Russian)

17. Beguelov M.Sh., Maslovsky S.A., Kornev A.V., Rybina S.D. The use of chicory root processing products in baking. Bread Products. 2021. no. 1. pp. 36–39. (in Russian)

18. Nugmanov A.Kh.-Kh., Bakin I.A., Zhuravlev A.V. et al. Device for obtaining plant extracts and hydrolates under the influence of microwave energy. Patent RF, no. 2840780 C1, 2025.

19. Akram H., Zafar H., Abbasi B.H. The chicory root (Cichorium intybus var. sativum) frontier: pioneering biotechnological advancements. Phytochemistry Reviews. 2025. vol. 24. pp. 5659–5683. doi: 10.1007/s11101-025-10085-x

20. Puhlmann M.L. Back to the chicory roots: Dietary fibers rediscovered to benefit human health: dissertation. Wageningen: Wageningen University and Research, 2024. 185 p.

21.Omary L., Belzer C., de Clercq N.C., Aydin Ö., Prodan A., Levin E., Bergman J.J.H.M., Gerdes V.E.A., de Vos W.M., Nieuwdorp M. Intrinsic chicory root fibers modulate colonic microbial butyrate-producing pathways and improve insulin sensitivity in individuals with obesity. Cell Reports Medicine. 2025. vol. 6. no. 7. p. 102237. doi: 10.1016/j.xcrm.2025.102237

22.Puhlmann M.-L., Jokela R., van Dongen K.C.W., van den Bosch T.P.P., van Baarlen P., Smidt H., Wells J.M., de Vos W.M. Dried chicory root improves bowel function, benefits intestinal microbial trophic chains and increases faecal and circulating short chain fatty acids in subjects at risk for type 2 diabetes. Gut Microbiome. 2022. vol. 3. p. e4. doi: 10.1017/gmb.2022.4

Сведения об авторах

Полина Н. Шаповалова преподаватель, кафедра технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, shapovalova@rgau-msha.ru
https://orcid.org/0009-0001-7406-7668

Альберт Х.-Х. Нугманов д.т.н., профессор, профессор, кафедра технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, nugmanov@rgau-msha.ru
https://orcid.org/0000-0002-4093-9982

Сергей А. Масловский к.с.-х.н., доцент, в.н.с., отдел научно-информационного обеспечения Инновационного развития АПК, РОСИНФОРМАГРОТЕХ, ул. Лесная, 60, Московская обл., Пушкинский р-н, 141261, Россия, smaslowskij@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0001-9183-6564

Павел Д. Осмоловский к.с.-х.н., доцент, кафедра технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, pavel.osmolovsku@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1131-1552

Арина А. Одинцова преподаватель, кафедра управления качеством и товароведения продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, odintsowaarina@rgau-msha.ru
https://orcid.org/0000-0002-8033-7820

Information about authors

Polina N. Shapovalova lecturer, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, shapovalova@rgau-msha.ru
https://orcid.org/0009-0001-7406-7668

Albert H.-H. Nugmanov Dr. Sci. (Engin.), professor, professor, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, nugmanov@rgau-msha.ru
https://orcid.org/0000-0002-4093-9982

Sergey A. Maslowskij Cand. Sci. (Agric.), associate professor, l.r., department of scientific and information support for the innovative development of the agroindustrial complex, ROSINFORMAGROTECH, 60 Lesnaya St., Moscow Region, Pushkinsky District, 141261, Russia, smaslowskij@rambler.ru
https://orcid.org/0000-0001-9183-6564

Pavel D. Osmolovskiy Cand. Sci. (Agric.), associate professor, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, pavel.osmolovsku@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1131-1552

Arina A. Odintsova lecturer, department of quality management and commodity science of products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, odintsowaarina@rgau-msha.ru
https://orcid.org/0000-0002-8033-7820

Вклад авторов

проведение экспериментальных исследований и обработка полученных данных

Contribution

conducting experimental studies and processing the data obtained

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/07/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025

Received 01/07/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-177-183 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.004.89 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Применение искусственного интеллекта для разработки функциональных пищевых ингредиентов на основе биоактивных полисахаридов

Анастасия С. Съедугина [1] anastasia.sjedugina@ya.ru 0009-0003-2578-2416
Александра С. Уткина [1] utkina.as@rea.ru 0009-0008-6997-7270

1 Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36, г. Москва, 115054, Россия

Аннотация. Современные научные данные свидетельствуют о возрастающей роли функциональных пищевых ингредиентов в профилактике и коррекции различных заболеваний. Особый интерес исследователей и потребителей вызывают биологически активные соединения с доказанным противовоспалительным эффектом, поскольку хроническое системное воспаление низкой степени интенсивности признано ключевым фактором развития многих метаболических нарушений, включая сахарный диабет и сердечно-сосудистые патологии. В отличие от фармацевтических препаратов, воздействующих преимущественно на симптомы заболеваний, функциональные пищевые ингредиенты обладают уникальной способностью обеспечивать пролонгированный профилактический эффект благодаря регулярному потреблению в составе повседневного рациона. Среди перспективных биологически активных соединений особое место занимают полисахариды, такие как β-глюканы, пектины и арабиноксиланы, обладающие выраженным иммуномодулирующим и противовоспалительным потенциалом. Однако их широкое применение в пищевой промышленности до сих пор ограничивалось недостаточной изученностью структура-активностных взаимосвязей, сложностями стандартизации и отсутствием эффективных методов направленного выделения целевых фракций. В этом контексте технологии искусственного интеллекта открывают новые возможности для систематического изучения и целенаправленного проектирования функциональных ингредиентов на основе полисахаридов. Полученные в рамках исследования результаты демонстрируют значительную эффективность разработанного подхода. В ходе исследования удалось выделить и охарактеризовать высокоактивные фракции полисахаридов, проявляющие выраженное противовоспалительное действие. Экспериментальные данные подтвердили способность выделенных соединений существенно снижать уровень ключевых маркеров воспаления как в модельных системах in vitro, так и в клинических условиях. Особый интерес пре дставляют выявленные преимущества овсяных β-глюканов, которые сочетают высокую биологическую активность с технологической доступностью и экологической безопасностью производства.

Ключевые слова: полисахариды, функциональные продукты питания, искусственный интеллект, противовоспалительное действие, высокопроизводительный скрининг, масс-спектрометрия.

Application of artificial intelligence to develop food ingredients based on bioactive polysaccharides

Anastasia S. Sedugina [1] anastasia.sjedugina@ya.ru 0009-0003-2578-2416
Aleksandra S. Utkina [1] utkina.as@rea.ru 0009-0008-6997-7270

1 Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane, 36, Moscow, 115054, Russia

Abstract. Modern scientific evidence indicates the increasing role of functional food ingredients in the prevention and correction of various diseases. Biologically active compounds with proven anti-inflammatory effects are of particular interest to researchers and consumers, since low-intensity chronic systemic inflammation is recognized as a key factor in the development of many metabolic disorders, including diabetes mellitus and cardiovascular pathologies. Unlike pharmaceutical preparations, which act primarily on the symptoms of diseases, functional food ingredients have a unique ability to provide a prolonged preventive effect due to regular consumption as part of the daily diet. Polysaccharides such as beta-glucans, pectins and arabinoxylans, which have pronounced immunomodulatory and anti-inflammatory potential, occupy a special place among promising biologically active compounds. However, their widespread use in the food industry has so far been limited by insufficient knowledge of the structure-activity relationships, the difficulties of standardization, and the lack of effective methods for targeted extraction of target fractions. In this context, artificial intelligence technologies open up new opportunities for the systematic study and targeted design of functional ingredients based on polysaccharides. The results obtained in the framework of the study demonstrate the significant effectiveness of the developed approach. In the course of the study, it was possible to identify and characterize highly active fractions of polysaccharides that exhibit a pronounced anti-inflammatory effect. Experimental data have confirmed the ability of the isolated compounds to significantly reduce the level of key inflammatory markers both in in vitro and in clinical settings. Of particular interest are the identified advantages of oat beta-glucans, which combine high biological activity with technological accessibility and environmental safety of production.

Keywords: polysaccharides, functional foods, artificial intelligence, anti-inflammatory effect, high-throughput screening, mass spectrometry.

Для цитирования
Съедугина А.С., Уткина А.С. Применение искусственного интеллекта для разработки функциональных пищевых ингредиентов на основе биоактивных полисахаридов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 177–183. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-177-183

For citation
Sedugina A.S., Utkina A.S. Application of artificial intelligence to develop food ingredients based on bioactive polysaccharides. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 177–183. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-177-183

© 2025, Съедугина А.С. и др. / Sedugina A.S. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В последние годы наблюдается значительный рост потребительского спроса на натуральные продукты питания с научно подтвержденным оздоровительным действием. Эта тенденция обусловлена повышением доступности медицинской информации и формированием осознанного подхода к питанию как важнейшему компоненту здорового образа жизни. Современные потребители проявляют повышенный интерес к составу продуктов, требуют доказательств их эффективности и безопасности, а также уделяют особое внимание экологической составляющей производства [1]. Данные изменения потребительского поведения создают благоприятные условия для развития инновационных технологий в пищевой промышленности, направленных на создание продуктов функционального назначения.

Цель исследования – разработка комплексного подхода, сочетающего методы искусственного интеллекта с современными экспериментальными технологиями, для создания эффективных функциональных пищевых ингредиентов на основе биоактивных полисахаридов с выраженным противовоспалительным действием.

Реализация данной цели предполагает решение ряда важных задач, включая систематизацию данных о структурно-функциональных свойствах полисахаридов, оптимизацию методов их выделения и фракционирования, а также экспериментальную оценку биологической активности полученных соединений. Полученные результаты будут способствовать развитию нового направления в пищевой промышленности, ориентированного на создание научно обоснованных продуктов для профилактики заболеваний, ассоциированных с хроническим воспалением.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были выбраны биоактивные полисахариды, демонстрирующие выраженные противовоспалительные и иммуномодулирующие свойства. Изучение данных соединений проводилось с применением интегративного подхода, сочетающего классические методы лабораторного анализа с передовыми технологиями искусственного интеллекта. Важно отметить, что традиционные подходы к поиску функциональных ингредиентов часто носят эмпирический характер и связаны с существенными временными и материальными затратами. В данном исследовании использование алгоритмов искусственного интеллекта позволило создать системную методологию – от постановки целевых терапевтических задач (в частности, достижения противовоспалительного эффекта) до выявления наиболее перспективных источников биологически активных полисахаридов.

Начальный этап работы включал комплексный анализ данных, полученных из доступных научных источников. Для прогнозирования биологической активности исследуемых соединений были задействованы современные алгоритмы машинного обучения [3]. Графовые нейронные сети применялись для моделирования структурных особенностей полисахаридов, в то время как сверточные нейронные сети анализировали характерные паттерны масс-спектральных данных. Дополнительно использовались методы случайного леса и опорных векторов, позволяющие оценивать значимость различных молекулярных характеристик, таких как степень ветвления и содержание сульфатных групп. Процесс обучения алгоритмов осуществлялся на специально подготовленных наборах данных, включающих как известные противовоспалительные соединения (β-глюканы, фукоиданы), так и вещества с минимальной биологической активностью (целлюлоза, крахмал) [4–10].

Экспериментальная часть исследования базировалась на комплексе современных аналитических методов. Были использованы различные подходы к экстракции и фракционированию полисахаридов, что позволило получить высокоочищенные образцы для последующего анализа. Для детальной характеристики выделенных соединений применялись методы инфракрасной спектроскопии и масс-спектрометрии с матрично-активированной лазерной десорбцией / ионизацией. Такой комплексный подход обеспечил всестороннее изучение структурных особенностей и функциональных свойств исследуемых биополимеров, что является важным условием для их последующего практического применения в качестве функциональных пищевых ингредиентов.

Результаты

Процесс обучения моделей осуществлялся на тщательно подобранных наборах данных, включающих как хорошо изученные биологически активные полисахариды (например, β-глюканы и фукоиданы с экспериментально подтвержденным влиянием на уровень ключевых цитокинов (например, модуляция IL-6, IL-10)), так и соединения с минимальной фармакологической активностью (например, целлюлоза, крахмал) [2]. В результате сформирован ранжированный перечень перспективных соединений с количественной оценкой вероятности проявления целевого биологического эффекта, что значительно ускорило процесс отбора кандидатов для дальнейших экспериментальных исследований (таблица 1).

Наиболее значимыми признавались соединения с высокой вероятностью противовоспалительного действия (превышающей 80%), что подразумевает наличие убедительных доказательств прямого влияния на ключевые иммунные маркеры, такие как TNF-α и IL-6, полученных в ходе контролируемых клинических исследований. Такие результаты свидетельствуют о выраженной терапевтической перспективности исследуемых соединений.

Таблица 1.

Сравнительная характеристика биоактивных полисахаридов и их противовоспалительного потенциала

Table 1.

Comparative characteristics of bioactive polysaccharides and their anti-inflammatory potential

Полисахарид | Polysaccharide	Тип связей | Type of connections	Источник | Source	Ключевые свойства | Key Properties	Биоактивность | Bioactivity	Вероятность биоактивности (на примере TNF-α) | The probability of bioactivity (using TNF-α as an example)
Фукоиданы | Fucoidans	Смешанные + сульфаты | Mixed + sulfates	Бурые водоросли | Brown algae	Высокий отрицательный заряд | High negative charge	Противовоспалительное, антивирусное | Anti-inflammatory, antiviral	70–75%
β-Glucans | β-Glucans	β(1→3), β(1→4)	Овес, ячмень | Oats, barley	Водорастворимые, вязкие | Water-soluble, viscous	Иммуномодуляция, снижение холестерина | Immunomodulation, cholesterol reduction	85–90% (доза 3 г/сут) | (dose 3 g / day)
Инулин | Inulin	β(2→1)	Цикорий, топинамбур | Chicory, jerusalem artichoke	Пребиотик, низкая вязкость | Prebiotic, low viscosity	Стимуляция бифидобактерий | Stimulation of bifidobacteria	<10% (не влияет на TNF-α) | (does not affect TNF-α)
Пектины | Pectins	α(1→4)	Яблоки, цитрусовые | Apples, citrus fruits	Желирующие свойства | Gelling properties	Детоксикация, антиоксидантный эффект | Detoxification, antioxidant effect	20–30% (косвенное действие через SCFA) | (indirect action via SCFA)

Искусственный интеллект провел комплексный анализ 287 потенциальных источников, используя данные из специализированных растительных баз данных (PlantCyc, FooDB) [14, 15], официальных отчетов Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) [16], а также рецензируемых научных публикаций в базах данных PubMed и Scopus (таблица 2) [11]. Такой многофакторный подход позволил учесть не только химический состав и фармакологические свойства, но и экономические, логистические и экологические аспекты производства, что особенно важно для последующего практического внедрения результатов исследования в пищевую и фармацевтическую промышленность. В результате комплексного анализа, проведенного с применением алгоритмов искусственного интеллекта, оптимальным сырьем для получения биологически активных полисахаридов были признаны овсяные отруби (Avena sativa) [12]. Данный выбор обусловлен уникальным сочетанием технологических, экономических и биологических преимуществ. Ключевым фактором стало рекордное содержание целевых полисахаридов (8.2% от сухой массы), что существенно превышает минимальный пороговый критерий отбора. Наряду с высокой концентрацией β-глюканов, технологическая переработка данного сырья характеризуется оптимальными экономическими показателями, обеспечивая рентабельность производства при сохранении качества конечного продукта [13].

Таблица 2.

Критерии отбора и сравнительный анализ источников сырья с высоким содержанием полисахаридов

Table 2.

Selection criteria and comparative analysis of polysaccharide-rich raw material sources

Параметр | Parameter	Вес | Weight	Овес | Oats	Грибы рейши | Reishi mushrooms	Пшеничные отруби | Wheat bran
Содержание БПС (%) | BPS Content (%)	25	8.2	6.5	5.8
Биодоступность | Bioavailability	20	0.75	0.65	0.60
Стоимость переработки | Cost of processing	$15	$12	$85	$15
Научная доказанность | Scientific evidence	15	87	92	76
Экологический след | Ecological footprint	10	1.2	3.4	1.5
Масштабируемость | Scalability	10	95	65	90
Стабильность сырья | Stability of raw materials	5	88	72	85

Для определения оптимальной стратегии выделения биоактивных полисахаридов был проведен системный сравнительный анализ технологических подходов с использованием алгоритмов искусственного интеллекта (таблица 3). Исследование охватило три ключевых метода: ферментативный гидролиз, фракционирование и гибридные технологии. Алгоритмы ИИ оценивали каждый метод по комплексу взаимосвязанных параметров, включая выход целевых соединений, сохранение их структурной целостности и биологической активности, экономическую целесообразность и технологическую применимость для различных классов полисахаридов.

Таблица 3.

Анализ методов выделения полисахаридов по критериям эффективности

Table 3.

Efficiency criteria analysis for polysaccharide isolation methods

Параметр | Parameter	Ферментативный гидролиз | Enzymatic hydrolysis	Фракционирование | Fractionation	Гибридный метод | Hybrid method
Выход БПС | BPS Output	60–70%	75–85%	80–90%
Сохранение активности | Keeping active	Риск потери | Risk of loss	Максимальное | Maximum	Контролируемое | Controlled
Стоимость | Cost	Высокая ($80–100/кг) | High ($80–100/kg)	Средняя ($30–50/кг) | Average ($30–50/kg)	Умеренная ($50–70/кг) | Moderate ($50–70/kg)
Применимость | Applicability	Для низкомолекулярных форм | For low molecular weight forms	Для высокомолекулярных фракций | Для высокомолекулярных фракций	Универсальное решение | Universal solution

Авторы, на основе анализа ИИ, экспертно определили, что для БП с критически важной третичной структурой (например, иммуномодуляторов) фракционирование предпочтительнее [17].

Далее на базе РЭУ им. Г.В. Плеханова был проведен эксперимент.

Экспериментальная работа началась с этапа предварительной экстракции, для которого использовались овсяные отруби (Avena sativa), предварительно измельченные до размера частиц 0.5 мм. Процесс осуществлялся методом термоводной экстракции при строго контролируемых условиях: температуре 90 °C, продолжительности 1 час и pH 6.0, что обеспечивало максимальное извлечение водорастворимых полисахаридных комплексов при сохранении их нативной структуры.

Полученный экстракт подвергали центрифугированию при 10,000 g в течение 20 минут для отделения нерастворимых компонентов. Контроль качества на данном этапе включал определение выхода полисахаридов весовым методом и анализ содержания специфических β-1,3 / 1,6 – гликозидных связей методом ИК-спектроскопии, при этом ожидаемый выход целевых соединений составлял 8–10% от массы сырья.

Последующее многоступенчатое фракционирование направлено на разделение полисахаридного комплекса по молекулярной массе и биологической активности. Первый этап фракционирования включал осаждение высокомолекулярных фракций добавлением 40% этанола к экстракту, охлажденному до 4 °C, с последующей 12-часовой выдержкой и центрифугированием при 5,000 g в течение 15 минут. Данный подход обеспечивал селективное выделение иммуномодулирующих β-глюканов с молекулярной массой свыше 200 кДа, что контролировалось по характерному пику при 890 $см^{-1}$ в ИК-спектрах.

На заключительном этапе проводили ультрафильтрацию через каскад мембран с порами 50 кДа и 100 кДа, что позволило разделить смесь на три фракции: высокомолекулярные иммуноактивные β-глюканы (> 100 кДа), пребиотические арабиноксиланы средней молекулярной массы (50–100 кДа) и низкомолекулярные сахара (<50 кДа), которые удалялись как балластные компоненты. Такой многоуровневый аналитический подход гарантирует получение стандартизированных фракций с воспроизводимыми свойствами, соответствующими требованиям к функциональным пищевым ингредиентам. Полученные в рамках эксперимента данные представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Выход и функциональные характеристики фракций полисахаридов после многоступенчатого фракционирования

Table 4.

Yield and functional characteristics of polysaccharide fractions after multistage fractionation

Фракция | Fraction	Молекулярная масса (кДа) | Molecular Weight (kDa)	Выход (%) | Output (%)	Активность (TNF-α,% ингибирования) | Activity (TNF-α,% inhibition)
F1	150–200	35	60 ± 5
F2	50–100	45	20 ± 3
F3*	<50	20	<5

Примечание: Фракция F3 исключается из конечного продукта. Note: The F3 fraction is excluded from the final product

Мы получили функциональный ингредиент, которому дали название – OatGlucan™, состав которого состоит из 3-х ключевых β-глюкановых фракции. Полученные фракции проходят комплексную биологическую оценку, включая тесты на иммуномодулирующую активность in vitro и пребиотические свойства, что обеспечивает научное обоснование для их дальнейшего применения в качестве функциональных пищевых ингредиентов.

Обсуждение

Основным преимуществом предложенной схемы фракционирования является ее универсальность – с соответствующими модификациями она может быть адаптирована для различных типов полисахаридов, сохраняя при этом ключевые достоинства: высокий выход (80–85% для овсяных β-глюканов), сохранение нативной структуры (95–100% (1→3) – связей) и возможность масштабирования для промышленного производства. Примеры адаптации проведенного эксперимента для других полисахаридов представлены в таблице № 5.

Таблица 5.

Адаптация экспериментальной части для других полисахаридов

Table 5.

Adaptation of the protocol for other polysaccharides

Параметр | Parameter	Овсяные β-глюканы | Oat beta-glucans	Грибные β-глюканы | Mushroom beta-glucans	Пектины | Pectins
Экстракция | Extraction	90 °C, вода | 90 °C, water	121 °C, автоклав | 121 °C, autoclave	60 °C, кислая среда | 60 °C, acidic environment
Осаждение этанолом | Ethanol precipitation	40%	50%	70%
Ключевая фракция | Key faction	> 100 кДа | > 100 kDa	50–300 кДа | 50–300 kDa	30–100 кДа | 30–100 kDa
Биоактивность | Bioactivity	Иммуномодуляция | Immunomodulation	Противоопухолевая | Antitumor	Пребиотическая | Prebiotic

Данные результаты открывают перспективы для разработки стандартизированных линейных продуктов с заданными противовоспалительными свойствами, способных занять устойчивую нишу на рынке научно обоснованных функциональных пищевых продуктов.

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность комбинированного подхода, объединяющего ИИ и экспериментальные методы, для разработки функциональных пищевых ингредиентов. Ключевые достижения:

ИИ идентифицировал овсяные отруби как оптимальный источник β-глюканов благодаря высокой концентрации БП (8.2%), низкой стоимости переработки и экологической устойчивости;

алгоритмы ИИ сократили время поиска и характеристики полисахаридов на 40–60% по сравнению с традиционными методами;

селективное фракционирование позволило выделить фракции с заданными свойствами, например, иммуномодулирующие β-глюканы (> 100 кДа), что подтверждено in vitro и клиническими испытаниями;

методология адаптивна для других полисахаридов (грибные β-глюканы, пектины) и открывает путь к созданию персонализированных ФПИ, ориентированных на конкретные потребности здоровья, такие как борьба с хроническим воспалением.

В заключение, стоит отметить, что ИИ открывает новые возможности для создания персонализированных и эффективных ФПИ, отвечающих потребностям здоровья. Это ускоряет процесс открытия, снижает затраты и способствует развитию безопасной и устойчивой пищевой системы. ИИ позволяет глубже понять состав и активность функциональных ингредиентов, а также выявить ФИ, обладающие необходимыми свойствами и характеристиками для человека. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение базы данных по полисахаридам и оптимизацию методов их интеграции в пищевые продукты массового потребления.

Литература

1 Doherty A., Wall A., Khaldi N., Kussmann M. Artificial Intelligence in Functional Food Ingredient Discovery and Characterisation: A Focus on Bioactive Plant and Food Peptides // Frontiers in Genetics. 2021. V. 12. P. 768979. doi: 10.3389/fgene.2021.768979.

2 Utkina A.S., Karagodin V.P., Sazonova M.A., Yet S.F. Polysaccharides and atherosclerosis: Focus on the role of key genes of cholesterol metabolism in macrophages // Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre. 2024. V. 32. P. 100430. doi: 10.1016/j.bcdf.2024.100430.

3 Тихонов С., Бабич О., Сухих С., Тихонова Н., Чернуха И. Синтез нового пептида и оценка его цитоксичности, регенеративных свойств методом прогнозирования и в эксперименте in vitro // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2023. № 3. С. 106–117.

4 База данных KEGG. URL: https://www.genome.jp/kegg/pathway.html (дата обращения: 26.06.2025).

5 База данных UniCarbKB. URL: https://www.unicarbkb.org/ (дата обращения: 26.06.2025).

6 База данных PlantCyc. URL: https://www.plantcyc.org/ (дата обращения: 26.06.2025).

7 Пат. WO2009077659A1. Method for producing β-glucan // Nakano H., Suzuki S., Karasawa H., Sugawara M. Заявл. 23.12.2008; опубл. 25.06.2009.

8 Пат. 2302429 C1 Рос. Федерация. Способ получения водорастворимого β-глюкана из дрожжей рода Saccharomyces / Романов А.С., Мамаева Н.В., Морозова В.И., Кривошеева Е.М.; заявл. 14.04.2006; опубл. 10.07.2007.

9 Пат. US20170231891A1 United States. Beta-glucan product and methods of making same / Decker S., Ryan J., Reilly P.; заявл. 10.02.2016; опубл. 17.08.2017.

10 Библиотеки масс-спектрометрии. URL: https://interanalyt.ru/shop/mass-spectrometry/gazovye-khromato-mass-spektrometry/biblioteki-mass-spektrov/ (дата обращения: 27.06.2025).

11 Korobova M.A., Gubina D.I. Overview of Machine Learning Methods Used in Algorithmic Trading // Languages in Professional Communication: сборник материалов конференции (28 апреля 2022 г.). 2022. P. 54–59.

12 Sun T., Li J., Qin Y., Xie J., Xue B., Li X., Gan J., Bian X., Shao Z. Rheological and functional properties of oat β-glucan with different molecular weight // Journal of Molecular Structure. 2020. V. 1209. P. 127938. doi: 10.1016/j.molstruc.2020.127938.

13 Murphy E.J., Rezoagli E., Major I., Rowan N.J., Laffey J.G. β-Glucan Metabolic and Immunomodulatory Properties and Potential for Clinical Application // Journal of Fungi. 2020. V. 6. № 4. P. 356. doi: 10.3390/jof6040356.

14 База данных FooDB. URL: https://foodb.ca/ (дата обращения: 26.06.2025).

15 Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО). URL: https://www.fao.org/home/ru (дата обращения: 01.07.2025).

16 Lante A., Canazza E. Insight on Extraction and Preservation of Biological Activity of Cereal β-D-Glucans // Applied Sciences. 2023. V. 13. № 19. P. 11080. doi: 10.3390/app131911080.

17 Guo B., Lu X., Jiang X., Shi X., Wang Q., Gao J. Artificial Intelligence in Advancing Algal Bioactive Ingredients: Production, Characterization, and Application // Foods. 2025. V. 14. № 10. P. 1783. doi: 10.3390/foods14101783.

18 Khanal S., Sharma A., Pillai M., Ramakanth D., Ghosh A., Tiwari B.K., Majumder K. Artificial intelligence-driven innovation in Ganoderma spp.: potentialities of their bioactive compounds as functional foods // Sustainable Food Technology. 2025. V. 3. № 3. P. 759–775. doi: 10.1039/D4FB00357H.

19 Chang J., Wang H., Su W., Liu J., Wang X., Wu Q., Zheng L., Liu X. Artificial intelligence in food bioactive peptides screening: Recent advances and future prospects // Trends in Food Science & Technology. 2025. V. 156. P. 104845. doi: 10.1016/j.tifs.2024.104845.

20 Doherty A., Wall A., Khaldi N., Kussmann M. Artificial intelligence in functional food ingredient discovery and characterisation: a focus on bioactive plant and food peptides // Frontiers in Genetics. 2021. V. 12. P. 768979. doi: 10.3389/fgene.2021.768979.

21 Yuan D., Li C., Huang Q., Fu X., Dong H. Current advances in the anti-inflammatory effects and mechanisms of natural polysaccharides // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. V. 63. № 22. P. 5890–5910. doi: 10.1080/10408398.2022.2025535.

References

1 Doherty A., Wall A., Khaldi N., Kussmann M. Artificial Intelligence in Functional Food Ingredient Discovery and Characterisation: A Focus on Bioactive Plant and Food Peptides. Frontiers in Genetics. 2021. vol. 12. p. 768979. doi: 10.3389/fgene.2021.768979

2 Utkina A.S., Karagodin V.P., Sazonova M.A., Yet S.F. Polysaccharides and atherosclerosis: Focus on the role of key genes of cholesterol metabolism in macrophages. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre. 2024. vol. 32. p. 100430. doi: 10.1016/j.bcdf.2024.100430

3 Tikhonov S., Babich O., Sukhikh S., Tikhonova N., Chernukha I. Synthesis of a new peptide and assessment of its cytotoxicity, regenerative properties by prediction and in vitro experiment. Bulletin of the Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences. 2023. no. 3. pp. 106–117. (in Russian)

4 KEGG Pathway Database. Available at: https://www.genome.jp/kegg/pathway.html (accessed June 26, 2025).

5 UniCarbKB Database. Available at: https://www.unicarbkb.org/ (accessed June 26, 2025).

6 PlantCyc Database. Available at: https://www.plantcyc.org/ (accessed June 26, 2025).

7 Nakano H., Suzuki S., Karasawa H., Sugawara M. Method for producing β-glucan. WO Patent No. WO2009077659A1, 2009.

8 Romanov A.S., Mamaeva N.V., Morozova V.I., Krivosheeva E.M. Method for obtaining water-soluble β-glucan from yeast of the genus Saccharomyces. Patent RF, no. 2302429 C1, 2007. (in Russian)

9 Decker S., Ryan J., Reilly P. Beta-glucan product and methods of making same. US Patent No. US20170231891A1, 2017.

10 Mass Spectrometry Libraries. Available at: https://interanalyt.ru/shop/mass-spectrometry/gazovye-khromato-mass-spektrometry/biblioteki-mass-spektrov/ (accessed June 27, 2025). (in Russian)

11 Korobova M.A., Gubina D.I. Overview of Machine Learning Methods Used in Algorithmic Trading. Languages in Professional Communication: collection of conference materials (April 28, 2022). 2022. pp. 54–59.

12 Sun T., Li J., Qin Y., Xie J., Xue B., Li X., Gan J., Bian X., Shao Z. Rheological and functional properties of oat β-glucan with different molecular weight. Journal of Molecular Structure. 2020. vol. 1209. p. 127938. doi: 10.1016/j.molstruc.2020.127938

13 Murphy E.J., Rezoagli E., Major I., Rowan N.J., Laffey J.G. β-Glucan Metabolic and Immunomodulatory Properties and Potential for Clinical Application. Journal of Fungi. 2020. vol. 6. no. 4. p. 356. doi: 10.3390/jof6040356

14 FooDB Database. Available at: https://foodb.ca/ (accessed June 26, 2025).

15 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Available at: https://www.fao.org/home/ru (accessed July 1, 2025).

16 Lante A., Canazza E. Insight on Extraction and Preservation of Biological Activity of Cereal β-D-Glucans. Applied Sciences. 2023. vol. 13. no. 19. p. 11080. doi: 10.3390/app131911080

17 Guo B., Lu X., Jiang X., Shi X., Wang Q., Gao J. Artificial Intelligence in Advancing Algal Bioactive Ingredients: Production, Characterization, and Application. Foods. 2025. vol. 14. no. 10. p. 1783. doi: 10.3390/foods14101783

18 Khanal S., Sharma A., Pillai M., Ramakanth D., Ghosh A., Tiwari B.K., Majumder K. Artificial intelligence-driven innovation in Ganoderma spp.: potentialities of their bioactive compounds as functional foods. Sustainable Food Technology. 2025. vol. 3. no. 3. pp. 759–775. doi: 10.1039/D4FB00357H

19 Chang J., Wang H., Su W., Liu J., Wang X., Wu Q., Zheng L., Liu X. Artificial intelligence in food bioactive peptides screening: Recent advances and future prospects. Trends in Food Science & Technology. 2025. vol. 156. p. 104845. doi: 10.1016/j.tifs.2024.104845

20 Doherty A., Wall A., Khaldi N., Kussmann M. Artificial intelligence in functional food ingredient discovery and characterisation: a focus on bioactive plant and food peptides. Frontiers in Genetics. 2021. vol. 12. p. 768979. doi: 10.3389/fgene.2021.768979

21 Yuan D., Li C., Huang Q., Fu X., Dong H. Current advances in the anti-inflammatory effects and mechanisms of natural polysaccharides. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. vol. 63. no. 22. pp. 5890–5910. doi: 10.1080/10408398.2022.2025535

Сведения об авторах

Анастасия С. Съедугина аспирант, Базовая кафедра индустрии качества, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36, г. Москва, 115054, Россия, anastasia.sjedugina@ya.ru

https://orcid.org/0009-0003-2578-2416

Александра С. Уткина к.т.н., старший преподаватель, Базовая кафедра индустрии качества, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36, г. Москва, 115054, Россия, utkina.as@rea.ru

https://orcid.org/0009-0008-6997-7270

Information about authors

Anastasia S. Sedugina graduate student, Basic Department of Quality Industry, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane, 36, Moscow, 115054, Russia, anastasia.sjedugina@ya.ru

https://orcid.org/0009-0003-2578-2416

Aleksandra S. Utkina Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, Basic Department of Quality Industry, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane, 36, Moscow, 115054, Russia, utkina.as@rea.ru

https://orcid.org/0009-0008-6997-7270

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 19/07/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 01/09/2025

Received 19/07/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 01/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-184-190 Оригинальная статья/Research article
УДК 664 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Растворимые пищевые волокна «ИнтенсФлор» в технологии полуфабрикатов из мяса птицы

Валентина Н. Храмова [1,2] hramova_vn@mail.ru 0000-0002-0062-3211
Вероника В. Васильева [1] buzowa.veronika@ya.ru
Ольга А. Княжеченко [2] knyazhechenko71@gmail.com 0000-0003-1508-2179
Кирилл А. Лубчинский [1] lubkirill@mail.ru
Алексей В. Васильев [1] tpp@vstu.ru

1 Волгоградский государственный технический университет, пр. им. В. И. Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Россия
2 Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, ул. Рокоссовского, 6, г. Волгоград, 400131, Россия

Аннотация. Современные тенденции пищевой промышленности ориентированы на создание функциональных продуктов, обогащённых пищевыми волокнами, которые не только улучшают технологические характеристики, но и повышают биологическую ценность мясных изделий. В данной работе проведено сравнительное исследование влияния пшеничной клетчатки и растворимого кукурузного волокна «ИнтенсФлор» (ООО «НьюБио») на качественные показатели полуфабрикатов из мяса птицы. Установлено, что образец с растворимыми кукурузными волокнами продемонстрировал статистически значимое превосходство, показав наивысшие значения водосвязывающей (82,4%), жироудерживающей (88,1%) способностей, что в дальнейшем привело к минимальным потерям влаги и жира при термической обработке и выход готовой продукции составил 97,2%. Установлено, что образец с растворимыми кукурузными волокнами и мальтодекстрином продемонстрировал статистически значимое превосходство по консистенции, отмечена более нежная и сочная текстура продукта без посторонних привкусов, что подтверждает технологическую целесообразность применения растворимых кукурузных волокон в рецептурах мясных полуфабрикатов. Анализ пищевой ценности выявил модификацию нутриентного профиля опытных образцов: достоверное снижение жира (на 0,7-0,9%), массовой доли белка (на 1,1-1,4%), увеличение содержания влаги, сложных углеводов и золы по сравнению с контролем. Таким образом, применение растворимых кукурузных волокон «ИнтенсФлор» с пребиотическими свойствами, признано более эффективным для создания высококачественных мясных полуфабрикатов с повышенной биологической ценностью, что соответствует современным трендам здорового образа жизни, привлекательных для широкого круга потребителей. Разработанная рецептура и технология проста в реализации и адаптирована для массового промышленного производства, что в дальнейшем позволит наращивать объемы выпуска продукции и обеспечит её конкурентноспособность на рынке здорового питания.

Ключевые слова: растворимые кукурузные волокна, мальтодекстрин, полуфабрикаты рубленые, мясо птицы, технология полуфабрикатов..

«IntensFlor» soluble dietary fiber in the technology of semi-finished poultry meat products

Valentina N. Khramova [1,2] hramova_vn@mail.ru 0000-0002-0062-3211
Veronica V. Vasilyeva [1] buzowa.veronika@ya.ru
Olga A. Knyazhechenko [2] knyazhechenko71@gmail.com 0000-0003-1508-2179
Kirill A. Lubchinsky [1] lubkirill@mail.ru
Alexey V. Vasilyev [1] tpp@vstu.ru

1 Volgograd State Technical University, V. I. Lenin Ave., 28, Volgograd, 400005, Russia
2 Volga Scientific Research Institute of Meat and Dairy Products Production and Processing, 6 Rokossovskiy St., Volgograd, 400131, Russia

Abstract. Modern trends in the food industry are focused on the creation of functional products enriched with dietary fiber, which not only improve the technological characteristics, but also increase the biological value of meat products. In this paper, a comparative study of the effect of wheat fiber and IntensFlor soluble corn fiber (NewBio LLC) on the quality of semi-finished poultry meat products has been conducted. It was found that the sample with soluble corn fibers demonstrated a statistically significant superiority, showing the highest values of water-binding (82.4%), fat-retaining (88.1%) abilities, which subsequently led to minimal losses of moisture and fat during heat treatment and the yield of finished products was 97.2%. It was found that the sample with soluble corn fibers and maltodextrin demonstrated a statistically significant superiority in consistency, a more delicate and juicy texture of the product without foreign flavors was noted, which confirms the technological feasibility of using soluble corn fibers in the formulations of semi-finished meat products. The nutritional value analysis revealed a modification of the nutrient profile of the experimental samples: a significant decrease in fat (by 0.7-0.9%), a mass fraction of protein (by 1.1-1.4%), an increase in moisture content, complex carbohydrates and ash compared with the control. Thus, the use of IntensFlor soluble corn fibers with prebiotic properties has been recognized as more effective for creating high-quality semi-finished meat products with increased biological value, which corresponds to modern trends in a healthy lifestyle and is attractive to a wide range of consumers. The developed formulation and technology are easy to implement and adapted for mass industrial production, which will further increase the volume of production and ensure its competitiveness in the market of healthy nutrition.

Keywords: soluble corn fibers, maltodextrin, minced semi-finished products, poultry meat, semi-finished products technology.

Для цитирования
Храмова В.Н., Васильева В.В., Княжеченко О.А., Лубчинский К.А., Васильев А.В. Растворимые пищевые волокна «ИнтенсФлор» в технологии полуфабрикатов из мяса птицы // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 184–190. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-184-190

For citation
Khramova V.N., Vasilyeva V.V., Knyazhechenko O.A., Lubchinsky K.A., Vasilyev A.V. «IntensFlor» soluble dietary fiber in the technology of semi-finished poultry meat products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 184–190. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-184-190

© 2025, Храмова В.Н.. и др. / Khramova V.N. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Растворимые пищевые волокна обладают высокой влагосвязывающей способностью, пребиотическим эффектом и способностью снижать калорийность продуктов, что делает их перспективными ингредиентами для мясных полуфабрикатов [1]. Исследования показали, что включение пищевых волокон в состав мясных систем улучшает текстуру, сочность и стабильность фарша, а также снижает потери массы при термической обработке [2, 10]. В частности, применение овсяных и пшеничных волокон в котлетах и фрикадельках позволяет увеличить выход готовой продукции на 10–15 % за счет удержания влаги [1]. Кроме того, растворимые пищевые волокна способствуют снижению содержания жира и холестерина в продуктах, что соответствует требованиям здорового питания [3]. Важным аспектом является их способность замедлять усвоение углеводов, что особенно актуально для профилактики метаболических заболеваний [4].

Как показывают исследования [5], обогащение фрикаделек из куриного мяса пищевыми волокнами (овсяными, пшеничными) способствовало улучшению их текстуры и сочности. При оптимальном содержании пищевых волокон – 3–5 % в рецептурах, они увеличивают влагосвязывающую способность, снижая потери массы при термической обработке, не ухудшая вкус и аромат, что важно для потребительского восприятия [6]. При этом повышается вязкость и стабильность фаршевых систем, что может быть полезно для мясных эмульсий, например, для производства сосисок и колбас [7].

Ученые в своем исследовании отметили [18], что современные методы обработки, такие как ферментация, ультразвук улучшают функциональные свойства пищевых волокон, повышая их растворимость и гидратационную способность. Обработанные растворимые пищевые волокна эффективнее связывают воду и жиры, что делает их идеальными ингредиентами для мясных продуктов с пониженной калорийностью, таких как эмульгированные колбасы, паштеты и рубленые полуфабрикаты.

В мясных полуфабрикатах из птицы, отличающихся нежной текстурой и склонностью к потере влаги, растворимые пищевые волокна могут играть ключевую роль в сохранении качества продукта. Таким образом, изучение влияния растворимых пищевых волокон на органолептические и функционально-технологические свойства полуфабрикатов из мяса птицы представляет значительный научный и практический интерес.

Цель работы – сравнить эффективность применения растворимых кукурузных волокон «ИнтенсФлор», мальтодекстрина (DE 10–15) и пшеничной клетчатки в качестве структурообразующих и влагоудерживающих компонентов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска эффективных натуральных структурообразователей, способных одновременно повышать влагоудерживающую способность мясных фаршевых систем, улучшать текстуру готовых изделий и снижать их калорийность.

Материалы и методы

Исследования по применению растворимых кукурузных волокон (в сочетании с мальтодекстрином в составе разработанной комплексной вкусоароматической добавки) в качестве структурообразующего и влагоудерживающего компонента для рубленых полуфабрикатов проведены в учебно-научном центре «Технолог» (УНЦ «Технолог») кафедры технологии пищевых производств ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) (г. Волгоград). Объекты исследований: контрольный и опытные образцы мясных полуфабрикатов (котлет) следующего состава, кг / 100 кг: филе грудки куриное – 35; филе бедра куриное – 45; кожа куриная – 20; лук сухой – 1. Технология изготовления опытных образцов включала в себя инъектирование мясного сырья рассолом, затем массирование и созревание в камере при температуре не выше 4 °С в течение 12 ч. После этого предварительно подготовленное мясо отправляли на измельчение и фаршесоставление согласно рецептуре.

В рассолах для инъектирования мясного сырья использовали:

- для первого опытного образца (ПК) – пищевую соль и пшеничную клетчатку (ООО «Биопродмаш», г. Красноярск);
- для второго опытного образца (КВ) – растворимые кукурузные волокна «ИнтенсФлор», мальтодекстрин (ООО «НьюБио», Волгоградская область) в составе разработанной комплексной вкусоароматической добавки.

Контрольный образец вырабатывали без предварительной обработки мясного сырья, по классической технологии.

Количество внесения кукурузного волокна – 4 % было экспериментально определено в ранее проведенных нами исследованиях [8].

В наших исследованиях использовано кукурузное волокно «ИнтенсФлор» (ООО «НьюБио», Волгоградская область), которое представляет собой мелкодисперсный порошок белого цвета, хорошо растворимый в воде и водных средах, имеет сладковатый вкус, без неприятных привкусов и послевкусия [14].

В ходе экспериментальных исследований использованы стандартизованные методы анализа. Во всех испытаниях было проведено изучение функционально-технологических свойств: выход продукта, водосвязывающей, влагоудерживающей и жироудерживающей способности. Органолептическую оценку термически обработанных образцов проводили методом профильного анализа с использованием количественной дескриптивной шкалы. Анализ проводили по 5-балльной системе с оценкой следующих параметров: внешний вид (форма, состояние поверхности, цвет корочки – 1–5 баллов), цвет на разрезе (равномерность распределения, интенсивность – 1–5 баллов), консистенция (нежность, сочность, плотность, однородность – 1–5 баллов), органолептические характеристики запаха и аромата (чистота, выраженность, соответствие – 1–5 баллов), вкусовые качества (сбалансированность, полнота вкуса, послевкусие – 1–5 баллов). Условия дегустации соответствовали требованиям ГОСТ 9957–2019: температура образцов 60 ± 5 °С, нейтральный фон помещения, исключение посторонних запахов. Для минимизации субъективных ошибок применяли слепой метод с рандомизацией образцов.

Массовую долю влаги в готовых продуктах определяли по ГОСТ 9793–2016. Определение массовой доли белка проводили по ГОСТ 25011–2017. Массовую долю золы определяли в соответствии с ГОСТ 31727–2012 и рекомендациями. Определение массовой доли жира в готовых образцах определяли в аппарате Сокслета в соответствии с рекомендациями, по ГОСТ 23042–2015.

Повторность опытов – пятикратная. Статистическая обработка проведена в MS Excel с использованием t-критерия Стьюдента-Фишера.

Результаты и обсуждение

После проведения опытных выработок был выполнен комплексный анализ функционально-технологических свойств полученных образцов. Основное внимание было уделено определению ключевых технологических показателей: водосвязывающей (ВСС) и жироудерживающей (ЖУС) способностей фарша, а также расчету влагоудерживающей способности (ВУС) готовых изделий после термообработки. Эти параметры являются критически важными для прогнозирования выхода готовой продукции, сохранения сочности и минимизации потерь при термической обработке.

Ниже, на рисунке 1, представлены полученные результаты сравнительного анализа технологических свойств исследованных образцов котлет, которые послужили основой для дальнейшего обсуждения эффективности применения растительных добавок.

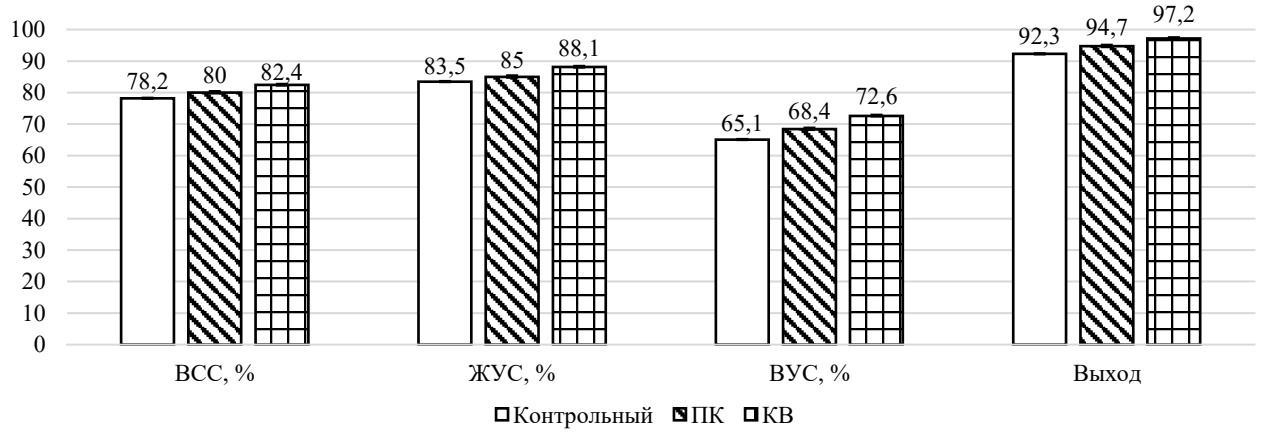


Рисунок 1. Функционально-технологические свойства образцов (ПК – образец с пшеничной клетчаткой, КВ – образец с кукурузными волокнами, ВСС – водосвязывающая способность, ЖУС – жироудерживающая способность, ВУС – влагоудерживающая способность)

Figure 1. Functional and technological properties of samples PK is a sample with wheat fiber, KV is a sample with corn fibers (VCC – water–binding ability, ZHUS – fat-retaining ability, WUS – moisture-retaining capacity)

Оба структурообразующих ингредиента статистически значимо улучшают свойства фарша, но образец с кукурузными волокнами превосходит пшеничную клетчатку по показателям водосвязывающей способности на 2,4 % ($p < 0,001$), жироудерживающей – на 3,1 % ($p < 0,05$), влагоудерживающей – на 4,2 % ($p < 0,001$). Так, данные результаты согласуются с результатами, полученными [19, 20], где добавление растительных пищевых волокон положительно сказалось на функционально-технологических свойствах котлет из мяса птицы. Повышение

ВСС и ЖУС напрямую связано с увеличением выхода готового продукта. Наибольший выход (97,2 %) наблюдался у образца с кукурузными волокнами, что объясняется минимальными потерями влаги и жира при термической обработке благодаря его свойствам, что подтверждает гипотезы [12, 10], что применение ПВ является эффективным технологическим приёмом для снижения экономических потерь.

Для комплексной оценки свойств разработанных продуктов было проведено органолептическое исследование, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты органолептической оценки образцов, баллы (M ± SD, n = 10)

Table 1.

Results of organoleptic evaluation of samples, scores (M ± SD, n = 10)

Показатель Indicator	Наименование образца | Name of the sample		
	Контроль Control	Первый опытный образец (ПК) (с пшеничной клетчаткой) First prototype (with wheat fiber)	Второй опытный образец (КВ) (с кукурузными волокнами) | Second prototype (with corn fibers)
Внешний вид | Appearance	4,3 ± 0,2	4,4 ± 0,2	4,6 ± 0,1
Цвет на разрезе | Color on the section	4,2 ± 0,2	4,3 ± 0,2	4,5 ± 0,2
Консистенция | Consistency	4,0 ± 0,3	4,3 ± 0,2	4,7 ± 0,1 *
Запах/Аромат | Smell/Smell	4,4 ± 0,2	4,3 ± 0,2	4,5 ± 0,1
Вкус | Taste	4,3 ± 0,2	4,2 ± 0,2	4,4 ± 0,2

* – статистически значимо при $p < 0,05$ | statistically significant at $p < 0.05$

Анализ данных органолептической оценки показал, что все исследованные образцы получили высокие оценки (более 4 баллов по 5-балльной шкале). Выявлено, что внесение растительных волокон не оказало негативного влияния на вкусоароматические характеристики продукции – все образцы сохранили выраженный мясной вкус и аромат, без посторонних привкусов. Однако образец КВ продемонстрировал статистически значимое превосходство ($p < 0,05$) по показателям консистенции и общему баллу относительно контроля. Отмечена более нежная, сочная и однородная консистенция котлет с кукурузным волокном, что коррелирует с ранее полученными данными о его повышенной водосвязывающей и влагоудерживающей способностей.

Помимо технологической эффективности, ключевым аспектом при разработке новых рецептур является их пищевая ценность. В связи с этим, после исследования функциональных свойств, был проведен комплексный анализ макронутриентного состава готовых котлет, включая содержание белка, жира, влаги и золы. Результаты систематизированы в таблице 2.

Таблица 2.

Химический состав и пищевая ценность опытных образцов котлет, % (M ± SD, n = 5)

Table 2.

Chemical composition and nutritional value of experimental cutlet samples, % (M ± SD, n = 5)

Показатель Indicator	Наименование образца | Name of the sample		
	Контроль Control	Первый опытный образец (ПК) (с пшеничной клетчаткой) | First prototype (with wheat fiber)	Второй опытный образец (КВ) (с кукурузными волокнами) | Second prototype (with corn fibers)
Массовая доля, % | Mass fraction, %:			
белка | protein	19,6 ± 0,3	18,2 ± 0,4 *	18,5 ± 0,3 *
жира | fat	5,0 ± 0,2	4,3 ± 0,2	4,1 ± 0,2
влаги | moisture content	73,4 ± 0,4	75,8 ± 0,5 *	76,2 ± 0,4 *
золы | ash	1,75 ± 0,10	4,20 ± 0,15 *	4,00 ± 0,12 *
углеводов (по разнице) | carbohydrates (by difference)	0,25 ± 0,05	1,50 ± 0,10 *	1,20 ± 0,08 *
Энергетическая ценность, ккал / 100 г. | Energy value, kcal / 100 g	115,4 ± 2,1	108,2 ± 1,8 *	107,5 ± 1,6 *

* – статистически значимо при $p < 0,05$ | statistically significant at $p < 0.05$

Анализируя данные таблицы, наблюдаем статистически значимое снижение массовой доли жира на 0,7–0,9 % ($p < 0,05$) и массовой доли белка на 1,1–1,4 % ($p < 0,05$) в опытных группах относительно контроля. Увеличение содержания углеводов (в 4,8–6 раз) напрямую связано с внесением растительных волокон, которые являются источником клетчатки. В опытных группах, содержащих пищевые волокна, отмечено увеличение зольности на 2,25–2,45 %, при этом пшеничная клетчатка увеличивает зольность на 0,20 % больше, чем кукурузное волокно ($p < 0.05$).

Таким образом, добавление волокон в рецептуру полуфабрикатов из мяса птицы привело к незначительному, но достоверному снижению массовой доли жира и белка, а также к повышению зольности. Полученные нами данные подтверждают свойство пищевых волокон выступать в роли наполнителя и модификатора нутриентного профиля, которое отмечают многие современные исследователи [15-17].

Заключение

Сравнительный анализ трех экспериментальных образцов полуфабрикатов из мяса птицы выявил достоверное влияние растительных добавок на ключевые показатели качества. В то время как оба типа волокон (пшеничные и кукурузные) значимо улучшили функционально-технологические свойства и скорректировали нутриентный профиль, наибольшая эффективность была зафиксирована у образца с содержанием растворимых кукурузных волокон «ИнтенсФлор», обладающих также пребиотическими свойствами, и мальтодекстрина.

Таким образом, применение растворимых кукурузных волокон «ИнтенсФлор» с пребиотическими свойствами, является более эффективным для создания высококачественных мясных полуфабрикатов с повышенной пищевой ценностью, что соответствует современным трендам здорового образа жизни, и привлекательным органолептическим профилем для широкого круга потребителей. Разработанная рецептура и технология проста в реализации и адаптирована для массового промышленного производства, что в дальнейшем позволит наращивать объемы выпуска продукции и обеспечит её конкурентоспособность на рынке здорового питания.

Благодарности

Авторы выражают благодарность администрации Волгоградской области за поддержку научно-технического проекта грантом по Соглашению № 2 от 12.12.2024 г. с ВолгГТУ, а также руководству ООО «НьюБио» (Волгоградская область, Алексеевский район, х. Шарашенский) за предоставленную на безвозмездной основе продукцию для проведения научно-исследовательских работ в рамках соглашения о социальном партнерстве и сотрудничестве.

Литература

1 Титов Е.И., Соколов А.Ю., Литвинова Е.В., Шишкина Д.И. Влияние волокон пищевых на функционально-технологические свойства мясных систем // Все о мясе. 2021. № 4. С. 30–36. doi: 10.21323/2071–2499–2021–4–30–36.

2 Бегунова А. В., Симоненко С. В., Симоненко Е. С., Семенова Е. С. Новые подходы использования пищевых волокон при разработке специализированных пищевых продуктов функциональной направленности // Пищевая промышленность. 2024. № 8. С. 149-153. doi: 10.52653/PPI.2024.8.8.029.

3 Пырьева Е. А., Сафронова А. И. Роль и место пищевых волокон в структуре питания населения // Вопросы питания. 2019. Т. 88, № 6. С. 5-11. doi: 10.24411/0042-8833-2019-10059.

4 Slavin J.L., Korczak R. Definitions, regulations, and new frontiers for dietary fiber and whole grains. Nutrition Reviews. 2020. vol. 78. no. S1. p. 6–12. doi: 10.1093/nutrit/nuz061

5 Santhi D., Kalaikannan A., Natarajan A. Characteristics and composition of emulsion-based functional low-fat chicken meat balls fortified with dietary fiber sources. Journal of Food Process Engineering. 2020. vol. 43. no. 4. p. e13333. doi: 10.1111/jfpe.13333

6 Kilincceker O., Yilmaz M.T. Physicochemical, technological and sensory properties of chicken meatballs processed with dietary fibers. Journal of Hellenic Veterinary Medical Society. 2019. vol. 70. no. 2. p. 1525–1532.

7 Liu X., Liu S., Xi H., Xu J., Deng D., Huang G. Effects of soluble dietary fiber on the crystallinity, pasting, rheological, and morphological properties of corn resistant starch. LWT – Food Science and Technology. 2019. vol. 111. p. 632–639.

8 Васильева В.В., Храмова В.Н., Шинкарева С.В. Разработка эмульсии для мясных изделий с применением продуктов глубокой переработки кукурузы // Научное обеспечение технологического развития и повышения конкурентоспособности в пищевой и перерабатывающей промышленности: сб. материалов 4-й Междунар. науч.-практ. конф. (Краснодар, 26–27 ноября 2024 г.). 2024. С. 156–159.

9 Жаринов А.И., Кузнецова О.В., Текутьева Л.А. Научно-практические основы процесса структурирования мясных систем // Мясная индустрия. 2022. № 6. С. 20–23. doi: 10.37861/2618-8252-2022-06-20-23.

10 Жаринов А.И. Пищевые волокна: состав, свойства, особенности технологического использования // Мясные технологии. 2018. Т. 189. № 9. С. 16–21.

11 Курчаева Е.Е., Попова Я.А. Использование пищевых волокон в составе пищевых систем на мясной основе // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2021. Т. 16. № 1. С. 36–46.

12 Намсараева З.М., Хамаганова И.В. Разработка рецептуры мясного полуфабриката с использованием топинамбура // Вестник ВСГУТУ. 2024. Т. 92. № 1. С. 34–42. doi: 10.53980/24131997_2024_1_34.

13 Речкина Е.А., Губаненко Г.А., Машанов А.И. Перспективы использования пищевых волокон в пищевом производстве // Вестник КрасГАУ. 2016. № 1. С. 91–97.

14 Ученые ВНИХИ подтвердили импортозамещающие свойства растворимых кукурузных волокон «НьюБио» в составе мороженого // Молочная промышленность. 2025. № 2. С. 85–86.

15 Хвыля С.И., Лапшин В.А., Корешков В.Н. Использование крахмала в мясной промышленности // Инновационные процессы в пищевых технологиях: наука и практика. 2019. С. 376–383.

16 Храмова В.Н., Васильева В.В., Княжеченко О.А., Стифанько М.Д. Разработка технологии полуфабрикатов из мяса птицы с использованием растворимых пищевых волокон // Устойчивое технологическое развитие аграрно-пищевых систем – гарантия продовольственной безопасности: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 19–20 июня 2025 г.) / под общ. ред. акад. РАН И.Ф. Горлова. Волгоград: ООО «СФЕРА», 2025. С. 305–309.

17 Шишкина Д.И., Соколов А.Ю., Бордунова М.С., Звегинцева Е.Д., Клейн Е.Э. Современные тенденции и перспективы развития функциональных продуктов на основе мяса с добавлением пищевых волокон // Инновации и инвестиции. 2021. № 4. С. 199–202.

18 Bader Ul Ain H., Saeed F., Ahmed A., Asif K.M., Niaz B., Tufail T. Improving the physicochemical properties of partially enhanced soluble dietary fiber through innovative techniques: A coherent review // Journal of Food Processing and Preservation. 2019. V. 43. № 4. e13917. doi: 10.1111/jfpp.13917.

19 Kilincceker O., Tahsin Y.M. Physicochemical, Technological and Sensory Properties of Chicken Meatballs Processed with Dietary Fibers // Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. 2019. V. 70. № 2. P. 1525–1532. doi: 10.12681/jhvms.20858.

20 Kilincceker O., Koluman A. Effects of different fibers on the quality of chicken meatballs // Archiv für Lebensmittellhygiene. 2018. V. 69. № 6. P. 177–183. doi: 10.2376/0003-925X-69-177.

References

1 Titov E.I., Sokolov A.Yu., Litvinova E.V., Shishkina D.I. Effect of dietary fibers on the functional and technological properties of meat systems. All About Meat. 2021. no. 4. pp. 30–36. doi: 10.21323/2071-2499-2021-4-30-36 (in Russian)

2 Pyreva E.A., Safronova A.I. The role and place of dietary fibers in the structure of nutrition of the population. Problems of Nutrition. 2019. vol. 88. no. 6. p. 5–11. doi: 10.24411/0042-8833-2019-10059. (in Russian)

3 Begunova A.V., Simonenko S.V., Simonenko E.S., Semenova E.S. New approaches to the use of dietary fibers in the development of specialized functional foods. Food Industry. 2024. no. 8. p. 149–153. doi: 10.52653/PPI.2024.8.8.029. (in Russian)

4 Slavin J.L., Korczak R. Definitions, regulations, and new frontiers for dietary fiber and whole grains. Nutrition Reviews. 2020. vol. 78. no. S1. p. 6–12. doi: 10.1093/nutrit/nuz061

5 Santhi D., Kalaikannan A., Natarajan A. Characteristics and composition of emulsion-based functional low-fat chicken meat balls fortified with dietary fiber sources. Journal of Food Process Engineering. 2020. vol. 43. no. 4. p. e13333. doi: 10.1111/jfpe.13333

6 Kilincceker O., Yilmaz M.T. Physicochemical, technological and sensory properties of chicken meatballs processed with dietary fibers. Journal of Hellenic Veterinary Medical Society. 2019. vol. 70. no. 2. p. 1525–1532.

7 Liu X., Liu S., Xi H., Xu J., Deng D., Huang G. Effects of soluble dietary fiber on the crystallinity, pasting, rheological, and morphological properties of corn resistant starch. LWT – Food Science and Technology. 2019. vol. 111. p. 632–639.

8 Vasilyeva V.V., Khramova V.N., Shinkareva S.V. Development of an emulsion for meat products using products of deep processing of corn. Scientific support for technological development and increasing competitiveness in the food and processing industry: collection of materials of the 4th International Scientific and Practical Conference (Krasnodar, November 26–27, 2024). 2024. pp. 156–159. (in Russian)

9 Zharinov A.I., Kuznetsova O.V., Tekuteva L.A. Scientific and practical foundations of the process of structuring meat systems. Meat Industry. 2022. no. 6. pp. 20–23. doi: 10.37861/2618-8252-2022-06-20-23 (in Russian)

10 Zharinov A.I. Dietary fiber: composition, properties, features of technological use. Meat Technologies. 2018. vol. 189. no. 9. pp. 16–21. (in Russian)

11 Kurchaeva E.E., Popova Ya.A. The use of dietary fiber in food systems based on meat. Technologies and Commodity Science of Agricultural Products. 2021. vol. 16. no. 1. pp. 36–46. (in Russian)

12 Namsaraeva Z.M., Khamaganova I.V. Development of a recipe for a meat semi-finished product using Jerusalem artichoke. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 92. no. 1. pp. 34–42. doi: 10.53980/24131997_2024_1_34 (in Russian)

13 Rechkina E.A., Gubanenko G.A., Mashanov A.I. Prospects for the use of dietary fiber in food production. Bulletin of KrasSAU. 2016. no. 1. pp. 91–97. (in Russian)

14 Scientists of VNIKhI confirmed the import-substituting properties of soluble corn fibers "NewBio" in ice cream composition. Dairy Industry. 2025. no. 2. pp. 85–86. (in Russian)

15 Khvilya S.I., Lapshin V.A., Koreshkov V.N. The use of starch in the meat industry. Innovative processes in food technologies: science and practice. 2019. pp. 376–383. (in Russian)

16 Khramova V.N., Vasilyeva V.V., Knyazhechenko O.A., Stifanko M.D. Development of technology for poultry meat semi-finished products using soluble dietary fibers. Sustainable technological development of agri-food systems – a guarantee of food security: materials of the International Scientific and Practical Conference (Volgograd, June 19–20, 2025) / under general ed. acad. RAS I.F. Gorlov. Volgograd: SPHERE LLC, 2025. pp. 305–309. (in Russian)

17 Shishkina D.I., Sokolov A.Yu., Bordunova M.S., Zvegintseva E.D., Klein E.E. Modern trends and prospects for the development of functional meat-based products with the addition of dietary fiber. Innovations and Investments. 2021. no. 4. pp. 199–202. (in Russian)

18 Bader Ul Ain H., Saeed F., Ahmed A., Asif K.M., Niaz B., Tufail T. Improving the physicochemical properties of partially enhanced soluble dietary fiber through innovative techniques: A coherent review. Journal of Food Processing and Preservation. 2019. vol. 43. no. 4. p. e13917. doi: 10.1111/jfpp.13917

19 Kilincceker O., Tahsin Y.M. Physicochemical, Technological and Sensory Properties of Chicken Meatballs Processed with Dietary Fibers. Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. 2019. vol. 70. no. 2. pp. 1525–1532. doi: 10.12681/jhvms.20858

20 Kilincceker O., Koluman A. Effects of different fibers on the quality of chicken meatballs. Archiv für Lebensmittellhygiene. 2018. vol. 69. no. 6. pp. 177–183. doi: 10.2376/0003-925X-69-177

Сведения об авторах

Валентина Н. Храмова д-р биол. наук, профессор, кафедра технологии пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, пр. им. В. И. Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Россия, hramova_vn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0062-3211

Вероника В. Васильева аспирант, кафедра технологии пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, пр. им. В. И. Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Россия, buzowa.veronika@ya.ru

Ольга А. Княжеченко к.б.н., младший научный сотрудник, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, ул. Рокоссовского, 6, г. Волгоград, 400131, Россия, knyazhechenko71@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-1508-2179

Кирилл А. Лубчинский аспирант, кафедра технологии пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, пр. им. В. И. Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Россия, lubkirill@mail.ru

Алексей В. Васильев магистрант, кафедра технологии пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, пр. им. В. И. Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Россия, tpp@vstu.ru

Information about authors

Valentina N. Khramova Dr. Sci. (Biolog.), professor, Department of Food Production Technology, Volgograd State Technical University, V. I. Lenin Ave., 28, Volgograd, 400005, Russia, hramova_vn@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0062-3211

Veronica V. Vasilyeva graduate student, Department of Food Production Technology, Volgograd State Technical University, V. I. Lenin Ave., 28, Volgograd, 400005, Russia, buzowa.veronika@ya.ru

Olga A. Knyazhechenko Cand. Sci. (Biolog.), junior research assistant, Volga Scientific Research Institute of Meat and Dairy Products Production and Processing, 6 Rokossovskiy St., Volgograd, 400131, Russia, knyazhechenko71@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-1508-2179

Kirill A. Lubchinsky graduate student, Department of Food Production Technology, Volgograd State Technical University, V. I. Lenin Ave., 28, Volgograd, 400005, Russia, lubkirill@mail.ru

Alexey V. Vasilyev Master's student, Department of Food Production Technology, Volgograd State Technical University, V. I. Lenin Ave., 28, Volgograd, 400005, Russia, tpp@vstu.ru

Вклад авторов

Валентина Н. Храмова концептуализация темы, предложила методику проведения экспериментов, принимала участие в производственных испытаниях, консультации в ходе исследования, редактировала и корректировала статью до подачи в редакцию
Вероника В. Васильева предложила методику проведения эксперимента, организовала и провела производственные испытания
Ольга А. Княжеченко обзор литературных источников по исследуемой проблеме, написала рукопись, несет ответственность за плагиат
Кирилл А. Лубчинский обзор литературных источников по исследуемой проблеме, проводил эксперименты, выполнил расчёты
Алексей В. Васильев обзор литературных источников по исследуемой проблеме, проводил эксперименты, выполнил расчёты

Contribution

Valentina N. Khramova conceptualized the topic, proposed a methodology for conducting experiments, participated in production tests, consulted during the research, edited and corrected the article before submitting it to the editorial board
Veronica V. Vasilyeva she proposed a methodology for conducting the experiment, organized and conducted production tests.
Olga A. Knyazhechenko eview of literary sources on the problem under study, wrote the manuscript, is responsible for plagiarism
Kirill A. Lubchinsky reviewed literature sources on the problem under study, conducted experiments, performed calculations
Alexey V. Vasilyev reviewed literature sources on the problem under study, conducted experiments, performed calculations

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 25/08/2025	**После редакции** 03/09/2025	**Принята в печать** 15/09/2025
Received 25/08/2025	**Accepted in revised** 03/09/2025	**Accepted** 15/09/2025

Химическая технология

Chemical Technology

DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-191-197 Оригинальная статья/Research article

УДК 691.327:66.065.5:577.112.6 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Изучение влияния режимных параметров механического вспенивания кератинового гидролизата с загустителем в технологии пенобетона

Семид. М. Арабов [1] ms.arabov@mail.ru 0009-0008-5051-4428
Владимир Я. Свинцов [1] vladimir_svintsov@mail.ru 0009-0000-0410-9626
Альберт Х.-Х. Нугманов [3] nugmanov@rgau-msha.ru 0000-0002-4093-9982
Игорь Ю. Алексанян [2] 16081960igor@gmail.com 0000-0001-5494-1226
Павел Д. Осмоловский [3] pavel.osmolovsku@mail.ru 0000-0003-1131-1552
Марина А. Марышева [2] vjyuvfhbyf@mail.ru 0000-0002-0046-6690

1 Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Татищева, 18, г. Астрахань, 414056, Россия
2 Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия
3 Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия

Аннотация. Современная концепция строительства жилых зданий нового поколения, ориентированная на энергоэффективность, экологическую безопасность, экономическую целесообразность и гибкость планировочных решений, формирует устойчивый спрос на легкие, прочные и долговечные теплоизоляционные материалы. В данном контексте пенобетон представляет значительный интерес, а его ключевым компонентом являются высокоэффективные пенообразова¬тели. Перспективным направлением признана разработка белковых пенообразователей на основе гидролизатов кератинсодержащего сырья, в частности отходов птицепереработки – перопухового сырья, что позволяет решить задачу утилизации вторичных ресурсов. Целью исследования являлась разработка ресурсосберегающей технологии получения сухого пенообразователя на основе кератинового гидролизата. В качестве альтернативы энергоемкому процессу вакуумно-радиационной сушки и дорогостоящему этапу предварительного концентрирования предложено использовать введение загустителя – гуаровой камеди – с последующей конвективной сушкой. Авторами научно обоснован и экспериментально подтвержден выбор гуаровой камеди в качестве рационального реологического модификатора. Установлено, что она формирует стабильный структурный каркас, эффективно препятствующий дренажу и коалесценции пузырьков, и демонстрирует синергизм с белковыми компонентами, обеспечивая высокую кинетическую устойчивость пены. В статье представлены результаты по определению рациональных параметров процесса вспенивания: скорость вращения венчика 1600 об/мин и продолжительность 180 секунд, что обеспечивает достижение максимальной кратности и стабильности пенной структуры. Установлено, что введение гуаровой камеди в концентрации 0,35…0,40 % позволяет получить пену с высокой устойчивостью (время полураспада 35…40 минут) и оптимальными структурно-механическими свойствами, пригодную для эффективного съема и последующей конвективной сушки. Проведенное сравнение с известными аналогами подтверждает адекватность и конкурентоспособность полученных результатов, что позволяет рекомендовать данную технологию для внедрения в производственную практику.

Ключевые слова: пенобетон, пенообразователь, кератиновый гидролизат, гуаровая камедь, механическое вспенивание, структурно-механические свойства.

Study of the effect of the regime parameters of mechanical foaming of keratin hydrolysate with a thickener in foam concrete technology

Semid M. Arabov [1] ms.arabov@mail.ru 0009-0008-5051-4428
Vladimir Y. Svintsov [1] vladimir_svintsov@mail.ru 0009-0000-0410-9626
Albert H.-H. Nugmanov [3] nugmanov@rgau-msha.ru 0000-0002-4093-9982
Igor Y. Aleksanyan [2] 16081960igor@gmail.com 0000-0001-5494-1226
Pavel D. Osmolovskiy [3] pavel.osmolovsku@mail.ru 0000-0003-1131-1552
Marina A. Marysheva [2] vjyuvfhbyf@mail.ru 0000-0002-0046-6690

1 Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, 18 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, Russia
2 Astrakhan State Technical University, 16/1 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, Russia
3 Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia,

Для цитирования

Арабов С.М., Свинцов В.Я., Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И.Ю., Осмоловский П.Д., Марышева М.А. Изучение влияния режимных параметров механического вспенивания кератинового гидролизата с загустителем в технологии пенобетона // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 191–197. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-191-197

For citation

Arabov S.M., Svintsov V.Ya., Nugmanov A.H.-H., Aleksanyan I.Yu., Osmolovskiy P.D., Marysheva M.A. Study of the effect of the regime parameters of mechanical foaming of keratin hydrolysate with a thickener in foam concrete technology. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 191–197. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-191-197

© 2025, Арабов С.М. и др. / Arabov S.M. et al.

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

Abstract. The modern concept of building new-generation residential buildings, focused on energy efficiency, environmental safety, economic feasibility and flexibility of planning solutions, creates a steady demand for lightweight, durable and durable thermal insulation materials. In this context, foam concrete is of considerable interest, and its key component is highly effective foaming agents. The development of protein foaming agents based on hydrolysates of keratin–containing raw materials, in particular, poultry processing waste - peropukhovy raw materials, which makes it possible to solve the problem of recycling secondary resources, is recognized as a promising direction. The aim of the study was to develop a resource-saving technology for producing a dry foaming agent based on keratin hydrolysate. As an alternative to the energy-intensive vacuum–radiation drying process and the expensive pre–concentration stage, it is proposed to use the introduction of a thickener, guar gum, followed by convective drying. The authors scientifically substantiated and experimentally confirmed the choice of guar gum as a rational rheological modifier. It has been found that it forms a stable structural framework that effectively prevents the drainage and coalescence of bubbles, and demonstrates synergy with protein components, providing high kinetic stability of the foam. The article presents the results of determining the rational parameters of the foaming process: the whisk rotation speed is 1600 rpm and the duration is 180 seconds, which ensures the maximum multiplicity and stability of the foam structure. It was found that the introduction of guar gum at a concentration of 0.35...0.40% makes it possible to obtain a foam with high stability (half-life of 35...40 minutes) and optimal structural and mechanical properties suitable for effective removal and subsequent convective drying. The comparison with known analogues confirms the adequacy and competitiveness of the results obtained, which makes it possible to recommend this technology for implementation in production practice.

Keywords: foam concrete, foaming agent, keratin hydrolysate, guar gum, mechanical foaming, structural and mechanical properties.

Введение

Современная строительная отрасль демонстрирует устойчивую тенденцию к применению энергоэффективных и экологичных материалов, среди которых пенобетоны занимают одно из ведущих мест. Ключевым компонентом, определяющим их структурные и теплофизические свойства, является пенообразователь [1–4]. В последние годы все большее внимание уделяется белковым пенообразователям, в частности, на основе гидролизатов кератинсодержащего сырья, таких как отходы птицепереработки. Использование данного вторичного сырья не только позволяет получить эффективный продукт, но и решает задачу ресурсосбережения [5, 6].

Важным этапом в технологии производства сухих пенообразователей является сушка пены. Для снижения энергозатрат перспективным является переход от вакуумной сушки к более экономичной атмосферной, в частности, конвективной. Однако успешная реализация этого процесса напрямую зависит от первоначальных характеристик пенной структуры [7, 8]. Формирование стабильной пенной системы с заданными реологическими и структурными параметрами представляет собой критически важный технологический передел, предшествующий процессу сушки. Именно такие характеристики пены, как дисперсность, однородность, устойчивость к дренажу и коалесценции, непосредственно детерминируют кинетику обезвоживания, эффективность съема с рабочих поверхностей и, в конечном счете, качество получаемого порошкообразного продукта [9, 10].

Для целенаправленного управления свойствами пены на стадии её формирования в состав кератинового гидролизата вводится загуститель, в качестве которого была научно обоснована гуаровая камедь. Ее добавление способствует созданию стабильного структурного каркаса. Однако конечные параметры пенной структуры являются функцией не только состава системы, но и режимов её механической обработки [11]. Интенсивность и продолжительность перемешивания непосредственно влияют на дисперсность воздушных пузырьков, кратность вспенивания и прочность межфазных пленок, что, в свою очередь, определяет технологическую пригодность пены для последующей сушки.

Таким образом, целью настоящего исследования являлось установление влияния режимных параметров процесса механического вспенивания (скорости вращения диспергирующего устройства и продолжительности процесса) кератинового гидролизата, модифицированного гуаровой камедью, на показатели пенообразования и стабильности пенной структуры. Определение оптимальных режимных параметров является необходимым условием для разработки эффективной и воспроизводимой технологии получения порошкообразного пенообразователя, пригодного для сушки в конвективных установках.

Материалы и методы

Объектами исследования послужил кератиновый гидролизат с добавкой гуаровой камеди, как загустителя. В качестве объекта исследования использовался готовый к применению жидкий кератиновый гидролизат. Образец был приобретен у коммерческого поставщика на платформе «Яндекс Маркет» в категории товаров для профессиональной косметики. Внешне продукт представляет собой прозрачную или слабо опалесцирующую жидкость от бесцветного до светло-соломенного оттенка, обладающую вязкостью, близкой к воде. Использование готовой жидкой формы исключило необходимость стадии предварительного растворения, что упростило его непосредственное внедрение в технологический процесс. Гуаровая камедь приобретена из того же источника электронной

коммерции, но в сегменте поставщиков пищевых и технических добавок. Исходный образец представлял собой мелкодисперсный порошок от белого до светло-кремового цвета.

Предварительные исследования, направленные на определение рациональной концентрации загустителя в гелеобразной протеиновой системе на основе ее вязкостных, структурно-механических свойств, а также визуальной оценке структуры получаемой пены и ее дисперсионного анализа, позволили выявить ее значение на уровне $C_{ГК}$ = 0,35…0,40 %. В связи с этим, для проведения дальнейших исследований, в частности влияния режимных параметров процесса механического вспенивания на получаемую пенную структуру, принимаем за рациональную концентрацию загустителя значение $C_{ГК}$, равное 0,35 ± 5 %. Далее для системного понимания влияния режимных параметров процесса механического вспенивания кератинового гидролизата при его температуре 20 ± 1 °С предлагается эксперимент с варьированием двух основных факторов: скорости вращения пеновзбивателя (ω) и продолжительности вспенивания (τ). Изучаемый диапазон варьирования основных параметров представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Варьируемые параметры при исследовании процесса механического вспенивания

Table 1.

Variable parameters in the study of the process of mechanical foaming

Варьируемый параметр Variable parameter	Изучаемый диапазон Range under study
ω, об/мин	400…1700
τ, с	30…180

Экспериментальное исследование влияния режимных параметров процесса механического вспенивания проводили посредством ручного миксера марки «Viatto VA-HM265WH» с использованием венчика, в качестве взбивального органа, который прилагался к данному виду техники. На первом этапе экспериментальных исследований варьировали скорость вращения венчика при заданной максимальной продолжительности процесса, равной 180 с. На втором этапе исследований уменьшали время механического воздействия на гидролизат при рациональной скорости вращения венчика, выявленной на первом этапе.

Оценка пенообразующей способности и устойчивости пены необходима для обоснования выбора рациональной концентрации загустителя, поскольку позволяет количественно охарактеризовать функциональные свойства формируемой пенной системы. Экспериментальное определение таких параметров, как кратность пены (K), объем дренажа ($V_{др}$) и время ее полураспада ($t1/2$), предоставляет интегральные критерии стабильности, непосредственно связанные с прочностью структурного каркаса пены [12, 13].

Определение К по отношению к исследуемому гидролизату с добавлением гуаровой камеди при ее различной концентрации находили из следующего соотношения [14]:

$$K = \frac{V_{пен}}{V_{нач}}. \quad (1)$$

Величину объема взбитой протеиновой системы ($V_{пен}$) при исходном ее объеме в 100 мл ($V_{нач}$) находили расчетным путем через плотностные показатели получаемой пены и гидролизата ($\rho_{пен}$, $\rho_{гидр}$), которые и определяли экспериментальным путем, при пятикратной повторности опытов, с помощью мерного цилиндра с градуировкой.

Результаты и обсуждение

Результаты проведенного исследования по варьированию скорости вращения венчика при заданной продолжительности процесса вспенивания кератинового гидролизата представлены в таблице 2, а в таблице 3 – результаты по варьированию продолжительности процесса вспенивания при заданной скорости вращения венчика.

Таблица 2.

Результаты исследования по варьированию скорости вращения венчика при заданной продолжительности процесса вспенивания кератинового гидролизата

Table 2.

The results of a study on the variation of the whisk rotation speed for a given duration of the keratin hydrolysate foaming process

ω, об/мин ω, rpm	$C_{ГК}$, %	τ, с τ, sec	K	$\tau 1/2$, мин $\tau 1/2$, min
400	0,35	180	3,2	18…20
600			3,4	18…20
800			4,3	20…23
1000			5,2	20…23
1200			6,5	25…30
1400			6,7	30…35
1600			7,1	35…40
1700			6,9	35…40

Анализ данных, представленных в таблице 2 позволяет выявить четкие закономерности влияния скорости вращения (ω) на ключевые параметры процесса вспенивания – кратность вспенивания (K) и стабильность пены, характеризуемую временем её полураспада ($\tau 1/2$). При фиксированных параметрах ($C_{гк}$ = 0,35% и τ = 180 с) наблюдается прямая зависимость K от ω в диапазоне от 400 до 1600 об/мин. Так, при ω, равным 400 об/мин значение K составляет 3,2,

и оно монотонно возрастает по мере увеличения скорости, достигая своего максимального значения 7,1 именно при 1600 об/мин. Этот рост объясняется увеличением энергии сдвига, передаваемой системе, что приводит к более интенсивному диспергированию газа и формированию большего объема пены. Однако дальнейшее увеличение ω до 1700 об/мин приводит к снижению K до 6,9. Это свидетельствует о достижении оптимума, за которым, вероятно, начинается процесс дестабилизации и коалесценции пузырьков из-за чрезмерно высоких механических нагрузок.

Аналогичная, но еще более выраженная тенденция прослеживается в изменении стабильности пены. Время полураспада ($\tau 1/2$) увеличивается с ростом ω: от 18…20 минут при 400 об/мин до 35…40 минут при 1600 об/мин. Это связано с формированием более мелкой и однородной структуры пены при высоких скоростях, что замедляет процессы дренажа и коалесценции. Важно отметить, что даже при скорости 1700 об/мин, когда K несколько падает, высокая стабильность пены (35…40 минут) сохраняется, что указывает на формирование прочной пленки, устойчивой к разрушению.

Таким образом, на основании проведенного анализа рациональной скоростью вращения венчика является 1600 об/мин. Этот режим обеспечивает синергетический эффект: одновременно достигается максимальный объем пены ($K = 7{,}1$) и высокая стабильность ($\tau 1/2 = 35$–40 мин). Использование скоростей ниже 1600 об/мин не позволяет в полной мере реализовать пенообразующий потенциал кератинового гидролизата, в то время как превышение этого порога (1700 об/мин) хотя и не критично, но уже нецелесообразно, так как ведет к снижению основного целевого показателя – K, без существенного выигрыша в стабильности. Следовательно, скорость 1600 об/мин является рациональной для данного процесса.

Таблица 3.

Результаты исследования по варьированию продолжительности процесса вспенивания при заданной скорости вращения венчика

Table 3.

The results of the study on varying the duration of the foaming process at a given speed of rotation of the whisk

τ, с τ, sec	$C_{ГК}$, %	ω, об/мин ω, rpm	K	$\tau 1/2$, мин $\tau 1/2$, min
30	0,35	1600	5,2	25…30
50			5,4	25…30
70			5,9	30…35
90			6,4	30…35
110			6,3	30…35
130			6,5	35…40
150			7,1	35…40
180			7,1	35…40

Анализ данных, представленных в таблице 3 позволяет оценить влияние продолжительности обработки (τ) на эффективность вспенивания кератинового гидролизата и обосновать выбор рациональной продолжительности процесса. При фиксированных концентрации гидролизата ($C_{гк} = 0{,}35\%$) и скорости вращения ($\omega = 1600$ об/мин) наблюдается закономерный рост коэффициента вспенивания при увеличении продолжительности процесса от 30 до 130 секунд. На начальном этапе (от 30 до 90 секунд) наблюдается интенсивный рост показателя K с 5,2 до 6,4, что объясняется постепенным насыщением системы воздухом и формированием пенной структуры. Однако, начиная с 110 секунд, рост коэффициента вспенивания резко замедляется, достигая плато величиной 7,1 на отметках 150 и 180 секунд. Это свидетельствует о том, что к 150 секундам процесс формирования пенного объема достигает своего максимума, и его дальнейшее продолжение не приводит к увеличению выхода продукта. Анализ стабильности пены, характеризуемой временем полураспада ($\tau 1/2$), показывает аналогичную динамику. Значение времени полураспада прогрессивно увеличивается с 25…30 минут (при 30 с) до 35…40 минут при 130 секундах и далее сохраняется на этом уровне при 150 и 180 секундах. Это указывает на то, что для формирования не только объемной, но и структурно-устойчивой пены с максимальной стабильностью достаточно 130…150 секунд обработки.

Таким образом, с чисто технологической точки зрения, рациональной продолжительностью процесса является 150 секунд, поскольку именно при этом времени достигаются максимальные значения как коэффициента вспенивания ($K = 7{,}1$), так и стабильности пены ($\tau 1/2 = 35$–40 мин), и дальнейшее увеличение длительности процесса не дает никакого положительного эффекта. Однако, с учетом применяемого в строительстве оборудования (строительные миксеры и растворосмесители) цикл работы которых часто стандартизирован и ориентирован на округленные временные интервалы, рационально принять продолжительность, равную 180 секундам (3 мин).

Такое округление обусловлено следующими практическими соображениями: унификация технологического процесса; создание технологического запаса и отсутствие отрицательного эффекта:

– введение процесса в стандартный трехминутный цикл упрощает его интеграцию в существующие технологические цепочки и облегчает контроль для оператора;

– увеличение времени с 150 до 180 секунд создает незначительный запас по длительности процесса, который компенсирует возможные колебания в работе оборудования или свойств сырья, гарантируя стабильное достижение целевых параметров пены в каждой партии;

– продолжение процесса с 150 до 180 секунд не приводит к ухудшению ключевых характеристик пены (объема и стабильности), что делает это округление технологически безопасным.

Таким образом, на основании проведенного исследования влияния режимных параметров процесса механического вспенивания и анализа полученных экспериментальных данных в качестве рациональных режимных параметров процесса механического вспенивания кератиного гидролизата принимаются: $C_{гк}$ =0,35%; ω = 1600 об/мин и τ = 3 мин. Данное решение является компромиссом, обеспечивающим как достижение максимальных технологических показателей, так и практическую целесообразность при внедрении процесса механического вспенивания в реальных условиях строительного производства.

Заключение

Научно обоснован и экспериментально подтвержден выбор гуаровой камеди в качестве рационального загустителя для кератинового гидролизата. Установлено, что она формирует стабильный структурный каркас, эффективно препятствующий дренажу и коалесценции пузырьков, и демонстрирует синергизм с белковыми компонентами, обеспечивая высокую кинетическую устойчивость пены.

Установлены рациональные режимные параметры механического вспенивания: скорость вращения венчика 1600 об/мин и продолжительность процесса 180 секунд (3 минуты). Данный режим обеспечивает достижение максимальных показателей пенообразования и стабильности пенной структуры, а также технологичен для интеграции в реальные производственные циклы.

Сравнение представленных результатов с известными для подобных материалов данными показывает их адекватность без противоречий и, поэтому их можно успешно применять в инженерной практике пищевой индустрии.

Литература

1 Жеблиенок Н.Н., Малинина С.В. Некоторые аспекты развития концепции «нового города» в теории отечественного градостроительства // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 3. С. 132–141.

2 Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Управление технологическими процессами для обеспечения качества пенобетона неавтоклавного твердения. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. 156 с.

3 Прошин А.П., Береговой В.А., Краснощеков А.А., Береговой А.М. Пенобетон: состав, свойства, применение. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2003. 162 с.

4 Брескин К.А., Розанова Е.Н., Жмыхов В.М. Изучение пенообразующих свойств белковых пенообразователей на основе гидролизатов кератинсодержащего сырья, полученных с использованием гидроксида натрия // Auditorium. 2022. № 4 (36). С. 1–6.

5 Остроухов Е.Н., Бухта В.С., Усманов Р.З. Использование теплоизоляционного пенобетона в строительстве и влияние различных видов пенообразователей на его свойства // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных. 2022. С. 340–343.

6 Бурак Л.Ч. Традиционные и инновационные технологии переработки фруктов и овощей. Обзор предметного поля // The Scientific Heritage. 2025. № 153. С. 64–77.

7 Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. Москва: Высшая школа, 1985. 544 с.

8 Дяченко Н.П., Као Тхи Хуе, Дяченко Э.П., Максименко Ю.А. Исследование интенсивности конвективной пеносушки желатинового бульона из отходов переработки рыб частиковых пород // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2019. № 1. С. 136–144.

9 Буйнов А.А. Системный подход к исследованию процессов сушки жидких пищевых продуктов во вспененном состоянии // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 1997. № 2–3. С. 62–64.

10 Тарасов А.В., Заворохина Н.В., Чугунова О.В., Вяткин А.В. Корреляция пенообразующих свойств напитков на растительной основе с физико-химическим составом // Пищевые системы. 2025. Т. 8. № 2. С. 306–312.

11 Смагина А.Р., Дудина Е.И. Изучение свойств пенообразователей для производства теплоизоляционных керамических материалов // Образование. Наука. Производство. 2021. С. 1613–1616.

12 Камлюк А.Н. Подходы к расчету кратности, дисперсности и устойчивости воздушно-механических пен низкой кратности // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2025. Т. 9. № 1. С. 54–65.

13 Камлюк А.Н., Лихоманов А.О., Говор Э.Г. Зависимость объёмной устойчивости низкократных пен от их кратности // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2024. Т. 69. № 3. С. 194–205.

14 Breskin K.A., Rozanova E.N., Zhmykhov V.M. A Study of the Foam Stability Kinetics of Protein Blowing Agents Based on Solid Keratin Hydrolysates Synthesized with a Mixture of Sodium and Calcium Hydroxide and Individually // Engineering Proceedings. 2023. V. 56. № 1. P. 64.

15 Zhang X., Zhang X., Shi C. et al. Development and Performance Study of Composite Protein Foaming Agent Based on Human Hair Residue // Sustainability. 2024. V. 16. № 15. P. 6608.

16 Shi G., Hou A., Wang Y. et al. Eco-friendly foam dyeing of cellulose fibres using keratin biomacromolecules extracted from waste rabbit hair // International Journal of Biological Macromolecules. 2025. V. 271. P. 144075.

17 Akmalaiuly K., Skripkunas G., Kadyrova A. Development of technology for foaming keratin based on sheep's wool // Architecture and Civil Engineering. 2024. V. 1. № 4. P. 27–32.

18 Zhang X., Zhang X., Shi C. et al. Fabrication of hydrolyzed keratin-modified rigid polyurethane foams and its thermal stability and combustion performance // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. 2023. V. 28. № 7. P. 662–683.

19 Zhang X., Zhang X., Shi C. et al. Fabrication of flame-retardant and smoke-suppressant rigid polyurethane foam modified by hydrolyzed keratin // International Polymer Processing. 2023. V. 38. № 2. P. 257–266.

20 Gul V.E. Structure and Properties of Conducting Polymer Composites. Boca Raton: CRC Press, 2023.

21 Bachchan A.A., Das P.P., Chaudhary V. Effect of moisture absorption on the properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review // Materials Today: Proceedings. 2022. V. 49. P. 3403–3408.

22 Kumar R., Singh R., Sharma P. et al. Effect of physical characteristics and hydrodynamic conditions on transport and deposition of microplastics in riverine ecosystem // Water. 2021. V. 13. № 19. P. 2710.

References

1 Zheblienok N.N., Malinina S.V. Some aspects of the development of the "new city" concept in the theory of domestic urban planning. Academia. Architecture and Construction. 2022. no. 3. pp. 132–141. (in Russian)

2 Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Management of technological processes to ensure the quality of non-autoclaved aerated concrete. Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2021. 156 p. (in Russian)

3 Proshin A.P., Beregovoy V.A., Krasnoshchekov A.A., Beregovoy A.M. Aerated concrete: composition, properties, application. Penza: Penza State University of Architecture and Construction Publishing House, 2003. 162 p. (in Russian)

4 Breskin K.A., Rozanova E.N., Zhmykhov V.M. Study of foaming properties of protein blowing agents based on hydrolysates of keratin-containing raw materials obtained using sodium hydroxide. Auditorium. 2022. no. 4 (36). pp. 1–6. (in Russian)

5 Ostroukhov E.N., Bukhta V.S., Usmanov R.Z. The use of thermal insulation aerated concrete in construction and the influence of various types of blowing agents on its properties. Fundamental and Applied Research of Young Scientists. 2022. pp. 340–343. (in Russian)

6 Burak L.Ch. Traditional and innovative technologies for processing fruits and vegetables. Review of the subject field. The Scientific Heritage. 2025. no. 153. pp. 64–77. (in Russian)

7 Tikhomirov V.K. Foams. Theory and practice of their production and destruction. Moscow: Vysshaya Shkola, 1985. 544 p. (in Russian)

8 Dyachenko N.P., Cao Thi Hue, Dyachenko E.P., Maksimenko Yu.A. Study of the intensity of convective foam drying of gelatin broth from waste from the processing of bony fish. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. 2019. no. 1. pp. 136–144. (in Russian)

9 Buynov A.A. A systematic approach to the study of drying processes for liquid food products in a foamed state. Proceedings of Higher Educational Institutions. Food Technology. 1997. no. 2–3. pp. 62–64. (in Russian)

10 Tarasov A.V., Zavorokhina N.V., Chugunova O.V., Vyatkin A.V. Correlation of foaming properties of plant-based beverages with physico-chemical composition. Food Systems. 2025. vol. 8. no. 2. pp. 306–312. (in Russian)

11 Smagina A.R., Dudina E.I. Study of the properties of blowing agents for the production of thermal insulation ceramic materials. Education. Science. Production. 2021. pp. 1613–1616. (in Russian)

12 Kamlyuk A.N. Approaches to calculating the expansion ratio, dispersion and stability of low-expansion air-mechanical foams. Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. 2025. vol. 9. no. 1. pp. 54–65. (in Russian)

13 Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G. Dependence of volumetric stability of low-expansion foams on their expansion ratio. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences. 2024. vol. 69. no. 3. pp. 194–205. (in Russian)

14 Breskin K.A., Rozanova E.N., Zhmykhov V.M. A Study of the Foam Stability Kinetics of Protein Blowing Agents Based on Solid Keratin Hydrolysates Synthesized with a Mixture of Sodium and Calcium Hydroxide and Individually. Engineering Proceedings. 2023. vol. 56. no. 1. p. 64.

15 Zhang X., Zhang X., Shi C., Zhang Z. Development and Performance Study of Composite Protein Foaming Agent Based on Human Hair Residue. Sustainability. 2024. vol. 16. no. 15. p. 6608.

16 Shi G., Hou A., Wang Y., Zhao S., Li X., Chen G., Zhang F. Eco-friendly foam dyeing of cellulose fibres using keratin biomacromolecules extracted from waste rabbit hair. International Journal of Biological Macromolecules. 2025. vol. 271. p. 144075.

17 Akmalaiuly K., Skripkunas G., Kadyrova A. Development of technology for foaming keratin based on sheep's wool. Architecture and Civil Engineering. 2024. vol. 1. no. 4. pp. 27–32.

18 Zhang X., Zhang X., Zhang Z., Shi C., Sun T. Fabrication of hydrolyzed keratin-modified rigid polyurethane foams and its thermal stability and combustion performance. International Journal of Polymer Analysis and Characterization. 2023. vol. 28. no. 7. pp. 662–683.

19 Zhang X., Zhang X., Shi C., Zhang Z., Sun T. Fabrication of flame-retardant and smoke-suppressant rigid polyurethane foam modified by hydrolyzed keratin. International Polymer Processing. 2023. vol. 38. no. 2. pp. 257–266.

20 Gul V.E. Structure and Properties of Conducting Polymer Composites. Boca Raton: CRC Press, 2023.

21 Bachchan A.A., Das P.P., Chaudhary V. Effect of moisture absorption on the properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review. Materials Today: Proceedings. 2022. vol. 49. pp. 3403–3408.

22 Kumar R., Singh R., Sharma P. et al. Effect of physical characteristics and hydrodynamic conditions on transport and deposition of microplastics in riverine ecosystem. Water. 2021. vol. 13. no. 19. p. 2710.

Сведения об авторах

Семид. М. Арабов аспирант, кафедра инженерных систем и экологии, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Татищева, 18, г. Астрахань, 414056, Россия, ms.arabov@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-5051-4428

Владимир Я. Свинцов д.т.н., профессор, кафедра инженерных систем и экологии, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Татищева, 18, г. Астрахань, 414056, Россия, vladimir_svintsov@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-0410-9626

Альберт Х.-Х. Нугманов д.т.н., профессор, профессор, кафедра технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, nugmanov@rgau-msha.ru
https://orcid.org/0000-0002-4093-9982

Игорь Ю. Алексанян д.т.н., профессор, профессор, кафедра технологических машин, Астраханский государственный технический университет, , ул. Татищева, 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, 16081960igor@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-5494-1226

Павел Д. Осмоловский к.с.-х.н., доцент, кафедра технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, pavel.osmolovsku@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1131-1552

Марина А. Марышева к.т.н., доцент, кафедра технологических машин, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, 16-1, г. Астрахань, 414056, Россия, vjyuvfhbyf@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0046-6690

Information about authors

Semid M. Arabov postgraduate student, department of engineering systems and ecology, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Tatishcheva St., 18, Astrakhan, 414056, Russia, ms.arabov@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-5051-4428

Vladimir Y. Svintsov Dr. Sci. (Engin.), professor, department of engineering systems and ecology, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Tatishcheva St., 18, Astrakhan, 414056, Russia, vladimir_svintsov@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-0410-9626

Albert H.-H. Nugmanov Dr. Sci. (Engin.), professor, professor, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, nugmanov@rgau-msha.ru
https://orcid.org/0000-0002-4093-9982

Igor Y. Aleksanyan Dr. Sci. (Engin.), professor, professor, department of technological machine, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva str., 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, 16081960igor@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-5494-1226

Pavel D. Osmolovskiy Cand. Sci. (Agric.), associate professor, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, pavel.osmolovsku@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1131-1552

Marina A. Marysheva Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of technological machine, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva str., 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, vjyuvfhbyf@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0046-6690

Вклад авторов

Семид. М. Арабов проведение экспериментальных исследований и обработка полученных данных
Владимир Я. Свинцов общее руководство исследовательской работы
Альберт Х.-Х. Нугманов статистическая обработка результатов исследования и их оценка
Игорь Ю. Алексанян общее руководство исследовательской работы
Павел Д. Осмоловский проверка полученных экспериментальных исследований и подготовка рукописи к публикации
Марина А. Марышева систематизация информации полученной при анализе литературных источников

Contribution

Semid M. Arabov conducting experimental studies and processing the data obtained
Vladimir Y. Svintsov general guidance of the research work
Albert H.-H. Nugmanov statistical processing of research results and their evaluation
Igor Y. Aleksanyan general guidance of the research work
Pavel D. Osmolovskiy verification of the experimental studies obtained and preparation of the manuscript for publication
Marina A. Marysheva Systematization of information obtained by analyzing literary sources

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/07/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 03/09/2025
Received 01/07/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 03/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-198-206 Оригинальная статья/Research article
УДК 51-76 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Обоснование эффективности ингаляционного препарата с пролонгированным высвобождением изониазида методами моделирования фармакокинетики и фармакодинамики

Лариса А. Щербакова [1] shcherbakova.l.a@muctr.ru 0009-0006-4437-2430
Екатерина А. Петрикова [1] 190197@muctr.ru 0009-0008-4428-7927
Руслан Р. Сафаров [2] safarov.r.r@muctr.ru 0000-0002-0342-0049
Мария Г. Гордиенко [1] gordienko@muctr.ru 0000-0002-8485-9861

1 Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия
2 ООО ТД "ХИММЕД", Каширское шоссе, д. 3, к. 2, стр. 4/9, Москва, 115230, Россия

Аннотация. Оптимизация противотуберкулезной терапии остается одной из актуальных задач современной медицины. Ингаляционная доставка антибиотиков может способствовать повышению эффективности лечения туберкулеза, поскольку обеспечивает достижение высоких локальных концентраций препарата в легких и снижает риск системных побочных эффектов. Цель исследования – обосновать эффективность ингаляционного противотуберкулезного препарата с пролонгированным высвобождением изониазида методами моделирования фармакокинетики и фармакодинамики. Для описания фармакокинетики были построены многокамерные фармакокинетические модели для перорального и ингаляционного введения изониазида. Параметры модели для пероральной доставки были определены на основании опубликованных данных клинических исследований. Скорость абсорбции для ингаляционной формы была определена по экспериментальным данным проницаемости изониазида через мембрану в системе *in vitro*. Фармакодинамическая модель учитывала рост и гибель внеклеточной популяции *Mycobacterium tuberculosis* в зависимости от концентрации препарата. Совмещенное фармакокинетико-фармакодинамическое моделирование показало, что ингаляционная доставка препарата обеспечивает более высокую локальную экспозицию в эпителиальной легочной жидкости при низких концентрациях в плазме и способствует более эффективному подавлению бактериальной популяции, чем пероральный путь. Для дозы 300 мг за двое суток ранняя бактерицидная активность составила (РБА): РБА = 0,568 $\log_{10}$КОЕ/мл/сут (пероральное введение); РБА= 0,677 $\log_{10}$КОЕ/мл/сут (ингаляционное введение, респирабельная фракция (РФ) = 0,6); РБА= 0,688 $\log_{10}$КОЕ/мл/сут (ингаляционное введение, РФ = 1). Общая экспозиция препарата в эпителиальной легочной жидкости (AUC) за 48 часов составила: AUC = 15,31 мг·ч/л (пероральное введение); AUC = 29,06 мг·ч/л (ингаляционное введение, РФ = 0,6); AUC = 48,44 мг·ч/л (ингаляционное введение, РФ = 1). Расчет динамики внеклеточной бактериальной популяции при ингаляционном введении изониазида (15 – 450 мг) позволил определить, что при дозировке 50 – 100 мг изониазида 1 раз в сутки (РФ = 0,6), достигаются значения ранней бактерицидной активности близкие к максимальным. Математическое моделирование подтверждает преимущества ингаляционного пути и служит эффективным инструментом для обоснования доз и разработки ингаляционных лекарственных форм.

Ключевые слова: математическое моделирование, многокамерная модель, фармакокинетика, фармакодинамика, туберкулез, изониазид, ингаляционная доставка.

Evidence for the Efficacy of a Sustained-Release Inhaled Isoniazid Formulation via Pharmacokinetic/Pharmacodynamic Modeling

Larisa A. Shcherbakova [1] shcherbakova.l.a@muctr.ru 0009-0006-4437-2430
Ekaterina A. Petrikova [1] 190197@muctr.ru 0009-0008-4428-7927
Ruslan R. Safarov [2] safarov.r.r@muctr.ru 0000-0002-0342-0049
Maria G. Gordienko [1] gordienko@muctr.ru 0000-0002-8485-9861

1 D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya square, No. 9, B.33, Moscow, 125047, Russia
2 OOO TD "KHIMMED", Kashirskoe shosse, 3, bldg. 2, building 4/9, Moscow, 115230, Russia

Abstract. Optimization of tuberculosis therapy remains one of the urgent tasks of modern medicine. Pulmonary delivery of antibiotics can improve the effectiveness of tuberculosis treatment, as it ensures high local drug concentrations in the lungs and reduces the risk of systemic side effects. The aim of the study was to substantiate the effectiveness of an inhaled anti-tuberculosis formulation with sustained release of isoniazid using pharmacokinetic and pharmacodynamic modeling. To describe pharmacokinetics, multi-compartment pharmacokinetic models were constructed for oral and pulmonary delivery of isoniazid. Model parameters for oral delivery were determined based on published clinical trial data. The absorption rate for the pulmonary formulation was determined from experimental data on isoniazid permeability through a membrane in an *in vitro* system. The pharmacodynamic model considered the growth and death of the extracellular population of *Mycobacterium tuberculosis* depending on drug concentration. Combined pharmacokinetic–pharmacodynamic modeling showed that pulmonary delivery of the drug provides higher local exposure in the epithelial lining fluid at lower plasma concentrations and contributes to more effective suppression of the bacterial population than oral delivery. For a dose of 300 mg over two days, early bactericidal activity (EBA) was: EBA = 0,568 $\log_{10}$ CFU/mL/day (oral delivery); EBA = 0,677 $\log_{10}$ CFU/mL/day (pulmonary delivery, respirable fraction (RF) = 0,6); EBA = 0,688 $\log_{10}$ CFU/mL/day (pulmonary delivery, RF = 1). Total drug exposure in epithelial lining fluid (AUC) over 48 hours was: AUC = 15,31 mg·h/L (oral delivery); AUC = 29,06 mg·h/L (pulmonary delivery, RF = 0,6); AUC = 48,44 mg·h/L (pulmonary delivery, RF = 1). Calculation of extracellular bacterial population dynamics under pulmonary delivery of isoniazid (15 – 450 mg) showed that a daily dose of 50 – 100 mg (RF = 0,6) achieves early bactericidal activity values close to the maximum. Mathematical modeling confirms the advantages of the pulmonary route and serves as an effective tool for dose justification and the development of pulmonary drug formulations.

Keywords: mathematical modeling; multicompartment model; pharmacokinetics; pharmacodynamics; tuberculosis; isoniazid; pulmonary delivery.

Для цитирования
Щербакова Л.А., Петрикова Е.А., Сафаров Р.Р., Гордиенко М.Г. Обоснование эффективности ингаляционного препарата с пролонгированным высвобождением изониазида методами моделирования фармакокинетики и фармакодинамики // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 198–206. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-198-206

For citation
Shcherbakova L.A., Petrikova E.A., Safarov R.R., Gordienko M.G. Evidence for the Efficacy of a Sustained-Release Inhaled Isoniazid Formulation via Pharmacokinetic/Pharmacodynamic Modeling. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 198–206. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-198-206

© 2025, Щербакова Л.А. и др. / Shcherbakova L.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Туберкулез остается одной из наиболее серьезных проблем общественного здравоохранения и занимает ведущее место среди инфекционных заболеваний с высокой смертностью во всем мире. По данным Всемирной организации здравоохранения, в 2021 году было зарегистрировано 10,4 млн случаев заболевания туберкулезом, в 2022 году – 10,7 млн, а в 2023 году – 10,8 млн, что указывает на стабильно высокий уровень заболеваемости и требует совершенствования методов терапии [2].

В настоящее время лечение туберкулеза основано на комбинированной терапии. Стандартные схемы предполагают ежедневное применение противотуберкулезных препаратов в течение шести и более месяцев. Интенсивная начальная фаза терапии (около двух месяцев) обычно включает четыре препарата: изониазид, рифампицин, пиразинамид и либо стрептомицин, либо этамбутол [3]. Фаза продолжения длится 4–6 месяцев и предусматривает комбинацию изониазида с рифампицином. При этом поиск и оптимизация режимов монотерапии представляют особый интерес, поскольку это позволяет оценить вклад отдельных препаратов и может способствовать повышению эффективности комбинированных схем противотуберкулезного лечения.

Основными путями введения препаратов являются пероральный и парентеральный. Однако в последние годы все большее внимание уделяется ингаляционному пути, поскольку он обеспечивает быстрое поступление лекарственного вещества в легкие, позволяет обойти эффект первого прохождения через печень и снижает риск развития системных побочных эффектов [4–6].

Среди современных противотуберкулезных препаратов первого ряда изониазид отличается самой низкой минимальной ингибирующей концентрацией (0,02–0,05 мг/л) и высокой ранней бактерицидной активностью в отношении быстрорастущих штаммов *Mycobacterium tuberculosis* [7]. Благодаря этим свойствам изониазид широко применяется в стандартных схемах лечения и используется в составе разрабатываемых ингаляционных лекарственных форм [8–13].

Ключевым фактором успешного лечения туберкулеза является оптимальный режим дозирования. В настоящее время расчет доз для ингаляционных форм основан на данных о пероральном введении и концентрации препарата в плазме, что не учитывает особенностей распределения вещества в легочной ткани [14]. Неинвазивные методы прямого мониторинга концентрации препарата в легких отсутствуют. В совокупности это приводит к неоптимальному выбору дозы: недостаточная концентрация снижает эффективность терапии, а избыточная – увеличивает риск токсических побочных эффектов.

Для преодоления указанных ограничений применяется математическое моделирование [15]. Широкое распространение получили многокамерные фармакокинетические модели, характеризующиеся высокой воспроизводимостью, гибкостью и простотой адаптации под конкретные экспериментальные данные. В ряде исследований [16–20] они успешно применялись для оптимизации дозировок пероральных форм. Однако моделирование фармакокинетики и фармакодинамики ингаляционных препаратов до сих пор остается недостаточно изученным.

Цель исследования – обосновать эффективность ингаляционного противотуберкулезного препарата с пролонгированным высвобождением изониазида методами моделирования фармакокинетики и фармакодинамики.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи использованы методы математического моделирования на основе численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений с применением языка *Python* и библиотеки *solve_ivp (SciPy)*. В работе использованы многокамерные фармакокинетические модели для описания распределения изониазида в плазме, эпителиальной легочной жидкости и клетках легких. Для оценки эффективности терапии рассчитывались показатели ранней бактерицидной активности (РБА) и общая экспозиция препарата (AUC). В качестве объекта моделирования использовалась разработанная пролонгированная форма изониазида, предназначенная для ингаляционного введения с помощью дозированного порошкового ингалятора [21–23].

1.1 Камерная модель фармакокинетики для перорального введения и идентификация ее параметров

Для математического описания фармакокинетики изониазида использована многокамерная модель из работы Lalande [1]. На первом этапе проведена параметризация для перорального пути введения, поскольку доступны соответствующие экспериментальные данные [24]. Модель включает четыре компартмента: абсорбционный (желудочно-кишечный тракт), плазма крови, эпителиальная легочная жидкость (ЛЖ) и клетки легких (КЛ). Из абсорбционного компартмента препарат поступает в системный кровоток и далее распределяется в ЛЖ и КЛ; элиминация осуществляется из камеры плазмы.

Таким образом, модель отражает ключевые фармакокинетические процессы: абсорбцию, распределение между тканями и элиминацию. Структура модели представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Структура многокамерной ФК-модели, учитывающая пероральное введение препарата

Figure 1. Structure of the multicompartment PK model accounting for oral drug administration

ФК-модель, учитывающая пероральное введение препарата, описывается с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1–4):

$$\frac{dX_a}{dt} = -k_a X_a, \quad (1)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = k_a X_a - k_e X_1 - k_{12} X_1 + k_{21} X_2, \quad (2)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = k_{12} X_1 - k_{21} X_2 - k_{23} X_2 + k_{32} X_3, \quad (3)$$

$$\frac{dX_3}{dt} = k_{23} X_2 - k_{32} X_3, \quad (4)$$

где X_a, X_1, X_2, X_3 – количество изониазида в камере десорбции, плазме, эпителиальной легочной жидкости и клетках легких соответственно (мг); k_a – константа скорости абсорбции (ч$^{-1}$); k_{el} – константа скорости элиминации; k_{12}, k_{23}, k_{21} и k_{32} – константы скоростей перераспределения изониазида между компартментами (ч$^{-1}$).

На основании анализа опубликованных данных обоснованы следующие диапазоны констант: k_a = 0,34 – 5,08 ч$^{-1}$ [25]; k_{el} = 0,13 – 4,35 ч$^{-1}$; k_{12} = 1 – 20 ч$^{-1}$; k_{21} = 1 – 20 ч$^{-1}$ [1].

Определение параметров модели проводили по опубликованным данным клинических исследований (рисунок 2) [24]: у группы пациентов после перорального приема 300 мг изониазида измеряли концентрацию препарата в плазме и клетках легких в разные моменты времени. Высокая межиндивидуальная вариабельность концентраций (0,0–4,5 мг/л в плазме, 0,0–1,6 мг/л в клетках легких) обусловлена совокупностью факторов: различиями скорости метаболизма по фенотипу NAT2 (быстрые/медленные ацетиляторы), состоянием печени и лекарственными взаимодействиями, колебаниями всасывания из ЖКТ, а также гетерогенностью перфузии и барьерных свойств легочной ткани. В результате даже при одинаковой дозе наблюдается широкий разброс концентраций.

Оптимизацию параметров проводили методом *scipy.optimize.minimize (SciPy)*. Получены следующие значения: k_a = 0,57 ч$^{-1}$, k_{el} = 0,44 ч$^{-1}$, k_{12} = 4,0k_{12} ч$^{-1}$, k_{21} = 7,1 ч$^{-1}$, k_{23} = 9,266 ч$^{-1}$; k_{32} = 11,276 ч$^{-1}$; V_{plasma} = 51,3 л; $V_{ЛЖ}$ = 49,9 л; $V_{КЛ}$ = 53,7 л. На рисунке 2 приведено сопоставление фармакокинетической модели с клиническими данными: концентрация изониазида в плазме и клетках легких после перорального введения 300 мг изониазида.

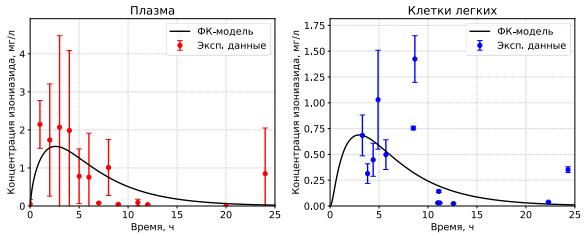


Рисунок 2. Сопоставление фармакокинетической модели с клиническими данными [24]: концентрация изониазида в плазме и клетках легких после перорального введения 300 мг изониазида

Figure 2. Comparison of the pharmacokinetic model with clinical data [24]: isoniazid concentration in plasma and lungs cells after oral administration of 300 mg of isoniazid

Модель воспроизводит ожидаемую кинетику: фазу абсорбции с быстрым нарастанием концентрации и последующей элиминацией.

1.2 Камерная модель для ингаляторного введения

На втором этапе структура фармакокинетической модели, описывающая пероральное введение, была модифицирована для ингаляторного введения препарата (рисунок 3). Из камеры десорбции препарат поступает непосредственно в эпителиальную легочную жидкость (ЛЖ), далее лекарственное вещество распределяется между плазмой и клетками легких (КЛ); элиминация осуществляется из камеры плазмы.



Рисунок 3. Структура многокамерной ФК-модели, описывающая ингаляционное введение препарата

Figure 3. Structure of the multicompartment PK model describing pulmonary drug delivery

Математическое описание модифицированной модели представлено системой уравнений (5–8):

$$\frac{dX_{lung}}{d\tau} = -k_{lung} X_{lung}, \quad (5)$$

$$\frac{dX_1}{d\tau} = -k_{el} X_1 - k_{12} X_1 + k_{21} X_2, \quad (6)$$

$$\frac{dX_2}{d\tau} = k_{12} X_1 - k_{21} X_2 - k_{23} X_2 + k_{32} X_3 + k_{lung} X_{lung}, \quad (7)$$

$$\frac{dX_3}{d\tau} = k_{23} X_2 - k_{32} X_3, \quad (8)$$

где X_{lung}, X_1, X_2, X_3 – количество изониазида в камере десорбции, плазме, эпителиальной легочной жидкости (ЛЖ) и клетках легких (КЛ) соответственно (мг); k_{lung} – константа скорости абсорбции (ч$^{-1}$); k_{el} – константа скорости элиминации; k_{12}, k_{23}, k_{21} и k_{32} – константы скоростей перераспределения изониазида между компартментами (ч$^{-1}$).

Для расчета константы абсорбции использовали экспериментальные данные *in vitro* по высвобождению изониазида из пролонгированной ингаляционной формы [23]. Профиль высвобождения имеет двухфазный характер: примерно 70% высвобождается за первые три часа, остальная часть – в течение суток. Это типично для полимерных систем, поскольку часть АФИ расположена на поверхности носителя, а остальная часть инкапсулирована глубже и высвобождается при постепенном растворении полимерной матрицы [26]. Такое поведение описывается системой двух линейных уравнений:

$$\frac{dY_1}{dt} = -k_1 Y_1, \quad (9)$$

$$\frac{dY_2}{dt} = -k_2 Y_2, \quad (10)$$

где (9) – быстрая фаза; (10) – медленная фаза; k_1, k_2 – константы скоростей высвобождения изониазида (ч$^{-1}$); Y_1, Y_2 – доля высвободившегося изониазида ($Y_1 + Y_2 = 1$).

Определение параметров k_1, k_2 выполняли методом наименьших квадратов с использованием функции *scipy.optimize.minimize* (алгоритм *L-BFGS-B*). Численное решение уравнений осуществляли с помощью функции *solve_ivp (SciPy)*. Поступление препарата в легочную жидкость описывали с помощью уравнения:

$$k_{lung} = k_1 Y_1 + k_2 Y_2. \quad (11)$$

Полученные параметры: k_1 = 2.197 ч$^{-1}$; k_2 = 0.293 ч$^{-1}$; Y_1 = 0.66; Y_2 = 0.34.

На рисунке 4 показано сопоставление расчётной кривой высвобождения изониазида с экспериментальными данными *in vitro*.

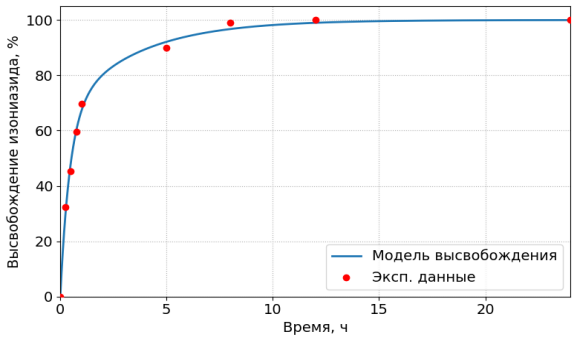


Рисунок 4. Сопоставление расчётной кривой высвобождения изониазида с экспериментальными данными *in vitro*

Figure 4. Comparison of the simulated isoniazid release curve with experimental *in vitro* data

1.3 Фармакодинамическая модель

Среди ключевых показателей при оценке ингаляционных препаратов особое значение имеет их эффективность. Для терапии туберкулеза конечным критерием эффективности считается снижение бактериальной нагрузки до уровня, при котором дальнейшее развитие инфекции становится невозможным. Ранняя бактерицидная активность (РБА) изониазида отражает динамику гибели микобактерий в первые двое суток лечения и рассчитывается как среднесуточное уменьшение числа колониеобразующих единиц (КОЕ) в мокроте (уравнение (12)):

$$\text{РБА} = \frac{[\log_{10} B_E(t_1) - \log_{10} B_E(t_2)]}{(t_2 - t_1)} \quad (12)$$

где $B_E(t_1)$ и $B_E(t_2)$ – количество внеклеточных бактерий, рассчитанное непосредственно перед введением дозы, в момент t_1 и t_2 соответственно [27].

Для описания действия изониазида на внеклеточную популяцию микобактерий использована фармакодинамическая модель (уравнение 13), предложенная в работе [1]. Она учитывает одновременно процессы роста и гибели бактерий, зависящие от концентрации препарата в среде:

$$\frac{dN}{d\tau} = K_{gmax} N \left(1 - \frac{N}{N_{max}}\right)\left(1 - \frac{C^{ag}}{C_{50}^{ag} + C^{ag}}\right) - K_{kmax} N \frac{C^{ak}}{C_{50}^{ak} + C^{ak}}, \quad (13)$$

где K_{gmax} – константа максимальной скорости роста бактерий, 0,03 ч$^{-1}$ [28]; N_{max} – максимальное число бактерий, 10^9 [29]; *ag* и *ak* – эмпирические коэффициенты Хилла, определяющие степень крутизны сигмойды, 6,07 и 1,27 соответственно [30]; C_{50}^{ag}, $C_{50}^{ak} C_{50}^{ak}$ медианное значение эффективной концентрации препарата, 3,24 и 0,02 мг/л соответственно [30–31]; K_{kmax} – константа максимальной скорости гибели бактерий, 0,096 ч$^{-1}$ [31].

Результаты и обсуждение

Совместное решение ФК/ФД

Для сопоставления эффективности перорального и ингаляционного путей введения выполнено совместное ФК/ФД (фармакокинетическое / фармакодинамическое) моделирование при следующем режиме терапии: ежедневное введение 300 мг изониазида 1 раз в сутки. Для перорального пути доля доставленного препарата принята равной 1. Для ингаляционного введения рассмотрены два сценария осаждения в легких: респирабельная фракция составляет 60% (РФ = 0,6), что соответствует литературным данным о доле препарата, достигающего альвеол [10]; доставка полной дозы (РФ = 1).

На рисунке 5 показана динамика внеклеточной бактериальной популяции в течение 48 часов при дозировании 300 мг изониазида 1 раз в сутки. На рисунках 6–7 рассчитаны концентрации изониазида в эпителиальной легочной жидкости (ЛЖ) и плазме соответственно.

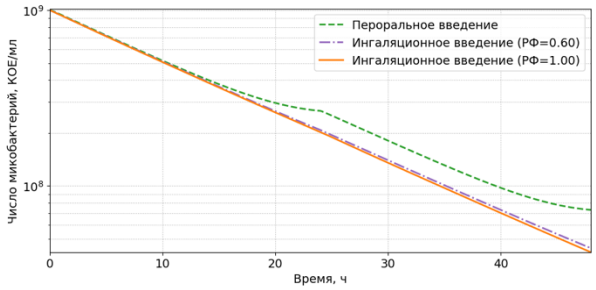


Рисунок 5. Динамика внеклеточной бактериальной нагрузки при ежедневном дозировании 300 мг изониазида в течение 48 ч: сравнение перорального и ингаляционного введения (РФ = 0,6; РФ = 1)

Figure 5. Dynamics of extracellular bacterial load during daily dosing of 300 mg of isoniazid over 48 h: comparison of oral and pulmonary administration (RF (respirable fraction) = 0,6; RF = 1)

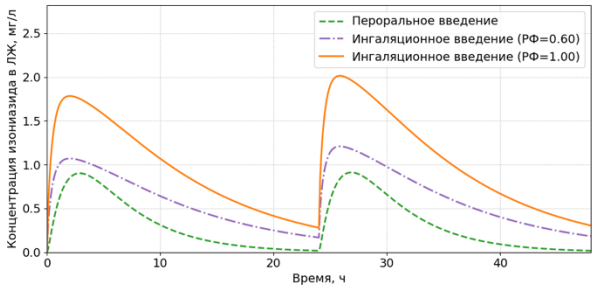


Рисунок 6. Концентрация изониазида в эпителиальной легочной жидкости (ЛЖ) при ежедневном дозировании 300 мг в течение 48 ч: сравнение перорального и ингаляционного введения (РФ = 0,6; РФ = 1)

Figure 6. Isoniazid concentration in epithelial lining fluid (ELF) during daily dosing of 300 mg over 48 h: comparison of oral and pulmonary administration (RF = 0,6; RF = 1)

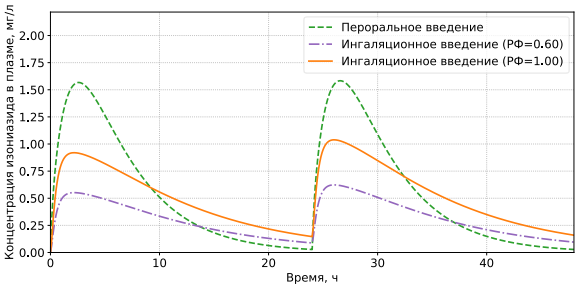


Рисунок 7. Концентрация изониазида в плазме при ежедневном дозировании 300 мг в течение 48 ч: сравнение перорального и ингаляционного введения (РФ = 0,6; РФ = 1)

Figure 7. Isoniazid concentration in plasma during daily dosing of 300 mg over 48 h: comparison of oral and pulmonary administration (RF = 0,6; RF = 1)

Согласно результатам моделирования (рисунки 5–7), ингаляционное введение 300 мг изониазида, независимо от доли доставляемого препарата, обеспечивает более высокие концентрации в эпителиальной легочной жидкости (C_{max} = 1,2–2,0 мг/л) по сравнению с пероральным путем (C_{max} = 0,91 мг/л), что приводит к более эффективному снижению численности внеклеточной бактериальной популяции. При этом концентрация в плазме при ингаляционной доставке существенно ниже C_{max} = 0,62–1,04 мг/л (при пероральном введении C_{max} = 1,58 мг/л), что указывает на снижение риска системных побочных эффектов. За первые двое суток ранняя бактерицидная активность изониазида составила: $РБА_{0–48}$ = 0,568 $\log_{10}$ КОЕ/мл/сут (пероральное введение); $РБА_{0–48}$ = 0,677 $\log_{10}$ КОЕ/мл/сут (ингаля-ционное введение, РФ = 0.6); $РБА_{0–48}$ = 0,688 $\log_{10}$ КОЕ/мл/сут (ингаляционное введение, РФ = 1), что согласуется с опубликованными клиническими данными [32]. Общая экспозиция препарата в эпителиальной легочной жидкости (AUC_{0-48}) за 48 часов составила: $AUC_{0–48}$ = 15,31 мг·ч/л (пероральное введение), $AUC_{0–48}$ = 29,06 мг·ч/л (ингаляционное введение, РФ = 0,6); $AUC_{0–48}$ = 48,44 мг·ч/л (ингаляционное введение, РФ = 1), что свидетельствует о том, что в легких удерживается в 1,9–3,2 раза больше препарата по сравнению с пероральным введением.

На рисунке 8 приведены результаты вычислительного эксперимента 10-дневной терапии с ежедневным введением 300 мг изониазида 1 раз в сутки, которые подтверждают преимущество ингаляционного введения: снижение бактериальной нагрузки происходит быстрее, независимо от доли респирабельной фракции препарата.

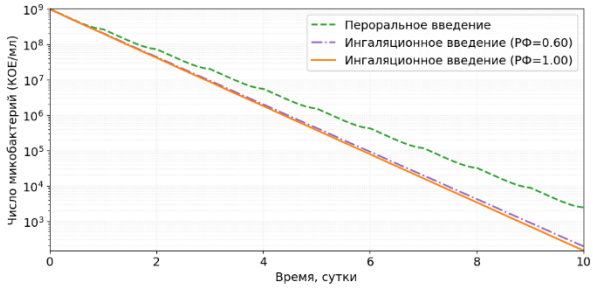


Рисунок 8. Динамика внеклеточной бактериальной нагрузки при ежедневном дозировании 300 мг изониазида в течение 10 суток: сравнение перорального и ингаляционного введения (РФ = 0,6; РФ = 1)

Figure 8. Dynamics of extracellular bacterial load during daily dosing of 300 mg of isoniazid over 10 days: comparison of oral and pulmonary administration (RF = 0,6; RF = 1)

На рисунке 9 представлена динамика внеклеточной бактериальной популяции при ингаляционном введении изониазида в диапазоне доз 15–450 мг (РФ = 0,6) при ежедневном дозировании в течение 30 суток. Диапазон доз выбран исходя из данных клинических исследований и дополнен промежуточными значениями [6].

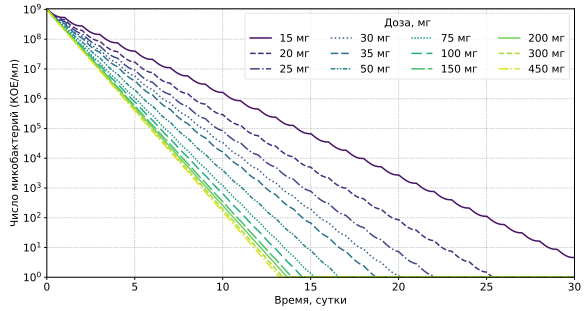


Рисунок 9. Совмещенная ФК/ФД модель: динамика численности *Mycobacterium tuberculosis* при ежедневном ингаляционном введении изониазида (15–450 мг) в течение 30 дней (РФ = 0,6)

Figure 9. Combined pharmacokinetics/ pharmacodynamics model: dynamics of *Mycobacterium tuberculosis* population during daily pulmonary administration of isoniazid (15–450 mg) over 30 days (RF = 0,6)

Из рисунка 9 следует, что дозы 15–35 мг оказывают недостаточное подавление популяции *Micobacterium tuberculosis*. В диапазоне доз 50–100 мг ранняя бактерицидная активность изониазида составила $РБА_{0–48}$ = 0,54–0,62 $\log_{10}$ КОЕ/мл/сут и близка к максимальному значению ($РБА^{max}_{0–48}$ = 0,69 $\log_{10}$ КОЕ/мл/сут). Начиная с дозы 150 мг и выше прирост $РБА_{0-48}$ минимален ($РБА_{0–48}$ = 0,65–0,68 $\log_{10}$ КОЕ/мл/сут), поэтому дальнейшее увеличение дозы нецелесообразно.

Таким образом, рекомендуемый диапазон доз изониазида для ингаляционного введения составляет 50–100 мг/сут (при РФ = 0,6).

Заключение

С помощью совмещенной ФК/ФД модели в работе обоснована эффективность ингаляционного противотуберкулезного препарата с пролонгированным высвобождением изониазида. Результаты моделирования показали, что по сравнению с пероральным путем ингаляционная доставка формирует более высокую локальную экспозицию в эпителиальной легочной жидкости при более низких концентрациях в плазме, что приводит к более выраженному снижению бактериальной нагрузки и минимизирует риск системных побочных эффектов. Расчет динамики внеклеточной бактериальной популяции при ингаляционном введении изониазида (15 – 450 мг) позволил определить оптимальную дозировку: 50 – 100 мг изониазида 1 раз в сутки (доля респирабельной фракции 0,6), при которой достигаются значения ранней бактерицидной активности близкие к максимальным.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научной тематики FSSM-2025–0003.

Литература

1 Lalande L., Bourguignon L., Maire P., Goutelle S. Mathematical modeling and systems pharmacology of tuberculosis: Isoniazid as a case study // J. Theor. Biol. 2016. V. 399. P. 43–52. doi: 10.1016/j.jtbi.2016.03.038.

2 Всемирная организация здравоохранения. Всемирная статистика здравоохранения 2025: мониторинг здоровья в целях достижения Целей устойчивого развития. Женева: WHO, 2025. 337 с.

3 World Health Organization. Global Tuberculosis Report 2023. Женева: WHO, 2023.

4 Mehta P., Bothiraja C., Kadam S., Pawar A. Potential of dry powder inhalers for tuberculosis therapy: facts, fidelity and future // Artif. Cells Nanomed. Biotechnol. 2018. V. 46. Suppl. 1. P. S791–S806. doi: 10.1080/21691401.2018.1457531.

5 Borghardt J.M., Kloft C., Sharma A. Inhaled therapy in respiratory disease: the complex interplay of pulmonary kinetic processes // Can. Respir. J. 2018. V. 2018. P. 2732017. doi: 10.1155/2018/2732017.

6 Parumasivam T., Chang R., Abdelghany S., Ye T., Britton W., Chan H. Dry powder inhalable formulations for anti-tubercular therapy // Adv. Drug Deliv. Rev. 2016. V. 102. P. 83–101. doi: 10.1016/j.addr.2016.04.015.

7 Fernandes G.F.S., Salgado H.R.N., Santos J.L. Isoniazid: a review of characteristics, properties and analytical methods // Crit. Rev. Anal. Chem. 2017. V. 47. № 4. P. 298–308. doi: 10.1080/10408347.2016.1264193.

8 Grenha A., Alves A.D., Guerreiro F. et al. Inhalable locust bean gum microparticles co-associating isoniazid and rifabutin: Therapeutic assessment in a murine model of tuberculosis infection // Eur. J. Pharm. Biopharm. 2020. V. 147. P. 38–44. doi: 10.1016/j.ejpb.2019.11.011.

9 Mo P., Hatanaka Y., Furukawa S., Takase M., Yamanaka S., Doi M., Kämäräinen T., Uchiyama H., Kadota K., Tozuka Y. Cocrystal formulation design of 4-aminosalicylic acid and isoniazid via spray-drying based on a ternary phase diagram toward simultaneous pulmonary delivery // Powder Technol. 2024. V. 445. P. 120126. doi: 10.1016/j.powtec.2023.120126.

10 Nainwal N., Sharma Y., Jakhmola V. Dry powder inhalers of antitubercular drugs // Tuberculosis. 2022. V. 135. P. 102228. doi: 10.1016/j.tube.2022.102228.

11 Reddy K., Naraharisetti L., Prasanna V. Excipient-free inhalable combination shell-core microparticles with clofazimine as shell for extended pulmonary retention of isoniazid in core // Int. J. Pharm. 2025. V. 672. P. 125310. doi: 10.1016/j.ijpharm.2025.125310.

12 Shao Z., Tam K., Achalla V., Woon E., Mason A., Chow S., Yam J. Synergistic combination of antimicrobial peptide and isoniazid as inhalable dry powder formulation against multi-drug resistant tuberculosis // Int. J. Pharm. 2024. V. 654. P. 123960. doi: 10.1016/j.ijpharm.2023.123960.

13 Singh A., Verma R., Mukker J., Jadav A., Muttil P., Sharma R., Mohan M., Agrawal A. Inhalable particles containing isoniazid and rifabutin as adjunct therapy for safe, efficacious and relapse-free cure of experimental animal tuberculosis in one month // Tuberculosis. 2021. V. 128. P. 102081. doi: 10.1016/j.tube.2021.102081.

14 Muliaditan M., Teutonico D., Ortega-Muro F., Ferrer S., Della Pasqua O. Prediction of lung exposure to anti-tubercular drugs using plasma pharmacokinetic data: implications for dose selection // Eur. J. Pharm. Sci. 2022. V. 173. P. 106163. doi: 10.1016/j.ejps.2022.106163.

15 Imran M., Alzahrani H.A., Elmagzoub R.M. et al. A Systems Biology Approach to Elucidating Functional and Genomic Signatures in Host-Pathogen Interactions of Triple Infections: Tuberculosis, HIV, and SARS-CoV-2 // J. Pure Appl. Microbiol. 2025. V. 19. № 2. P. 1024–1041. doi: 10.22207/JPAM.19.2.27.

16 Otalvaro J.D., Hernandez A.M., Rodriguez C.A. et al. Population pharmacokinetic models of antituberculosis drugs in patients: A systematic critical review // Ther. Drug Monit. 2021. V. 43. № 1. P. 108–115. doi: 10.1097/FTD.0000000000000809.

17 Gumbo T., Angulo-Barturen I., Ferrer-Bazaga S. Pharmacokinetic-pharmacodynamic and dose-response relationships of antituberculosis drugs: recommendations and standards for industry and academia // J. Infect. Dis. 2015. V. 211. Suppl. 3. P. S96–S106. doi: 10.1093/infdis/jiu610.

18 Lake M.A., Adams K.N., Nie F. et al. The human proton pump inhibitors inhibit Mycobacterium tuberculosis rifampicin efflux and macrophage-induced rifampicin tolerance // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2023. V. 120. № 7. e2215512120. doi: 10.1073/pnas.2215512120.

19 Pasipanodya J., Gumbo T. An oracle: antituberculosis pharmacokinetics-pharmacodynamics, clinical correlation, and clinical trial simulations to predict the future // Antimicrob. Agents Chemother. 2011. V. 55. № 1. P. 24–34. doi: 10.1128/AAC.00510-10.

20 Lalande L., Bourguignon L., Bihari S., Maire P., Neely M., Jelliffe R., Goutelle S. Population modeling and simulation study of the pharmacokinetics and antituberculosis pharmacodynamics of isoniazid in lungs // Antimicrob. Agents Chemother. 2015. V. 59. № 9. P. 5181–5189. doi: 10.1128/AAC.00586-15.

21 Щербакова Л.А., Петрикова Е.А., Гордиенко М.Г., Сафаров Р.Р., Щекотихин А.Е. Исследование влияния полимерной матрицы и технологических параметров распылительной сушки на свойства порошковой ингаляционной композиции // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2024. Т. 30. № 4. С. 687–696. doi: 10.17277/vestnik.2024.04.pp.687-696.

22 Саитгареева А.И., Абрамов А.А., Щербакова Л.А., Гордиенко М.Г. Разработка конструкции дозирующего порошкового ингалятора // Успехи в химии и химической технологии. 2024. Т. 38. № 9. С. 74–76.

23 Щербакова Л.А., Петрикова Е.К., Гордиенко М.Г. Применение поликапролактона и полимолочной кислоты для получения ингаляционных композиций // Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения: материалы XXI Международной научно-практической конференции. 2025. С. 329–334.

24 Prideaux B., Via L.E., Zimmerman M.D., Eum S., Sarathy J., O'Brien P., Chen C., Kaya F., Weiner D.M., Chen P., Song T., Lee M., Shim T., Cho J.S., Kim W., Cho S.N., Olivier K.N., Barry C.E., Dartois V. The association between sterilizing activity and drug distribution into tuberculosis lesions // Nat. Med. 2015. V. 21. № 10. P. 1223–1227. doi: 10.1038/nm.3937.

25 Peloquin C.A., Jaresko G.S., Yong C.L., Keung A.C., Bulpitt A.E., Jelliffe R.W. Population pharmacokinetic modeling of isoniazid, rifampin, and pyrazinamide // Antimicrob. Agents Chemother. 1997. V. 41. № 12. P. 2670–2679. doi: 10.1128/AAC.41.12.2670.

26 Miranda M.S., Rodrigues M.T., Domingues M.A., Torrado E., Reis R.L., Pedrosa J., Gomes M.E. Exploring inhalable polymeric dry powders for anti-tuberculosis drug delivery // Mater. Sci. Eng. C. 2018. V. 93. P. 1090–1103. doi: 10.1016/j.msec.2018.08.016.

27 Donald P.R., Sirgel F.A., Venter A., Parkin D.P., Seifart H.I., van de Wal B.W. Early bactericidal activity of antituberculosis agents // Expert Rev. Anti Infect. Ther. 2003. V. 1. № 1. P. 141–155. doi: 10.1586/14787210.1.1.141.

28 Manca C., Tsenova L., Barry C.E., Bergtold A., Freeman S., Haslett P.A., Musser J.M., Freedman V.H., Kaplan G. Mycobacterium tuberculosis CDC1551 induces a more vigorous host response in vivo and in vitro, but is not more virulent than other clinical isolates // J. Immunol. 1999. V. 162. № 11. P. 6740–6746. doi: 10.4049/jimmunol.162.11.6740.

29 Herrera M.T., Guzmán-Beltrán S., Bobadilla K. et al. Human pulmonary tuberculosis: understanding the immune response in the bronchoalveolar system // Biomolecules. 2022. V. 12. № 8. P. 1148. doi: 10.3390/biom12081148.

30 Gumbo T., Louie A., Liu W., Ambrose P.G., Bhavnani S.M., Brown D., Drusano G.L. Isoniazid's bactericidal activity ceases because of the emergence of resistance, not depletion of Mycobacterium tuberculosis in the log phase of growth // J. Infect. Dis. 2007. V. 195. № 2. P. 194–201. doi: 10.1086/510247.

31 Boorgula G.D., Singh S., Shankar P. et al. Isoniazid pharmacokinetics/pharmacodynamics as monotherapy and in combination regimen in the hollow fiber system model of Mycobacterium kansasii // Tuberculosis. 2023. V. 138. P. 102289. doi: 10.1016/j.tube.2022.102289.

32 Thomas L., Raju A.P., Chaithra M.S.S. et al. Influence of N-acetyltransferase 2 (NAT2) genotype/single nucleotide polymorphisms on clearance of isoniazid in tuberculosis patients: a systematic review of population pharmacokinetic models // Eur. J. Clin. Pharmacol. 2022. V. 78. № 10. P. 1535–1553. doi: 10.1007/s00228-022-03350-x.

References

1 Lalande L., Bourguignon L., Maire P., Goutelle S. Mathematical modeling and systems pharmacology of tuberculosis: Isoniazid as a case study. J. Theor. Biol. 2016. vol. 399. pp. 43–52. doi: 10.1016/j.jtbi.2016.03.038.

2 World Health Organization. World health statistics 2025: monitoring health for the SDGs, Sustainable Development Goals. Geneva: WHO; 2025. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Available at: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/381418/9789240110496-eng.pdf (Accessed June 29, 2025).

3 World Health Organization. Global Tuberculosis Report 2023. 1st ed. Geneva: WHO; 2023.

4 Mehta P., Bothiraja C., Kadam S., Pawar A. Potential of dry powder inhalers for tuberculosis therapy: facts, fidelity and future. Artif. Cells Nanomed. Biotechnol. 2018. vol. 46, suppl. 1. pp. S791-S806. doi:10.1080/21691401.2018.1457531.

5 Borghardt J.M., Kloft C., Sharma A. Inhaled therapy in respiratory disease: the complex interplay of pulmonary kinetic processes. Can. Respir. J. 2018. vol. 2018. 2732017. doi:10.1155/2018/2732017.

6 Parumasivam T., Chang R., Abdelghany Sh., Ye T., Britton W., Chan H. Dry powder inhalable formulations for anti-tubercular therapy. Adv. Drug Deliv. Rev. 2016. vol. 102. pp. 83–101. doi:10.1016/j.addr.2016.04.015.

7 Fernandes G.F.D.S., Salgado H.R.N., Santos J.L.D. Isoniazid: a review of characteristics, properties and analytical methods. Crit. Rev. Anal. Chem. 2017. vol. 47, no. 4. pp. 298–308. doi:10.1080/10408347.2016.1264193.

8 Verma R.K., Kaur J., Kumar K., Yadav A.B., Misra A. Intracellular time course, pharmacokinetics, and biodistribution of isoniazid and rifabutin following pulmonary delivery of inhalable microparticles to mice. Antimicrob. Agents Chemother. 2008. vol. 52, no. 9. pp. 3195–3201. doi:10.1128/AAC.01562–07.

9 Mo P., Hatanaka Y., Furukawa S., Takase M., Yamanaka S., Doi M., Kämäräinen T., Uchiyama H., Kadota K., Tozuka Y. Cocrystal formulation design of 4-aminosalicylic acid and isoniazid via spray-drying based on a ternary phase diagram toward simultaneous pulmonary delivery. Powder Technol. 2024. vol. 445. 120126. doi:10.1016/j.powtec.2023.120126.

10 Nainwal N., Sharma Y., Jakhmola V. Dry powder inhalers of antitubercular drugs. Tuberculosis. 2022. vol. 135. 102228. doi: 10.1016/j.tube.2022.102228.

11 Reddy K., Naraharisetti L., Prasanna V. Excipient-free inhalable combination shell-core microparticles with clofazimine as shell for extended pulmonary retention of isoniazid in core. Int. J. Pharm. 2025. vol. 672. 125310. doi:10.1016/j.ijpharm.2025.125310.

12 Shao Z., Tam K., Achalla V., Woon E., Mason A., Chow S., Yam J. Synergistic combination of antimicrobial peptide and isoniazid as inhalable dry powder formulation against multi-drug resistant tuberculosis. Int. J. Pharm. 2024. vol. 654. 123960. doi: 10.1016/j.ijpharm.2023.123960.

13 Singh A., Verma R., Mukker J., Jadav A., Muttil P., Sharma R., Mohan M., Agrawal A. Inhalable particles containing isoniazid and rifabutin as adjunct therapy for safe, efficacious and relapse-free cure of experimental animal tuberculosis in one month. Tuberculosis. 2021. vol. 128. 102081. doi:10.1016/j.tube.2021.102081.

14 Muliaditan M., Teutonico D., Ortega-Muro F., Ferrer S., Della Pasqua O. Prediction of lung exposure to anti-tubercular drugs using plasma pharmacokinetic data: implications for dose selection. Eur. J. Pharm. Sci. 2022. vol. 173. 106163. doi: 10.1016/j.ejps.2022.106163.

15 Young D., Stark J., Kirschner D. Systems biology of persistent infection: tuberculosis as a case study. Nat. Rev. Microbiol. 2008. vol. 6. pp. 520–528. doi:10.1038/nrmicro1917.

16 Goutelle S., Bourguignon L., Maire P.H., Van Guilder M., Conte J.E., Jelliffe R.W. Population modeling and Monte Carlo simulation study of the pharmacokinetics and antituberculosis pharmacodynamics of rifampin in lungs. Antimicrob. Agents Chemother. 2009. vol. 53. pp. 2974–2981. doi:10.1128/AAC.01520–08.

17 Gumbo T, Angulo-Barturen I, Ferrer-Bazaga S. Pharmacokinetic-pharmacodynamic and dose-response relationships of antituberculosis drugs: recommendations and standards for industry and academia. J Infect Dis. 2015; 211 Suppl 3:S96-S106. doi: 10.1093/infdis/jiu610.

18 Gumbo T., Angulo-Barturen I., Ferrer-Bazaga S. Pharmacokinetic-pharmacodynamic and dose-response relationships of antituberculosis drugs: recommendations and standards for industry and academia. J. Infect. Dis. 2015. vol. 211, suppl. 3. pp. S96-S106. doi: 10.1093/infdis/jiu610.

19 Gumbo T., Louie A., Deziel M.R., Liu W., Parsons L.M., Salfinger M., Drusano G.L. Concentration-dependent Mycobacterium tuberculosis killing and prevention of resistance by rifampin. Antimicrob. Agents Chemother. 2007. vol. 51. pp. 3781–3788. doi: 10.1128/AAC.01533–06.

20 Pasipanodya J., Gumbo T. An oracle: antituberculosis pharmacokinetics-pharmacodynamics, clinical correlation, and clinical trial simulations to predict the future. Antimicrob. Agents Chemother. 2011. vol. 55. pp. 24–34. doi:10.1128/AAC.00510–10.

21 Lalande L., Bourguignon L., Bihari S., Maire P., Neely M., Jelliffe R., Goutelle S. Population modeling and simulation study of the pharmacokinetics and antituberculosis pharmacodynamics of isoniazid in lungs. Antimicrob. Agents Chemother. 2015. vol. 59. pp. 5181–5189. doi:10.1128/AAC.00586–15

22 Shcherbakova L.A., Petrikova E.A., Gordienko M.G., Safarov R.R., Shchekotikhin A.E. A study of the influence of polymer matrix and process parameters of spray drying on the properties of powder inhalation composition. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2024. vol. 30, no. 4. pp. 687–696. (in Russian).

23 Saitgareeva A.I., Abramov A.A., Shcherbakova L.A., Gordienko M.G. Development of a dosing dry powder inhaler. XX International Congress of Young Scientists in Chemistry and Chemical Technology. 2024. vol. 38, no. 9. pp. 74–76. (in Russian).

24 Shcherbakova L.A., Petrikova E.K., Gordienko M.G. Application of polycaprolactone and polylactic acid for obtaining inhalation compositions. Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference “New Polymeric Composite Materials. Mikitaev Readings”. 2025. p. 329. (in Russian).

25 Prideaux B., Via L.E., Zimmerman M.D., Eum S., Sarathy J., O’Brien P., Chen C., Kaya F., Weiner D.M., Chen P., Song T., Lee M., Shim T., Cho J.S., Kim W., Cho S.N., Olivier K.N., Barry C.E., Dartois V. The association between sterilizing activity and drug distribution into tuberculosis lesions. Nat. Med. 2015. vol. 21, no. 10. pp. 1223–1227. doi:10.1038/nm.3937.

26 Peloquin C.A., Jaresko G.S., Yong C.L., Keung A.C., Bulpitt A.E., Jelliffe R.W. Population pharmacokinetic modeling of isoniazid, rifampin, and pyrazinamide. Antimicrob. Agents Chemother. 1997. vol. 41, no. 12. pp. 2670–2679. doi: 10.1128/AAC.41.12.2670.

27 Miranda M.S., Rodrigues M.T., Domingues M.A., Torrado E., Reis R.L., Pedrosa J., Gomes M.E. Exploring inhalable polymeric dry powders for anti-tuberculosis drug delivery. Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl. 2018. vol. 93. pp. 1090–1103. doi: 10.1016/j.msec.2018.08.016.

28 Donald P.R., Sirgel F.A., Venter A., Parkin D.P., Seifart H.I., van de Wal B.W. Early bactericidal activity of antituberculosis agents. Expert Rev. Anti Infect. Ther. 2003. vol. 1, no. 1. pp. 141–155. doi:10.1586/14787210.1.1.141.

29 Manca C., Tsenova L., Barry C.E., Bergtold A., Freeman S., Haslett P.A., Musser J.M., Freedman V.H., Kaplan G. Mycobacterium tuberculosis CDC1551 induces a more vigorous host response in vivo and in vitro, but is not more virulent than other clinical isolates. J. Immunol. 1999. vol. 162, no. 11. pp. 6740–6746. doi:10.4049/jimmunol.162.11.6740.

30 Marino S., Kirschner D.E. The human immune response to Mycobacterium tuberculosis in lung and lymph node. J. Theor. Biol. 2004. vol. 227. pp. 463–486. doi: 10.1016/j.jtbi.2003.11.023.

31 Gumbo T., Louie A., Liu W., Ambrose P.G., Bhavnani S.M., Brown D., Drusano G.L. Isoniazid's bactericidal activity ceases because of the emergence of resistance, not depletion of Mycobacterium tuberculosis in the log phase of growth. J. Infect. Dis. 2007. vol. 195, no. 2. pp. 194–201. doi: 10.1086/510247.

32 Jayaram R., Shandil R.K., Gaonkar S., Kaur P., Suresh B.L., Mahesh B.N., Jayashree R., Nandi V., Bharath S., Kantharaj E., Balasubramanian V. Isoniazid pharmacokinetics-pharmacodynamics in an aerosol infection model of tuberculosis. Antimicrob. Agents Chemother. 2004. vol. 48. pp. 2951–2957. doi:10.1128/AAC.48.8.2951–2957.2004.

33 Donald P.R., Sirgel F.A., Venter A., Parkin D.P., Seifart H.I., van de Wal B.W., Werely C., van Helden P.D., Maritz J.S. The influence of human N-acetyltransferase genotype on the early bactericidal activity of isoniazid. Clin. Infect. Dis. 2004. vol. 39. pp. 1425–1430. doi: 10.1086/424519.

Сведения об авторах

Лариса А. Щербакова инженер, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Миусская пл., д. 9, г. Москва, 125047, Россия, shcherbakova.l.a@muctr.ru
https://orcid.org/0009-0006-4437-2430

Екатерина А. Петрикова магистр, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Миусская пл., д. 9, г. Москва, 125047, Россия, 190197@muctr.ru
https://orcid.org/0009-0008-4428-7927

Руслан Р. Сафаров Директор по развитию производства, ООО ТД "ХИММЕД", ООО ТД "ХИММЕД", Каширское шоссе, д. 3, к. 2, стр. 4/9, Москва, 115230, Россия, safarov.r.r@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0002-0342-0049

Мария Г. Гордиенко д.т.н., профессор, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Миусская пл., д. 9, г. Москва, 125047, Россия, gordienko@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0002-8485-9861

Information about authors

Larisa A. Shcherbakova engineer, chemical and pharmaceutical engineering department, FSBEI HE D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq., 9 Moscow, 125047, Russia, shcherbakova.l.a@muctr.ru
https://orcid.org/0009-0006-4437-2430

Ekaterina A. Petrikova master, chemical and pharmaceutical engineering department, FSBEI HE D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq., 9 Moscow, 125047, Russia, 190197@muctr.ru
https://orcid.org/0009-0008-4428-7927

Ruslan R. Safarov director of production development, OOO TD "KHIMMED", OOO TD "KHIMMED", Kashirskoe shosse, 3, bldg. 2, building 4/9, Moscow, 115230, Russia, safarov.r.r@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0002-0342-0049

Maria G. Gordienko Dr. Sci. (Engin.), professor, chemical and pharmaceutical engineering department, FSBEI HE D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq., 9 Moscow, 125047, Russia, gordienko@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0002-8485-9861

Вклад авторов

Лариса А. Щербакова выполнение расчётов, написание текста статьи и ответственность за плагиат
Екатерина А. Петрикова обзор литературных источников по исследуемой проблеме
Руслан Р. Сафаров консультация в ходе исследования
Мария Г. Гордиенко корректировка текста статьи, анализ результатов

Contribution

Larisa A. Shcherbakova performed computations, wrote the manuscript and is responsible for plagiarism
Ekaterina A. Petrikova review of the literature on an investigated problem
Ruslan R. Safarov consultation during the study
Maria G. Gordienko correct it before filing in editing, analysis of results

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/08/2025	**После редакции** 02/09/2025	**Принята в печать** 15/09/2025
Received 11/08/2025	**Accepted in revised** 02/09/2025	**Accepted** 15/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-207-216 Обзорная статья/Review article
УДК 66.047.596 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Последние достижения в области распылительной сушки

Анастасия В. Мосюрова [1] mosiurova.a.v@muctr.ru 0009-0008-2032-6821
Наталья В. Меньшутина [1] chemcom@muctr.ru 0000-0001-7806-1426

1 Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, г. Москва, 125480, Россия

Аннотация. В обзоре представлен анализ современных тенденций и технологических инноваций в области распылительной сушки — высокоэффективного метода получения порошкообразных материалов из жидкотекучих сред. Несмотря на более чем полуторавековую историю, этот процесс продолжает активно развиваться, что обусловлено потребностью в снижении энергозатрат, повышении управляемости характеристик частиц и минимизации экологической нагрузки. Статья детально рассматривает устройство классических распылительных сушилок, включая стадии диспергирования, сушки и сепарации. Проведен сравнительный анализ различных типов распылительных устройств (центробежных, гидравлических, пневматических, ультразвуковых и электростатических), а также конфигураций сушильных камер, определяющих термическую историю продукта и его конечные свойства. Центральное место в работе занимает описание перспективных технологических модификаций, расширяющих границы применения традиционной сушки. Среди них выделяются нанораспылительная сушка для получения субмикронных частиц с узким распределением по размерам, распылительная сублимационная сушка, обеспечивающая сохранность высокопористой структуры термолабильных материалов, а также методы с применением импульсного горения, вакуума и перегретого пара, позволяющие значительно снизить термическую нагрузку и повысить энергетическую эффективность процесса. Отдельно рассматриваются подходы к совмещению сушки с инкапсулированием, агломерацией и получением аморфных дисперсий. Проведенный анализ показывает, что современное развитие технологии носит целенаправленный характер и тесно связано с запросами высокотехнологичных отраслей, таких как фармацевтика, биотехнологии и производство функциональных материалов. Приоритетными направлениями дальнейших исследований являются разработка адаптивных систем управления с элементами искусственного интеллекта, создание замкнутых энерго- и ресурсосберегающих циклов, а также углублённое моделирование процессов формирования частиц для прецизионного конструирования порошков с заданными функциональными свойствами.

Ключевые слова: распылительная сушка, распылительное устройство, сухие микрочастицы.

Recent advances in spray drying

Anastasiia V. Mosyurova [1] mosiurova.a.v@muctr.ru 0009-0008-2032-6821
Natalia V. Menshutina [1] chemcom@muctr.ru 0000-0001-7806-1426

1 Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, st. Geroev Panfilovtsev, 20, 125480, Russia

Abstract. This review analyzes current trends and technological innovations in spray drying—a highly efficient method for producing powdered materials from flowing media. Despite its more than 150-year history, this process continues to rapidly evolve, driven by the need to reduce energy costs, improve control over particle characteristics, and minimize environmental impact. The article examines in detail the design of traditional spray dryers, including the dispersion, drying, and separation stages. A comparative analysis of various types of spray devices (centrifugal, hydraulic, pneumatic, ultrasonic, and electrostatic) is provided, as well as drying chamber configurations that determine the thermal history of the product and its final properties. A central focus of the paper is a description of promising technological modifications that expand the scope of traditional drying. Among these are nanospray drying for producing submicron particles with a narrow size distribution; spray freeze-drying, which preserves the highly porous structure of heat-sensitive materials; and methods using pulsed combustion, vacuum, and superheated steam, which significantly reduce thermal load and improve process energy efficiency. Approaches to combining drying with encapsulation, agglomeration, and the production of amorphous dispersions are considered separately. The analysis demonstrates that current technological development is targeted and closely aligned with the needs of high-tech industries such as pharmaceuticals, biotechnology, and the production of functional materials. Priority areas for further research include the development of adaptive control systems with elements of artificial intelligence, the creation of closed energy- and resource-saving cycles, and in-depth modeling of particle formation processes for the precision design of powders with desired functional properties.

Keywords: spray drying, atomization, dry microparticles.

Введение

Распылительная сушка – это непрерывный одноступенчатый технологический процесс с широким диапазоном параметров работы, с различными конструкциями аппаратов и режимами работы. Процесс распылительной сушки можно описать тремя основными стадиями: диспергирование жидкотекучего материала распылительным устройством, формирование частиц в результате интенсивного тепло-массообмена капель материала и сушильного агента в камере аппарата, сбор сухих частиц готового продукта [1, 2]. На рисунке 1 представлен пример схемы распылительной сушилки.

Для цитирования
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

For citation
Mosyurova A.V., Menshutina N.V. Recent advances in spray drying. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 207–216. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-207-216

© 2025, Мосюрова А.В. и др. / Mosyurova A.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

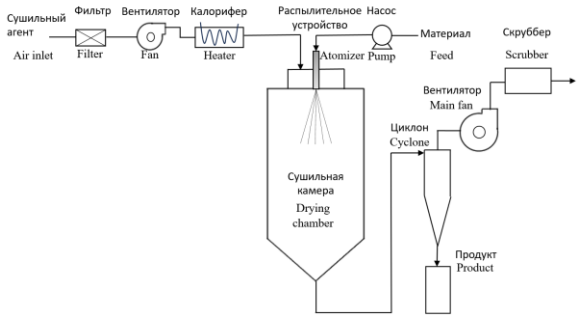


Рисунок 1. Схема распылительной сушилки, работающей по принципу параллельного тока сушильного агента и жидкотекучего материала

Figure 1. Spray – drying process and plant. Co-current flow

Процесс распылительной сушки проходит следующим образом: жидкотекучий материал перекачивается из резервуара в распылительное устройство, обычно расположенное в распределителе сушильного агента в верхней части сушильной камеры; сушильный агент подается приточным вентилятором из атмосферы через фильтр и проходит через нагреватель в распределитель; в сушильной камере аппарата распылительное устройство диспергирует жидкотекучий материал в мельчайшие капли, которые встречаются с горячим сушильным агентом; в результате интенсивного тепло-массообмена капель материала и сушильного агента происходит высыхание и формирование частиц, охлаждение сушильного агента; высушенный продукт увлекается потоком сушильного агента в циклон, в котором происходит отделение высушенных частиц продукта от сушильного агента в сборник; отработанный сушильный агент выводится вытяжным вентилятором в скруббер, в котором оседает мельчайшая фракция неотделенных частицы продукта.

В литературе представлено большое количество подробных описаний процесса распылительной сушки. Основы теории и расчета распылительной сушки изложены в книге М.В. Лыкова и Б.И. Леончика [1]. Расчет наиболее подходящей формы сушильной камеры производится с помощью соответствующих уравнений, хотя для выполнения таких расчетов требуются определенные упрощения, касающиеся сложной гидродинамики и взаимных взаимодействий в трехфазной системе, состоящих из газа, капель и твердых частиц.

Стадии распылительной сушки и конструкция распылительной сушилки

Диспергирование является наиболее значимой стадией процесса распылительной сушки, оказывающей значительное влияние на конечный размер частиц продукта, который зависит от размера и гранулометрического распределения капель, их траектории и скорости.

Ученые [3] представили обширный обзор моделей для расчета размера капель и заключили, что размер капли зависит от физико-химических (вязкости, плотности, поверхностного натяжения, концентрации) и реологических свойств жидкости и характеристик работы распыляющего устройства, однако данные корреляции эмпирические и имеют погрешности, что ограничивает их использование для проектирования процесса распылительной сушки.

Диспергирование может осуществляться под действием центробежной силы, гидравлического давления, ультразвуковой или электростатической энергии с помощью распылительных устройств. В зависимости от целей распылительной сушки и характера исходного материала, используются различные типы распылительных устройств:

- Центробежные (дисковые) распылители;
- Гидравлические (струйные или центробежные) форсунки;
- Пневматические (двухжидкостные или трехжидкостные) форсунки;
- Ультразвуковые форсунки.

В таблице 1 обобщена основная информация о распылительных устройствах [1, 2, 4–8].

На рисунке 2 изображены примеры распылительных устройств, используемых для распылительной сушки.

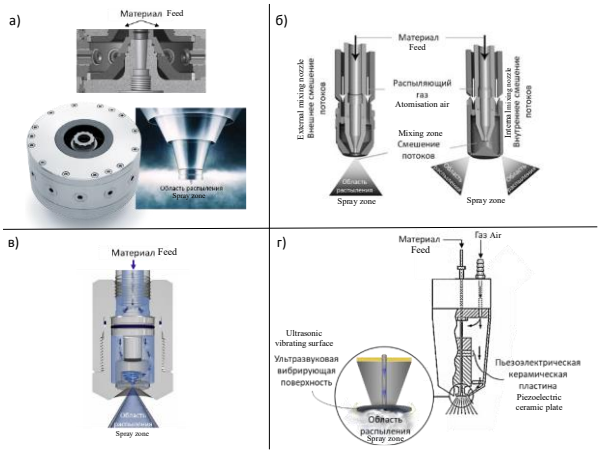


Рисунок 2. Распылительные устройства: а) новая оригинальная конструкция дискового распылителя [9, 10]; б) пневматическая форсунка [11]; в) гидравлическая центробежная форсунка [12]; г) ультразвуковая форсунка [13]

Figure 2. Schematic representation of conventional atomizers used on spray drying: a) new original design of the disc atomizer [9, 10]; b) pneumatic nozzle atomizer – internal and external two-fluid nozzles [11]; c) hydraulic centrifugal nozzle [12]; d) ultrasonic atomizer [13]

Таблица 1.

Типы распылительных устройств

Table 1.

Various types of atomizers used in spray dryers

Распылительное устройство Atomizer	Дисковый распылитель Roary wheel/disk	Гидравлическая форсунка Hydraulic nozzle	Пневматическая форсунка Pneumatic nozzle	Ультразвуковая форсунка Ultrasonic nozzle
Принцип работы Principle of operation	Истечение струек или пленок материала с быстровращающегося диска в относительно низкоскоростной поток сушильного агента The outflow of streams or films of feed from a fast-rotating disk into a relatively low-speed stream of drying agent	Подача материала под давлением через трубку с уменьшающимся диаметром Feeding of feed under pressure through a tube with a decreasing diameter	Диспергирование материала потоком сжатого газа Feed dispersion by compressed gas flow	Диспергирование материала под действием вибраций ультразвуковой частоты (60–140 кГц) Dispersion of feed under the influence of ultrasonic frequency vibrations (60–140 kHz)
Типы конструкции Various design	Конструкции дисков: гладкие, лопастные, сопловые Disc designs: smooth, vane, nozzle	Струйные и центробежные Blasting and centrifugal	Двкхпоточные или трехпоточные, со внутренним или внешним смешением потоков Two-fluid or Three-fluid, with internal or external flow mixing	
Характер диспергируемого материала Feed characteristics	Жидкость с высокой вязкостью, абразивные материалы High-viscosity feed, abrasive materials	Однородные жидкости невысокой вязкости, гомогенизированные системы с отсутствием твердых и абразивных включений Homogeneous feed with low viscosity, homogenized systems with absence of hard and abrasive inclusions	Жидкость с высокой вязкостью (свыше 0,1 П • с), суспензии Feeds of high viscosity (over 0,1 Pa • s), suspensions	Жидкость с невысокой вязкостью Low-viscosity feed
Тип распыления Spray type	Высокая однородность распыления, широкий диапазон среднего размера капель High homogeneity of spraying, wide range of medium droplet size	Капли в узком диапазоне диаметров Drops in a narrow diameter range	Низкий средний размер капель с высокой степенью однородности Low average droplet size with high degree of uniformity	Узкое распределение капель и частиц по размеру Narrow size distribution of droplets and particles
Размер частиц, мкм Particle size, μm	10–2000	20–600	3–200	0,01–100
Параметры, влияющие на размер капель Atomization parameters	Скорость вращения диска Disc speed	Гидравлическое давление Hydraulic pressure	Диаметр сопла; Соотношение массового потока распыляющего газа/материала Nozzle diameter; The ratio of the mass flow of air to feed	Частота ультразвука; Расход материала Ultrasound frequency; Feed flow rate

В большинстве процессов распылительной сушки используются описанные выше, наиболее распространенные распылительные устройства, однако существуют различные конфигурации распылительных устройств на стадии разработки.

Технология распылительной сушки с помощью электрического поля стала перспективным методом получения микро – наночастиц материалов различного состава, морфологии, формы, текстуры и размера [14–18]. Электростатическое распыление представляет собой процесс диспергирования жидкотекучего материала, при котором электростатический заряд (1–30 кВ) подается на сопло распылительного устройства [19, 20]. В патенте [21] представлен способ получения порошка активного соединения методом электростатической распылительной сушки, а также представлен подробный вид электростатической распылительной форсунки (рисунок 3).

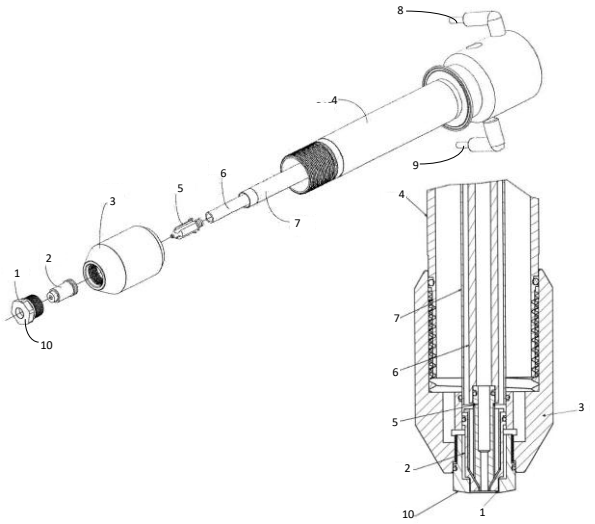


Рисунок 3. Электростатическая распылительная форсунка [21]: 1 – отверстие индукционного кольца; 2 – колпачок трубки распыляющего газа; 3 – корпус сопла; 4 – трубка продувающего газа; 5 – насадка трубки жидкотекучего материала; 6 – трубка жидкотекучего материала; 7 – трубка распыляющего газа; 8 – заземляющий электрод; 9 – индукционный электрод; 10 – индукционное кольцо

Figure 3. Electrostatic spray nozzle [21]: 1 – opening of the induction ring; 2 – atomizing gas cap; 3 – the nozzle head; 4 – the purge gas tube; 5 – a fluid tip; 6 – a fluid tube; 7 – the atomizing gas tube; 8 – electrical ground electrode; 9 – the induction field electrode; 10 – the induction ring

Данная форсунка имеет электростатическое распылительное сопло, включающее индукционное кольцо 10, выполненное в виде электропроводящего металлического удерживающего колпачка, расположенного в выходном отверстии распылительного сопла. Электростатический заряд распыляемых капель достигается за счет создания электродом индукционного поля и передачи электростатического заряда по электропроводящей поверхности трубки распыляющего газа. Под действием кулоновских сил наиболее полярный компонент (в большинстве случаев растворитель) оказывается на поверхности капли, а компонент, имеющий наименьший электрический дипольный момент, концентрируется в центре капли. Преимуществом данного метода является возможность снижения рабочих температур сушки, что позволяет применять его для термочувствительных веществ, а также обеспечивать физическую стабильность продукта.

Следующая за диспергированием жидкотекучего материала стадия преобразования капель в частицы включает в себя контакт капель жидкотекучего материала с сушильным агентом и испарение влаги из капель жидкотекучего материала. Существуют три основных типа распылительных сушилок, классифицированных по принципу движения сушильного агента и осушаемого жидкотекучего материала (рисунок 4): параллельный ток, противоточный, смешанный ток [1, 2, 16].

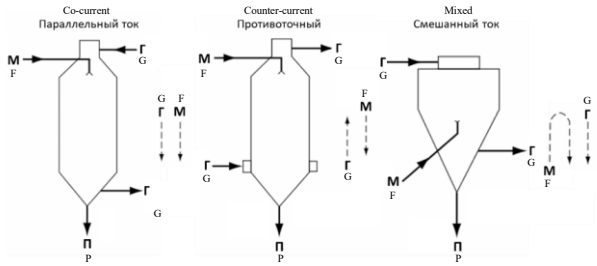


Рисунок 4. Схемы работы сушильных камер: Г – газ; М – материал; П – продукт

Figure 4. Drying chamber layouts: G – gas; F – feed; P – products

Направление сушильного агента и равномерность скорости сушильного агента по поперечному сечению сушильной камеры очень важны для определения качества конечного продукта и оказывает глубокое влияние на свойства конечных частиц. При параллельном токе сушильный агент и диспергированный жидкотекучий материал движутся в одном направлении сушильной камеры. Данный тип аппарата подходит для термочувствительных материалов, поскольку капли не подвергаются воздействию высоких температур на входе в сушильную камеру из-за эффекта испарительного охлаждения [22]. Аппараты с параллельным током являются наиболее универсальными и наиболее часто используемыми, в частности

в пищевой (сушка яичного белка, молока, сока и др.), химической (производство пестицидов, красителей, керамических материалов) и фармацевтической (биопрепараты, фармацевтические порошки для ингаляторного введения) промышленностях. Противоточный тип движения представляет собой встречное направление потоков сушильного агента и диспергированного жидкотекучего материала, при котором капля сталкивается с нагретым сушильным агентом в конце процесса сушки, и, как правило, подвергается более высокому тепловому воздействию [4]. Принцип противотока обычно применяется в производстве термостойких материалов, таких как моющие средства [23]. Основными преимуществами противотока являются сокращение энергетических затрат и возможность внедрения нескольких операций в одном аппарате, например сушки, агломерации, разделения на фракции. При осуществлении рециркуляции потока частиц в сушильной камере возникает так называемый принцип смешанного тока. Применение принципа смешанного тока в исследовании [24] привело к увеличению производительности микрокапсулированных порошков пробиотиков с сохранением активности ферментов в процессе сушки.

Сухие частицы, образующиеся в процессе распылительной сушки, необходимо отделить от газовой фазы, содержащей охлажденный сушильный агент и выпаренный растворитель. Сепарация может осуществляться как внутри сушильной камеры, так и снаружи в разделительном устройстве. Крупные частицы оседают на дне сушильной камеры затем попадают в приемный бункер или удаляются со дна сушильной камеры при помощи специальных приспособлений (скребки, устройства, модифицирующие дно сушильной камеры, вибрационные устройства). Ко внешним разделительным устройствам относятся: циклоны, рукавные фильтры, электрофильтры, мокрые скрубберы и орошаемые вентиляторы [1, 5, 22, 25].

Новые разработки в технологии распылительной сушки

Процесс распылительной сушки помимо задачи получения частиц применяется для получения аморфных твердых дисперсий, микронизации, агломерации и гранулирования, инкапсуляции жидких и твердых веществ. Преимущество распылительной сушки заключатся в том, что эта технология позволяет работать с термочувствительными и термостойкими жидкотикучеми материалами, получая сухой порошок продукта с контролируемым размером частиц, формой, влажностью и другими специфическими свойствами; обеспечивает непрерывную работу, адаптируемую как к ручному, так и автоматизированному управлению; работает в широком диапазоне производительностей и обеспечивает широкую вариативность конструкций аппаратов, удовлетворяя индивидуальные требования к сырью и продукту [1,2].

Примеры продукции, высушенной распылением в промышленных масштабах, приведены в таблице 2 [1, 2, 4, 5, 26].

Таблица 2.

Примеры применения распылительной сушки

Table 2.

Application examples of spray drying

Химическая промышленность Chemical industry	Фенолформальдегидные смолы, катализаторы, поливинилхлориды, аминокислоты, оксиды алюминия, карбиды, оксиды железа, каолин, красители и пигменты (хромовый желтый, диоксид титана), удобрения (нитраты, соли аммония, фосфаты), ферменты моющих средств, отбеливатели, эмульгаторы Phenol-formaldehyde resins, catalysts, polyvinyl chlorides, amino acids, aluminum oxides, carbides, iron oxides, kaolin, dyestuffs and pigments (chrome yellow, titanium dioxide), fertilizers (nitrates, ammonium salts, phosphates), detergent enzymes, bleach powder, emulsifying agent
Пищевая промышленность Food industry	Молоко, сыворотка, яйца, соевый белок, фрукты и овощи (банан, томаты, кокосовое молоко), глюкоза, мальтодекстрин, кофе, чай Milk, whey, egg, soya protein, fruits and vegetables (banana, tomato, coconut milk), glucose, maltodextrin, coffee, tea
Фармацевтическая промышленность Pharmaceutical industry	Пенициллин, ферменты, гормоны, аминокислоты, белки, плазма крови, антибиотики, вакцины | Penicillin, enzymes, hormones, amino acids, proteins, blood plasma, antibiotics, vaccines

Хотя распылительная сушка является методом сушки со значительным преимуществом для многих жидкотекучих материалов, она все же имеет некоторые ограничения и недостатки. Некоторые из них уже были преодолены, но некоторые все еще требуют внимания и дальнейших исследований, такие как проблемы с неподходящим размером частиц и их распределением по размеру, потеря качества продукта из-за нагрева, сложность оптимизации условий для различных типов жидкотекучих материалов, снижение потребления энергии [22].

В технологии сушки трудно провести четкое различие между тем, что является традиционной технологией, и тем, что действительно является новой, поскольку большинство новых разработок являются эволюционными, т. е. основанными на традиционных технологиях [27]. В следующих абзацах описаны модификации в технологии распылительной сушки.

В работе [28] представлен обзор модификаций распылительной сушки, направленных на повышение производительности и улучшение свойств порошка: распылительная сушка с импульсным горением и экструзионная порификация.

Экструзионная порификация – технология, состоящая из трех стадий: вакуумное выпаривание сырья до достижения им вязкости 2–5 Па • с (с возможностью работы до 20 Па • с); двухшнековая экструзия-аэрация вязкого продукта, проводимая в присутствии газа (обычно CO_2 или N_2); сушка, при которой текстурированная пена с высоким содержанием твердых частиц, полученная на предыдущем этапе, впрыскивается в распылительную башню. Данная технология позволяет значительно снизить температуру продукта на выходе за счет более быстрого переноса влаги во время сушки в образующейся пористой структуре частиц продукта [28].

Распылительная сушка с импульсным горением состоит из технологии распылительной сушки в сочетании с импульсной установкой сгорания для генерации потока газа, исключающей распылительное устройство. Метод основан на прерывистом сгорании – периодическом зажигании и сгорании смеси топлива и воздуха, которые распространяют горячий газ и генерируют акустические волны в сушильной камере, непосредственно использующиеся для диспергирования и сушки газа [29]. Такие условия приводят к образованию корки на поверхности капель и формированию полых либо сжатых частиц [30]. Преимуществами распылительной сушки с импульсным горением являются высокая энергетическая эффективность и возможность работы с сырьем высокой вязкости или высоким содержанием твердых веществ. Недостатком, ограничивающим широкое использование распылительной сушки с импульсным горением, является высокий уровень шума, создаваемого этими типами сушилок.

Распылительная сушка для получения наночастиц – технология распылительной сушки, которая позволяет получать наноразмерные частицы в диапазоне размеров 300 нм – 5 мкм. Принцип данной модификации аналогичен принципу обычной распылительной сушки. Отличие конструкции аппарата распылительной сушилки для получения наночастиц заключается в цилиндрической сушильной камере, модификации распылительного устройства и системы нагрева и подачи сушильного агента, сборе частиц электростатическим коллектором. Оборудование для распылительной сушилки для получения наночастиц было впервые представлено компанией Büchi technology (Nano Spray Dryer B-90) на рисунке 5.



Рисунок 5. Распылительная сушилка Nano Spray Dryer B-90 а) оригинальная ультразвуковая форсунка; б) схематическое изображение распылительной сетки для генерации капель [31]

Figure 5. Nano Spray Dryer B-90 a) original ultrasonic nozzle; b) schematic representation of the spray mesh for the generation of droplets

Распылительное устройство (рисунок 5а) представляет собой распыляющую головку с пьезоэлектрическим приводом, включающем тонкую вибрационную перфорированную мембрану (сетку). Сетка изготовлена из тонкой нержавеющей стали, перфорированной микрометровыми отверстиями, сделанных лазерным сверлением. Отверстия имеют конусообразную форму, с большим диаметром, обращённым к стороне подачи жидкотекучего материала, и более узким диаметром, обращённым к стороне выброса капель. Колебания ультразвуковой частоты деформируют распылительную сетку на несколько микрон (рисунок 5б), заставляя каждое отверстие действовать как микронасос и формируя капли одинакового размера из каждого отверстия.

Модификация системы нагрева и подачи сушильного агента в распылительных сушилках для получения наночастиц направлена на создание ламинарного потока сушильного агента, позволяющего ограничивать траекторию движения частиц в пределах профиля и снижать контакт частиц со стенками сушильной камеры. В Nano Spray Dryer B-90 ламинарный поток сушильного агента создается с помощью пористого металлического диска, который также содержит электрическую нагревательную спираль,

обеспечивающую эффективную теплопередачу от горячей металлической поверхности к сушильному агенту [32].

Распылительная сублимационная сушка представляет собой перспективную технологию, предназначенную для производства широкого спектра фармацевтических препаратов, пищевых продуктов и активных компонентов с высоким качеством и повышенной стабильностью благодаря их уникальным структурным характеристикам, такими как высокая пористость, пониженная плотность и сферическая форма, а также таких материалов как керамика, катализаторы и изоляционные материалы. Распылительная сублимационная сушка – это периодический или непрерывный процесс, являющийся комбинацией процессов распылительной и сублимационной (атмосферной или вакуумной) сушек. В работе [33] подробно описан процесс распылительной сублимационной сушки, который включает в себя следующие этапы: распыление, замораживание, сублимационная сушка. В работах [34,35] представлены исследования процесса распылительной атмосферной сублимационной сушки и конструкции аппаратов лабораторного масштаба. Недостатком распылительной сублимационной сушки являются сложные эксплуатационные требования, ограничивающие масштабируемость, и высокие капитальные затраты. Первая установка распылительной сублимационной сушки промышленного масштаба компании [36] представляет собой объединенные в одну изолированную технологическую линию камеру заморозки капель диспергированного жидкотекучего материала (SprayCon) и цилиндрический вращающийся барабан динамической сублимационной сушки замороженных микросфер (LyoMotion). После завершения сушки полученный однородный сыпучий продукт загружают в контейнер, который может быть соединен со стерильным изолятором для наполнения порошком [37].

Вакуумная распылительная сушка является перспективной модификацией, позволяющей снижать температуру сушки и уменьшать риск потенциального окисления чувствительных соединений. Давление в сушильной камере поддерживается низким. Растворитель испаряется из распыленных капель из-за разницы давлений водяного пара в каплях и в сушильной камере. Недостатком метода является высокая стоимость техники, поэтому он не широко применяется в промышленности [38].

Распылительная сушка перегретым паром – модификация, в которой в качестве сушильного агента используется перегретый пар. В работе [39] утверждается, что распылительная сушка перегретым паром может снизить энергозатраты процесса на 20–30 %, а в случаях повторного использования пара – до 80 %. Существенным преимуществом этого решения является отсутствие контакта высушиваемого вещества с воздухом и, следовательно, отсутствие риска окисления. Однако его недостаток заключается в требовании к эксплуатации при высоких температурах.

Заключение

Обзор литературы о последних достижениях в области распылительной сушки показывает, что с момента раннего развития система распылительной сушки эволюционировала. Эта эволюция является многонаправленной и направлена на преодоление конкретных недостатков традиционной технологии распылительной сушки. На сегодняшний день нет универсального подхода, и он должен быть выбран в зависимости от требований к процессу и конечному продукту.

В данной статье представлены принцип работы и устройство аппарата распылительной сушки, а также новые разработки в технологии распылительной сушки. В работе описаны стадии процесса распылительной сушки, рассмотрены различные типы распылительных устройств, их характеристики и особенности, представлены конфигурации сушильных камер распылительных сушилок и их сферы применения. Описаны такие модификации распылительных сушилок как: распылительная сушка с импульсным горением, экструзионная порификация, нанораспылительная сушка, распылительная сублимационная сушка, вакуумная распылительная сушка и распылительная сушка перегретым паром. Данные модификации улучшают процесс распылительной сушки и точность качественных характеристик частиц продукта.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSSM-2025–0003).

Литература

1 Лыков М.В., Леончик Б.И. Распылительные сушилки. Основы теории и расчета. Москва: Машиностроение, 1966. 331 с.

2 Filková I., Huang L.X., Mujumdar A.S. Industrial spray drying systems // Handbook of industrial drying. 2006. V. 3. P. 215–256.

3 Camacho-Lie M., Allendes A., Mancilla C., Illanes A., Vera C. Factors influencing droplet size in pneumatic and ultrasonic atomization and its application in food processing // Discover Food. 2023. V. 3. № 1. P. 23. doi: 10.1007/s44187-023-00065-5.

4 Ziaee A., Seyed A., Mortazavi A., Tabatabaeekoloor R. Spray drying of food: principles and applications // Drying Technology in Food Processing. Woodhead Publishing, 2023. P. 23–155. doi: 10.1016/B978-0-12-819895-7.00010-9.

5 Bhandari B.R., Patel K.C., Chen X.D. Spray drying of food materials-process and product characteristics // Drying technologies in food processing. 2008. V. 4. P. 113–157.

6 Тимонин А.С., Божко Г.В., Борщев В.Я. и др. Оборудование нефтегазопереработки, химических и нефтехимических производств: учебник для вузов. В 2 кн. Кн. 2. Москва: Инфра-Инженерия, 2019. 476 с.

7 Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларус. навука, 2010. 443 с.

8 Khaire R.A., Gogate P.R. Novel approaches based on ultrasound for spray drying of food and bioactive compounds // Drying Technology. 2021. V. 39. № 12. P. 1832–1853. doi: 10.1080/07373937.2020.1804926.

9 RPM Solutions, Inc. URL: https://www.rpmsolutions.com/products-services/atomizer-parts-new/240mm-titanium-wheel/ (дата обращения: 12.08.2025).

10 GEA. URL: https://www.gea.com/en/assets/170518/ (дата обращения: 12.09.2025).

11 Salman A.D., Hounslow M., Seville J.P.K. (ed.). Granulation. Elsevier, 2006. 1592 c.

12 Spraying Systems Co. Бюллетень продукции. URL: https://www.spray.com/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b695c_spraydry_bulletin.pdf (дата обращения: 12.09.2025).

13 Hoerbiger. URL: https://www.piezoproducts.com/products-solutions/ultrasonic-atomizers/ (дата обращения: 12.09.2025).

14 Lastow O., Andersson J., Nilsson A., Balachandran W. Low-Voltage Electrohydrodynamic (EHD) Spray Drying of Respirable Particles // Pharmaceutical Development and Technology. 2007. V. 12. № 2. P. 175–181. doi: 10.1080/10837450701212594.

15 Chutani D., Huppertz T., Murphy E. Application of Electric Field Technologies in the Manufacture of Food Powders and the Retention of Bioactive Compounds // Powders. 2023. V. 2. № 1. P. 135–150. doi: 10.3390/powders2010010.

16 Cal K., Sollohub K. Spray drying technique. I: Hardware and process parameters // Journal of Pharmaceutical Sciences. 2010. V. 99. № 2. P. 575–586. doi: 10.1002/jps.21886.

17 Boda S.K., Li X., Xie J. Electrospraying an enabling technology for pharmaceutical and biomedical applications: A review // Journal of Aerosol Science. 2018. V. 125. P. 164–181. doi: 10.1016/j.jaerosci.2018.04.002.

18 Bhushani J.A., Anandharamakrishnan C. Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food based applications // Trends in Food Science and Technology. 2014. V. 38. № 1. P. 21–33. doi: 10.1016/j.tifs.2014.03.004.

19 Masum A.K.M., Saxena J., Zisu B. Electrostatic spray drying of high oil load emulsions, milk and heat sensitive biomaterials // Food Engineering Innovations Across the Food Supply Chain. 2022. P. 237–246. doi: 10.1016/B978-0-12-821292-9.00022-4.

20 Jayaprakash P., Pandit P., Durgalakshmi D., Vijayakumar P.S., Balakrishnan A., Rameshbabu P., Shanmugam R., Gopi S. Encapsulation of bioactive compounds using competitive emerging techniques: Electrospraying, nano spray drying, and electrostatic spray drying // Journal of Food Engineering. 2023. V. 339. P. 111260. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111260.

21 Пат. US20230240314A1 (США). Electrostatic spray dried active compound powders and production method thereof / Zisu B., Masum A.K.M., Pham B.L., Thenin M., Maudhuit A., Beaupeux E., Ackerman T.E., Rusch J.T., Wee Sit L.J.; заявл. 21.10.2021; опубл. 27.07.2023.

22 Bellinghausen R. Spray drying from yesterday to tomorrow: An industrial perspective // Drying Technology. 2019. V. 37. № 5. P. 612–622. doi: 10.1080/07373937.2018.1517778.

23 Wawrzyniak P., Jaskulski M., Piatkowski M., Sobulska M., Zbicinski I., Egan S. Experimental detergent drying analysis in a counter-current spray dryer with swirling air flow // Drying Technology. 2019. V. 38. № 2. P. 108–116. doi: 10.1080/07373937.2019.1626878.

24 Jiang N., Kumar G.D., Chen J., Mishra A., Solval K.M. Comparison of concurrent and mixed-flow spray drying on viability, growth kinetics and biofilm formation of Lactobacillus rhamnosus GG microencapsulated with fish gelatin and maltodextrin // LWT. 2020. V. 124. P. 109200. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109200.

25 Santos D., Maurício A.C., Sencadas V., Santos J.D., Fernandes M.H., Gomes P.S. Spray Drying: An Overview // Biomaterials – Physics and Chemistry. New Edition. 2018. P. 237–258. doi: 10.5772/intechopen.72247.

26 Samborska K., Poozesh S., Barańska A., Sobulska M., Jedlińska A., Arpagaus C., Malekjani N., Jafari S.M. 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.

27 Mujumdar A.S. An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs // Transport in Porous Media. 2007. V. 66. P. 3–18. doi: 10.1007/s11242-006-9018-y.

28 Dantas A., Piella-Rifà M., Pontes Costa D., Felipe X., Gou P. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application // Applied Food Research. 2024. V. 4. № 1. P. 100382. doi: 10.1016/j.afres.2023.100382.

29 Wu Z., Yue L., Li Z., Li J., Mujumdar A.S., Rehkopf J.A. Pulse combustion spray drying of egg white: energy efficiency and product quality // Food and Bioprocess Technology. 2014. V. 8. № 1. P. 148–157. doi: 10.1007/s11947-014-1384-9.

30 Boel E., Koekoekx R., Dedroog S., Babkin I., Vetrano M.R., Clasen C., Van den Mooter G. Unraveling Particle Formation: From Single Droplet Drying to Spray Drying and Electrospraying // Pharmaceutics. 2020. V. 12. № 7. P. 625. doi: 10.3390/pharmaceutics12070625.

31 Piñón-Balderrama C.I., Leyva-Porras C., Terán-Figueroa Y., Espinosa-Solís V., Álvarez-Salas C., Saavedra-Leos M.Z. Encapsulation of Active Ingredients in Food Industry by Spray-Drying and Nano Spray-Drying Technologies // Processes. 2020. V. 8. № 8. P. 889. doi: 10.3390/pr8080889.

32 Samborska K., Poozesh S., Barańska A., Sobulska M., Jedlińska A., Arpagaus C., Malekjani N., Jafari S.M. 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.

33 Ioannou Sartzi M., Drettas D., Stramarkou M., Krokida M. A Comprehensive Review of the Latest Trends in Spray Freeze Drying and Comparative Insights with Conventional Technologies // Pharmaceutics. 2024. V. 16. № 12. P. 1533. doi: 10.3390/pharmaceutics16121533.

34 Троянкин А.Ю. Процесс получения макропористых частиц гидрогелей на основе поливинилового спирта: автореф. дис. … канд. техн. наук. Москва, 2012. 18 с.

35 Leuenberger H., Plitzko M., Puchkov M. Spray freeze drying in a fluidized bed at normal and low pressure // Drying Technology. 2006. V. 24. № 6. P. 711–719. doi: 10.1080/07373930600684932.

36 Meridion Technologies. URL: http://meridion-technologies.de/de/produkte.php (дата обращения: 25.08.2025).

37 Adali M.B., Barresi A.A., Boccardo G., Pisano R. Spray Freeze-Drying as a Solution to Continuous Manufacturing of Pharmaceutical Products in Bulk // Processes. 2020. V. 8. № 6. P. 709. doi: 10.3390/pr8060709.

38 Ramos F.M., Júnior V.S., Prata A.S. Impact of vacuum spray drying on encapsulation of fish oil: Oxidative stability and encapsulation efficiency // Food Research International. 2021. V. 143. P. 110283. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110283.

39 Sobulska M., Wawrzyniak P., Woo M.W. Superheated Steam Spray Drying as an Energy-Saving Drying Technique: A Review // Energies. 2022. V. 15. № 22. P. 8546. doi: 10.3390/en15228546.

References

1 Lykov M.V., Leonchik B.I. Spray dryers. Fundamentals of theory and calculation. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 331 p. (in Russian).

2 Filková I., Huang L.X., Mujumdar A.S. Industrial spray drying systems. Handbook of industrial drying. 2006. vol. 3. pp. 215–256.

3 Camacho-Lie M. et al. Factors influencing droplet size in pneumatic and ultrasonic atomization and its application in food processing. Discover Food. 2023. vol. 3. no. 1. 23. doi: 10.1007/s44187-023-00065-5

4 Ziaee A. et al. Spray drying of food: principles and applications. Drying Technology in Food Processing. Cambridge: Woodhead Publishing, 2023. pp. 23–155. doi: 10.1016/B978-0-12-819895-7.00010-9

5 Bhandari B.R., Patel K.C., Chen X.D. Spray drying of food materials-process and product characteristics. Drying technologies in food processing. 2008. vol. 4. pp. 113–157.

6 Timonin A.S., Bozhko G.V., Borshchev V.Ya. et al. Equipment for oil and gas refining, chemical and petrochemical production: a textbook for universities in two books. Book 2. Vologda: Infra-Engineering, 2019. 476 p. (in Russian).

7 Akulich P.V. Calculations of drying and heat exchange units. Minsk: Belarusian Science, 2010. 443 p. (in Russian).

8 Khaire R.A., Gogate P.R. Novel approaches based on ultrasound for spray drying of food and bioactive compounds. Drying Technology. 2021. vol. 39. no. 12. pp. 1832–1853. doi: 10.1080/07373937.2020.1804926

9 RPM Solutions, Inc. Company website. Available at: https://www.rpmsolutions.com/products-services/atomizer-parts-new/240mm-titanium-wheel/ (accessed 12.09.2025).

10 GEA. Company website. Available at: https://www.gea.com/en/assets/170518/ (accessed 12.09.2025).

11 Salman A.D., Hounslow M., Seville J.P.K. (eds.). Granulation. Amsterdam: Elsevier, 2006. vol. 11.

12 Spraying Systems Co. Company website. Available at: https://www.spray.com/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b695c_spraydry_bulletin.pdf (accessed 12.09.2025).

13 Hoerbiger. Company website. Available at: https://www.piezoproducts.com/products-solutions/ultrasonic-atomizers/ (accessed 12.09.2025).

14 Lastow O., Andersson J., Nilsson A., Balachandran W. Low-Voltage Electrohydrodynamic (EHD) Spray Drying of Respirable Particles. Pharmaceutical Development and Technology. 2007. vol. 12. no. 2. pp. 175–181. doi: 10.1080/10837450701212594

15 Chutani D., Huppertz T., Murphy E. Application of Electric Field Technologies in the Manufacture of Food Powders and the Retention of Bioactive Compounds. Powders. 2023. vol. 2. no. 1. pp. 135–150. doi: 10.3390/powders2010010

16 Cal K., Sollohub K. Spray drying technique. I: Hardware and process parameters. Journal of pharmaceutical sciences. 2010. vol. 99. no. 2. pp. 575–586. doi: 10.1002/jps.21886

17 Boda S.K., Li X., Xie J. Electrospraying an enabling technology for pharmaceutical and biomedical applications: A review. Journal of aerosol science. 2018. vol. 125. pp. 164–181. doi: 10.1016/j.jaerosci.2018.04.002

18 Bhushani J.A., Anandharamakrishnan C. Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food based applications. Trends in Food Science and Technology. 2014. vol. 38. no. 1. pp. 21–33. doi: 10.1016/j.tifs.2014.03.004

19 Masum A.K.M., Saxena J., Zisu B. Electrostatic spray drying of high oil load emulsions, milk and heat sensitive biomaterials. Food Engineering Innovations Across the Food Supply Chain. 2022. pp. 237–246. doi: 10.1016/B978-0-12-821292-9.00022-4

20 Jayaprakash P. et al. Encapsulation of bioactive compounds using competitive emerging techniques: Electrospraying, nano spray drying, and electrostatic spray drying. Journal of Food Engineering. 2023. vol. 339. 111260. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111260

21 Zisu B., Masum A.K.M., Pham B.L., Thenin M., Maudhuit A., Beaupeux E., Ackerman T.E., Rusch J.T., Wee Sit L.J. Electrostatic spray dried active compound powders and production method thereof. U.S. Patent No. US20230240314A1, 2023.

22 Bellinghausen R. Spray drying from yesterday to tomorrow: An industrial perspective. Drying Technology. 2019. vol. 37. no. 5. pp. 612–622. doi: 10.1080/07373937.2018.1517778

23 Wawrzyniak P., Jaskulski M., Piatkowski M., Sobulska M., Zbicinski I., Egan S. Experimental detergent drying analysis in a counter-current spray dryer with swirling air flow. Drying Technology. 2019. vol. 38. no. 1–2. pp. 108–116. doi: 10.1080/07373937.2019.1626878

24 Jiang N., Kumar G.D., Chen J., Mishra A., Solval K.M. Comparison of concurrent and mixed-flow spray drying on viability, growth kinetics and biofilm formation of Lactobacillus rhamnosus GG microencapsulated with fish gelatin and maltodextrin. LWT. 2020. vol. 124. 109200. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109200

25 Santos D., Maurício A.C., Sencadas V. et al. Spray Drying: An Overview. Biomaterials – Physics and Chemistry. New Edition. 2018. doi: 10.5772/intechopen.72247

26 Samborska K., Poozesh S., Barańska A., Sobulska M., Jedlińska A., Arpagaus C., Malekjani N., Jafari S.M. Innovations in spray drying process for food and pharma industries. Journal of Food Engineering. 2022. vol. 321. 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960

27 Mujumdar A.S. An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs. Transport in Porous Media. 2007. vol. 66. no. 1–2. pp. 3–18. doi: 10.1007/s11242-006-9018-y

28 Dantas A., Piella-Rifà M., Pontes Costa D., Felipe X., Gou P. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. Applied Food Research. 2024. vol. 4. no. 1. 100382. doi: 10.1016/j.afres.2023.100382

29 Wu Z., Yue L., Li Z., Li J., Mujumdar A.S., Rehkopf J.A. Pulse combustion spray drying of egg white: energy efficiency and product quality. Food and Bioprocess Technology. 2014. vol. 8. no. 1. pp. 148–157. doi: 10.1007/s11947-014-1384-9

30 Boel E., Koekoekx R., Dedroog S., Babkin I., Vetrano M.R., Clasen C., Van den Mooter G. Unraveling Particle Formation: From Single Droplet Drying to Spray Drying and Electrospraying. Pharmaceutics. 2020. vol. 12. no. 7. 625. doi: 10.3390/pharmaceutics12070625

31 Piñón-Balderrama C.I., Leyva-Porras C., Terán-Figueroa Y., Espinosa-Solís V., Álvarez-Salas C., Saavedra-Leos M.Z. Encapsulation of Active Ingredients in Food Industry by Spray-Drying and Nano Spray-Drying Technologies. Processes. 2020. vol. 8. no. 8. 889. doi: 10.3390/pr8080889

32 Samborska K., Poozesh S., Barańska A., Sobulska M., Jedlińska A., Arpagaus C., Malekjani N., Jafari S.M. Innovations in spray drying process for food and pharma industries. Journal of Food Engineering. 2022. vol. 321. 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960

33 Ioannou Sartzi M., Drettas D., Stramarkou M., Krokida M. A Comprehensive Review of the Latest Trends in Spray Freeze Drying and Comparative Insights with Conventional Technologies. Pharmaceutics. 2024. vol. 16. no. 12. 1533. doi: 10.3390/pharmaceutics16121533

34 Troyankin A.Yu. The process of obtaining macroporous hydrogel particles based on polyvinyl alcohol. Abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences. Moscow: Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2012. 18 p. (in Russian).

35 Leuenberger H., Plitzko M., Puchkov M. Spray freeze drying in a fluidized bed at normal and low pressure. Drying Technology. 2006. vol. 24. no. 6. pp. 711–719. doi: 10.1080/07373930600684932

36 Meridion Technologies. Company website. Available at: http://meridion-technologies.de/de/produkte.php (accessed 25.09.2025).

37 Adali M.B., Barresi A.A., Boccardo G., Pisano R. Spray Freeze-Drying as a Solution to Continuous Manufacturing of Pharmaceutical Products in Bulk. Processes. 2020. vol. 8. no. 6. 709. doi: 10.3390/pr8060709

38 Ramos F.M., Júnior V.S., Prata A.S. Impact of vacuum spray drying on encapsulation of fish oil: Oxidative stability and encapsulation efficiency. Food Research International. 2021. vol. 143. 110283. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110283

39 Sobulska M., Wawrzyniak P., Woo M.W. Superheated Steam Spray Drying as an Energy-Saving Drying Technique: A Review. Energies. 2022. vol. 15. no. 22. 8546. doi: 10.3390/en15228546

Сведения об авторах

Анастасия В. Мосюрова. инженер, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, г. Москва, 125480, Россия, mosiurova.a.v@muctr.ru
https://orcid.org/0009-0008-2032-6821

Наталья В. Меньшутина д.т.н., профессор, зав. кафедрой, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, г. Москва, 125480, Россия, chemcom@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0001-7806-1426

Information about authors

Anastasiia V. Mosyurova engineer, chemical and pharmaceutical engineering department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, st. Geroev Panfilovtsev, 20, Moscow, 125480, Russia, mosiurova.a.v@muctr.ru
https://orcid.org/0009-0008-2032-6821

Natalia V. Menshutina Dr. Sci. (Engin.), professor, head of the department, chemical and pharmaceutical engineering department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, st. Geroev Panfilovtsev, 20, Moscow, 125480, Russia, chemcom@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0001-7806-1426

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 04/08/2025	**После редакции** 10/08/2025	**Принята в печать** 03/09/2025

Received 04/08/2025	**Accepted in revised** 10/08/2025	**Accepted** 03/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-217-223 Оригинальная статья/Research article
УДК 542.06 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Синтез трифторметансульфоната висмута

Светлана Е. Плотникова [1] burkovasweta@ya.ru 0000-0002-6331-554x
Елена М. Горбунова [1] gorbunova_elena2024@mail.ru 0000-0002-3550-0115
Сабухи И. Нифталиев [1] niftaliev@mail.com 0000-0001-7887-3061
Ирина В. Кузнецова [1] kuznetsovaiv@mail.ru 0000-0001-6666-6292
Анастасия М. Лучко [1] am.luchko@mail.ru 0009-0009-5197-4765

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

Аннотация. Трифторметансульфонат висмута (III), называемый также трифлатом висмута, является экономичным, эффективным и экологически чистым катализатором синтеза органических продуктов. Трифлат висмута в России в настоящее время не производят, поэтому разработка технологии получения трифлата висмута является актуальной задачей. Трифлат висмута получали двумя способами - взаимодействием гидроксида висмута или оксида висмута с трифторметансульфоновой (трифликовой) кислотой. Получение трифлата висмута из гидроксида висмута является длительным процессом, который не протекает до конца и имеет выход не более 64 %. Оксид висмута, полученный термическим разложением гидроксида висмута, имеет несколько полиморфных модификаций. Нагревание проводили до 750 °С и охлаждали в течение 8 часов. Полученный таким образом γ-оксид висмута растворяется в трифликовой кислоте в течение 2 часов и образует растворы высокой концентрации. Определены значения растворимости трифлата висмута при различной кислотнотности раствора. Рентгенографическим исследованием. установлено, что образуется ноногидраттрифлата висмута - кристаллы игольчатой формы. α-фаза оксида висмута, полученная разложением гидроксида висмута при 450 °С, не растворялась в кислоте полностью. Процесс проводили в течение 4 часов, выход продукта 92 %. Образующиеся кристаллы бипирамидальной формы исследовали методом дифференциального термического анализа, который показал, что кристаллы представляют собой пентагидрат трифлата висмута, теряющий кристаллизационную воду в интервале температур 64–130 °С. До 320 °С вещество является термически устойчивым. При температуре 327 °С происходит плавление с разложением, что сопровождается образованием оксосульфатов висмута. По данным рентгенографической дифракции установлен состав образующихся фаз - $Bi_{28}O_{32}(SO_4)_{10}$ и $Bi_{34.7}O_{100}S_{16}$. При дальнейшем нагревании до 380 °С разложение оксосульфатов висмута приводит к образованию устойчивой моноклинной модификации оксида висмута α-Bi_2O_3.

Ключевые слова: трифторметансульфонат висмута (III), трифликовая кислота, α-фаза оксида висмута (III), γ-фаза оксида висмута (III), оксосульфат висмута, термический анализ.

Synthesis of Bismuth Trifluoromethanesulfonate

Svetlana E. Plotnikova [1] burkovasweta@ya.ru 0000-0002-6331-554x
Elena M. Gorbunova [1] gorbunova_elena2024@mail.ru 0000-0002-3550-0115
Sabukhi I. Niftaliev [1] niftaliev@mail.com 0000-0001-7887-3061
Irina V. Kuznetsova [1] kuznetsovaiv@mail.ru 0000-0001-6666-6292
Anastasiya M. Luchko [1] am.luchko@mail.ru 0009-0009-5197-4765

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

Abstract. Bismuth (III) trifluoromethanesulfonate, also known as bismuth triflate, is an economical, efficient, and environmentally friendly catalyst for the synthesis of organic products. Currently, bismuth triflate is not produced in Russia, so developing a technology for producing bismuth triflate is an important task. Bismuth triflate can be obtained using two methods: by reacting bismuth hydroxide with triflic acid, and by reacting bismuth oxide with triflic acid. The production of bismuth triflate from bismuth hydroxide is a long process that does not proceed to the end and has a yield of no more than 40%. The bismuth oxide obtained by thermal decomposition of bismuth hydroxide has several polymorphic modifications. Heating was carried out to 750 °C and cooled for 8 hours. The γ-bismuth oxide obtained in this way is dissolved in triflic acid for 2 hours and forms high-concentration solutions. The solubility values of bismuth triflate were determined at different acidity levels. X-ray analysis showed that bismuth nonahydrate triflate formed needle-like crystals. The α-phase of bismuth oxide obtained by decomposition of bismuth hydroxide at 450 °C did not dissolve completely in the acid. The process was carried out for 4 hours, and the yield was 92%. The resulting crystals of a bipyramidal shape were studied by differential thermal analysis, which showed that the crystals are pentahydrate of bismuth triflate, which loses crystallization water in the temperature range of 64-130 °C. Up to 320 °C, the substance is thermally stable. At a temperature of 327 °C, it melts with decomposition, which is accompanied by the formation of bismuth oxo-sulfates. According to X-ray diffraction data, the composition of the resulting phases is Bi28O32(SO4)10 and Bi34.7O100S16. Further heating to 380 °C leads to the decomposition of bismuth oxo-sulfates, resulting in the formation of the stable monoclinic modification of bismuth oxide, α-Bi_2O_3.

Keywords: введите здесь ключевые слова на английском языке.

Для цитирования
Плотникова С.Е., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И., Кузнецова И.В., Лучко А.М. Синтез трифторметансульфоната висмута // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 217–223. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-217-226

For citation
Plotnikova S.E., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I., Kuznetsova I.V., Luchko A.M. Synthesis of Bismuth Trifluoromethanesulfonate. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 217–223. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-217-223

© 2025, Плотникова С.Е. и др. / Plotnikova S.E. 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 одной из главных проблем химической отрасли является зависимость технологических цепочек от зарубежных поставок специальной химии и катализаторов. Государством разрабатываются национальные проекты, которые направлены на развитие малотоннажной и среднетоннажной химии.

Трифторметансульфонат висмута (III), называемый также трифлатом висмута, является экономичным, эффективным и экологически чистым катализатором синтеза органических продуктов: циклических карбонатов [1], 2,3 – ненасыщенных О-гликозидов [2], гомоаллиловых эфиров и гомоаллилацетатов из альдегидов [3], ацилирования бензойного и пивалинового ангидридов [4], реакция гликозилирования производных сиаловой кислоты [5]. В условиях санкций закупка вещества сопровождается многими рисками и сложностями. Трифлат висмута в России в настоящее время не производят. Поэтому разработка технологии получения трифлата висмута является актуальной задачей.

Несмотря на большую востребованность в современной препаративной химии трифлатов, состав, строение, термическая устойчивость и другие свойства трифлатов остаются малоизученными. Между тем трифлаты представляют также интерес с точки зрения кристаллохимии и физики низких температур [6].

Из литературных источников известен способ производства солей висмута, включающий следующие стадии: окисление металлического висмута с получением оксида; растворение оксида висмута в кислоте [7, 8].

Материалы и методы

Трифлат висмута синтезировали двумя способами: взаимодействием гидроксида висмута с трифликовой кислотой и взаимодействием оксида висмута с трифликовой кислотой. Оксид висмута получали разложением гидроксида висмута. Процесс происходит по схеме:

$$Bi_2O_3\cdot 3H_2O \xrightarrow[-H_2O]{100^0C} Bi_2O_3\cdot 2H_2O \xrightarrow[-H_2O]{310^0C} Bi_2O_3\cdot H_2O \xrightarrow[-H_2O]{420^0C} Bi_2O_3$$

Чистый оксид висмута имеет четыре кристаллических полиморфа, которые отличаются реакционной способностью.

При комнатной температуре оксид висмута Bi_2O_3 имеет моноклинную модификацию, обозначаемую α-Bi_2O_3. При нагревании выше 727 °C он превращается в кубическую кристаллическую структуру типа флюорита δ-Bi_2O_3, которая сохраняется до точки плавления 824 °C.

Поведение δ-Bi_2O_3 при охлаждении более сложное, с возможным образованием двух промежуточных метастабильных фаз: тетрагональная β-фаза или объемно-центрированная γ-кубическая фаза. γ-фаза может существовать при комнатной температуре с очень медленной скоростью охлаждения, но α-фаза всегда образуется при охлаждении β-фазы [9].

Рассчитанные количества веществ помещали в колбу с дефлегматором и перемешивали с кислотой, магнитной мешалкой 79–1 Hot Plate Magnetic Stirrer, при постоянной температуре (50 °C). Реакцию проводили до установления равновесия. Условием равновесия являлась постоянная концентрация ионов висмута.

Концентрацию ионов металла определяли комплексонометрическим титрованием с индикатором ксиленовым оранжевым [10, 11]. Индикатор образует с металлом комплекс, окрашенный в красный цвет:

$$Bi^{3+}H_6Ind = BiH_3Ind^+ + 3H^+$$

Свободные ионы висмута образуют бесцветный растворимый комплекс, ксиленовый оранжевый приобретает желтое окрашивание.

Для определения концентрации ионов водорода использовали кислотно-основное титрование раствором NaOH.

Синтезированный образец трифлата висмута исследовали методом термического анализа на измерительном комплексе синхронного термического анализа STA 449 F3 (Netzsch, Германия) в платиновом тигле, в потоке N_2, скорость нагрева 5 К/мин.

Рентгенофазовый анализ применяли для решения вопроса о фазовом составе полученного продукта. Эксперимент проводили на порошковом рентгеновском дифрактометре ARL X'tra, с длиной волны Cu (1,5406 А))

Тринокулярный микроскоп Levenhuk 740T использовали для исследования морфологии синтезированных материалов.

Результаты и обсуждения

По первому способу получение трифлата висмута из гидроксида висмута проводили согласно реакции:

$$Bi(OH)_3 + 3CF_3SO_3H = Bi(CF_3SO_3)_3 + 3H_2O$$

Перемешивание магнитной мешалкой проводили до установления равновесия (8 часов) при эквивалентном соотношении и при двукратном избытке кислоте, выход продукта составил 64 и 57% соответственно. Процесс не протекает до конца, о чем говорит наличие в растворе белого осадка. Возможно этим осадком является оксигидроксид висмута (III) BiO(OH).

Для увеличения выхода продукта предложено получать трифлат висмута из оксида висмута (второй способ).

Гидроксид висмута нагревали до 750 °С, выдерживали в течение 1 часа. Порошок имел при 750 °С красно-коричневый цвет, характерный для δ-Bi_2 O_3. Охлаждение до комнатной температуры проводили в течение 8 часов, т. к. при медленной скорости охлаждения возможно образование γ-фазы. При охлаждении цвет менялся на желтый (рисунок 1).

После охлаждения оксида приливали рассчитанный объем трифликовой кислоты, взятой с различным избытком и в эквивалентном соотношении оксида и кислоты (1:6) и перемешивали при 50 °С.

Уравнение взаимодействия оксида висмута (III) с кислотой имеет вид:

$$Bi_2O_3 + 6CF_3SO_3H = 2Bi(CF_3SO_3)_3 + 3H_2O$$



Рисунок 1. Фотография оксида висмута после прокаливания

Figure 1. Photo of bismuth oxide after calcination

По истечении 2 часов происходило полное растворение оксида и образование прозрачного раствора, что свидетельствует о полноте протекания реакции.

Данные по количеству исходных веществ и концентрации ионов Bi^{3+} и H^+ в полученных растворах представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты определения содержания ионов Bi^{3+} и ионов H^+

Table 1.

Results of determination of Bi^{3+} and H^+ ion content

Количество вещества Bi_2O_3, моль Amount of Bi_2O_3 substance, mol	Количество вещества HOTf, моль Amount of substance HOTf, mol	Молярная концентрация ионов Bi^{3+}, моль/дм^3 Molar concentration of Bi^{3+} ions, mol/dm^3	Molar concentration of H^+ ions, mol/dm^3
0,005	0,120	0,892	5,64
0,005	0,060	1,128	4,12
0,005	0,045	1,430	3,96
0,005	0,030	2,088	0,23*

Значение концентрации ионов водорода для раствора 4 (0,23*) рассчитано с учетом гидролиза соли, поскольку кислотно-основное титрование нельзя применить из-за образования осадка гидроксида висмута (III).

После охлаждения растворов до комнатной температуры на вторые сутки наблюдается образование кристаллов при почти полном отсутствии жидкой фазы. Кристаллы, полученные при значительном избытке кислоты, при нахождении на воздухе, снова переходят в жидкую фазу – «плавятся». Содержание ионов висмута (III) в этих кристаллах, определенное комплексонометрическим титрованием составляет 25,6%, что соответствует ноногидрату трифлата висмута. Кристаллы имеют игольчатую форму.



(1) (3)

Рисунок 2. Фотография кристаллов образцов (1) и (3)

Figure 2. Photos of crystals of samples (1) and (3)

Рентгенофазовый анализ продукта синтеза, полученного в кислой среде, показал, что образовался кристаллогидрат трифлата висмута с 9 молекулами воды.

Полученная дифрактограмма представлена на рисунке 3.

Таблица 2.

Фазовый состав продукта синтеза (Порошковый рентгеновский дифрактометр ARL X'tra, длина волны Cu (1,5406 A))

Table 2.

Phase composition of the synthesis product (ARL X'tra powder X-ray diffractometer, Cu wavelength (1.5406 A))

Ref. Code	Score	Compound Name	Displa-cement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
00–050–2218	69	Bismuth nonaaqua triflate	0.090	0.760	C_3 H_{18} BiF_9 O_{18} S_3

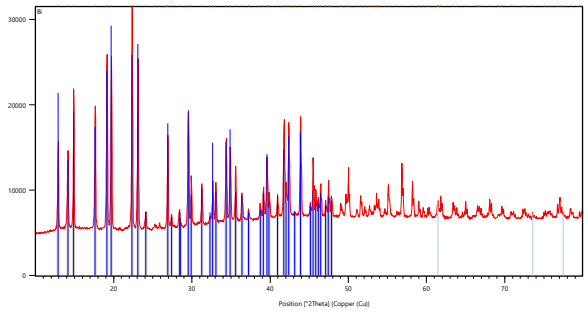


Рисунок 3. Дифрактограмма продукта синтеза, полученного при избытке кислоты

Figure 3. Diffractogram of the synthesis product obtained with an excess of acid

Опыт повторяли при прокаливании гидроксида висмута до 450 °С, в этом случае образуется α-фаза Bi_2O_3. Оксид и кислоту брали в эквивалентных количествах. Осадок желтого цвета в результате взаимодействия с кислотой приобретал белый цвет. Процесс проводили до установления равновесия (4 часа). Несмотря на добавление воды, небольшая часть осадка не растворилась, что свидетельствует о том, что α и γ-фаза оксида висмута имеют различный механизм взаимодействия с кислотой. В полученном растворе содержание ионов Bi^{3+} составило 1,471 моль/дм^3. Выход продукта 92%. При медленном выпаривании раствора получили кристаллы и высушили их в эксикаторе при комнатной температуре (рисунок 4). Кристаллы имеют форму тетрагональной бипирамиды.

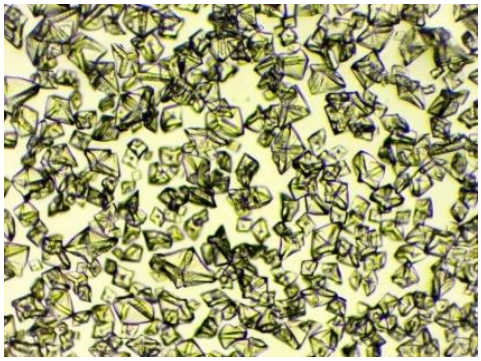


Рисунок 4. Фотография кристаллов, полученных при прокаливании гидроксида висмута до 450 °С

Figure 4. A Photograph of crystals obtained by calcination of bismuth hydroxide at 450 °C

Содержание воды в кристаллах, рассчитанное по концентрации висмута, составляет 12,31%, что близко к содержанию воды в пентагидрате трифлата висмута (12,04%).

Термический анализ соли, полученной из α-оксида висмута, представлен на рисунке 5.

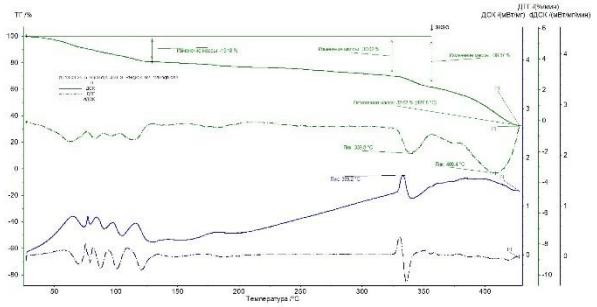


Рисунок 5. ТГ/ДСК диаграммы образца трифлата висмута, полученного из α-фазы Bi_2O_3

Figure 5. TG/DSC diagrams of a bismuth triflate sample obtained from the α-phase of Bi_2O_3

Результаты исследования приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты термического анализа трифлата висмута

Table 3.

Results of thermal analysis of bismuth triflate

Образец Sample	Тип теплового эффекта Type of thermal effect	Температурный интервал, °С	Потеря массы, %
$Bi(SO_3CF_3)_3 5H_2O$	Эндотермический	64–130	19,18
	Эндотермический	327–355	38,12
	Эндотермический	380–450	67,38

Изменение массы в области температур 64–130 °С связано с потерей кристаллизационной воды. На дифференциальной ТГ кривой насчитывается 5 пиков, что позволяет предположить, что исследуемое вещество определяется формулой $Bi(SO_3CF_3)_3 5H_2O$. Однако, потеря массы больше, чем для обезвоживания пентагидрата, она составляет 19,18%. При нагревании до 64 °С потеря массы составляет 6,66%, эффектов на этом интервале не наблюдается. Возможно, выделяется абсорбционная влага. Оставшаяся потеря массы 12,51% близка к содержанию воды в пентагидрате – 12,04%.

Дальнейшее нагревание сопровождается потерей массы при отсутствии пиков на дифференциальных кривых, что может быть связано с сублимацией соли или выделением углеродистых соединений фтора из иона трифлата. При температуре 327 °С происходит плавление с разложением, так как эндотермический эффект сопровождается уменьшением массы образца. По аналогии с термическим разложением сульфата висмута можно предположить образование оксосоли висмута.

Рентгенофазовый анализ прокаленного при 350 ˚С образца показал наличие в веществе трех фаз (таблица 4 и рисунок 7).

Установлено высокое содержание (суммарно более 99%) в образце двух оксосульфатов висмута, имеющих состав $Bi_{28}\ O_{32}(SO_4)_{10}$ и $Bi_{34.7}\ O_{100}\ S_{16}$. Ни одна из идентифицированных фаз не содержит ни фтора, ни углерода. Это говорит о том, что происходит разложение трифлата висмута с выделением в газообразную фазу соединений фтора и углерода.

При дальнейшем нагревании до 380 °С разложение оксосульфатов висмута приводит к образованию устойчивой моноклинной модификации оксида висмута α-Bi_2O_3.

Таблица 4.

Фазовый состав вещества, полученного при нагревании до 350 ℃
(Порошковый рентгеновский дифрактометр ARL X'tra, длина волны Cu (1,5406 А))

Table 4.

Phase composition of the substance obtained by heating to 350 ℃
(ARL X'tra powder X-ray diffractometer, Cu wavelength (1.5406 A))

Ref. Code	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01–077–1727	Bismuth Oxide Sulfate	-0.113	0.670	$Bi_{28}\ O_{32}(SO_4)_{10}$	37,4
01–075–0717	Bismuth Oxide Sulfide	0.045	0.428	$Bi_2\ O_2\ S$	0,5
98–004–9900	Bismuth Oxide Sulfate *	-0.055	0.339	$Bi_{34.7}\ O_{100}\ S_{16}$	62,0

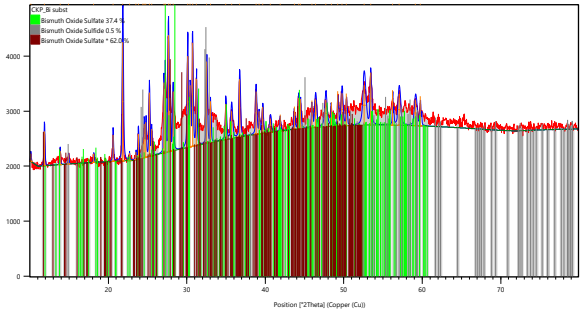


Рисунок 6. Дифрактограмма продукта вещества, полученного в результате прокаливания образца трифлата висмута при 350 ℃

Figure 6. Diffractogram of the product obtained by calcination of a bismuth triflate sample at 350 ℃

Заключение

Получение трифлата висмута из гидроксида висмута является длительным процессом, который не протекает до конца. О чем говорит наличие в растворе белого осадка, возможно этим осадком является оксигидроксид висмута (III) BiO(OH).

Для увеличения выхода продукта предложено синтезировать трифлат висмута из оксида висмута. Оксид висмута получали из гидроксида двумя различными режимами прокаливания: при нагревании до 750 ℃ образуется δ-$Bi_2\ O_3$, который при дальнейшем, медленном охлаждении переходит в γ-фазу. Полученный таким образом оксид растворяется в трифликовой кислоте в течение 2 часов и образует растворы высокой концентрации. В присутствии избытка кислоты растворимость трифлата висмута уменьшается. Образование трифлата висмута подтверждено рентгенографическим исследованием. Установлено, что образуется ноногидрат трифлата висмута. Кристаллы имеют игольчатую форму.

При нагревании гидроксида висмута до 450 °С образуется α-фаза оксида висмута (самая устойчивая). Она растворяется в кислоте в течение 4 часов. При выпаривании раствора образуются кристаллы бипирамидальной формы. Термический анализ показал, что кристаллы представляют собой пентагидрат трифлата висмута, теряющий адсорбционную и кристаллизационную воду в интервале температур 30–130 °С. До 320 °С вещество является термически устойчивым. При температуре 327 °С происходит плавление с разложением, что сопровождается образованием оксосульфатов висмута. По данным рентгенографической дифракции установлен состав образующихся фаз – $Bi_{28}O_{32}(SO_4)_{10}$ и $Bi_{34.7}O_{100}S_{16}$. При дальнейшем нагревании до 380 °С разложение оксосульфатов висмута приводит к образованию устойчивой моноклинной модификации оксида висмута α-Bi_2O_3.

Литература

1 Siddig L.A., Alzard R.H., Nguyen H.L. et al. Cyclic carbonate formation from cycloaddition of CO2 to epoxides over bismuth subgallate photocatalyst // Inorganic Chemistry Communications. 2022. V. 142. P. 109672. doi: 10.1016/j.inoche.2022.109672

2 Kumar M., Singh R., Sharma P. et al. Bismuth-catalyzed stereoselective 2-deoxyglycosylation of disarmed/armed glycal donors // Organic Letters. 2022. V. 24. № 2. P. 575–580. doi: 10.1021/acs.orglett.1c04008

3 Nakate A.K. Lewis acid-catalysed α and π activation triggered cascade annulation reactions of alkynyl alcohols to construct heterocyclic compounds // Tetrahedron Letters. 2023. V. 114. P. 154282.

4 Zenebe F.C., Taddesse A.M., Sivasubramanian M. et al. Highly efficient CdS/CeO2/Ag3PO4 nanocomposite as novel heterogenous catalyst for Knoevenagel condensation and acetylation reactions // Heliyon. 2024. V. 10. № 11. P. e31798. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31798

5 Steber H.B., Singh Y., Demchenko A.V. Bismuth(III) triflate as a novel and efficient activator for glycosyl halides // Organic & Biomolecular Chemistry. 2021. V. 19. № 14. P. 3220–3233. doi: 10.1039/d1ob00093d

6 Терещенко Д.С., Глазунова Т.Ю., Бузоверов М.Е. и др. Синтез и кристаллическое строение новых трехъядерных фторокарбоксилатных комплексов кобальта(II) и никеля(II) // Координационная химия. 2022. Т. 48. № 9. С. 534–542. doi: 10.31857/s0132344x22090079

7 Юхин Ю.М., Мищенко К.В., Даминов А.С. Получение растворов солей висмута с предварительным его окислением // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 4. С. 470–477. doi: 10.7868/s0040357117040157

8 Юхин Ю.М., Найденко Е.С., Даминов А.С. и др. Получение соединений висмута для техники и медицины // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. № 3. С. 345–351. doi: 10.15372/khur20180309

9 Weber M., Schmidt J., Wagner M. et al. Polymorphism and visible-light-driven photocatalysis of doped Bi2O3: M (M= S, Se, and Re) // Inorganic Chemistry. 2022. V. 61. № 3. P. 1571–1589. doi: 10.1021/acs.inorgchem.1c03330

10 Плотникова С.Е., Перегудов Ю.С., Горбунова Е.М. и др. Перспективы применения жидких отходов производства кальцинированной соды в качестве хладоносителя на основе тройной системы CaCl2-K2Cr2O7-H2O // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 3. С. 233–238. doi: 10.20914/2310-1202-2020-233-238

11 Плотникова С.Е., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И. и др. Исследование фазовых равновесий в водно-солевых системах, содержащих компоненты молочной сыворотки // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 4. С. 139–144. doi: 10.20914/2310-1202-2023-4-139-144

12 Leng D., Wang T., Du C. et al. Synthesis of β-Bi2O3 nanoparticles via the oxidation of Bi nanoparticles: Size, shape and polymorph control, anisotropic thermal expansion, and visible-light photocatalytic activity // Ceramics International. 2022. V. 48. № 13. P. 18270–18277. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.03.085

13 Gandhi A.C., Lai C.Y., Wu K. et al. Phase transformation and room temperature stabilization of various Bi2O3 nano-polymorphs: effect of oxygen-vacancy defects and reduced surface energy due to adsorbed carbon species // Nanoscale. 2020. V. 12. № 47. P. 24119–24137. doi: 10.1039/d0nr06552h

14 Zhao X.G., Malyi O.I., Zunger A. Polymorphous nature of the local structure of δ-Bi2O3 // Physical Review Materials. 2024. V. 8. № 12. P. 125403. doi: 10.1103/physrevmaterials.8.125403

15 Шарутин В.В., Мосунова Т.В. Синтез, строение и применение арильных соединений висмута // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2020. Т. 12. № 3. С. 7–66.

16 Икрамова З., Кадиров М., Дадаходзхаева М. и др. Висмут: характеристика элемента и его влияние на организм человека // Современные аспекты развития фундаментальных наук и вопросы их преподавания. 2023. Т. 1. № 1. С. 81–86.

17 Четверикова Д.К., Юдин А.А. Получение металлического висмута и его структурный анализ // Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности: сборник материалов X Международной школы и LXIII Международной конференции / Тольятти: 2021.

18 Юхин Ю.М., Коледова Е.С., Тимакова Е.В. Комплексная переработка металлического висмута с получением оксида // Металлургия цветных, редких и благородных металлов. 2022. С. 231–236.

19 Levitskaia T.G., Chatterjee S., Pourmand A. et al. A review of bismuth (III)-Based materials for remediation of contaminated sites // ACS Earth and Space Chemistry. 2022. V. 6. № 4. P. 883–908. doi: 10.1021/acsearthspacechem.1c00114

20 Yan H., Hu J., Deng Y.X. et al. Long-life high-voltage all-solid-state batteries enabled by bismuth (III) triflate mediated polymer electrolytes // Chemical Engineering Journal. 2024. V. 484. P. 149516. doi: 10.1016/j.cej.2024.149516

21 Tian Y., Sakaki S. Theoretical study on bismuth (III) catalysts for synthesis of phenylsulfonyl fluoride: reasons of their catalysis // ACS Catalysis. 2024. V. 14. № 4. P. 2758–2774. doi: 10.1021/acscatal.3c04874

22 Planas O., Peciukenas V., Cornella J. Bismuth-catalyzed oxidative coupling of arylboronic acids with triflate and nonaflate salts // Journal of the American Chemical Society. 2020. V. 142. № 26. P. 11382–11387. doi: 10.1021/jacs.0c05343

References

1 Siddig L.A., Alzard R.H., Nguyen H.L. et al. Cyclic carbonate formation from cycloaddition of CO2 to epoxides over bismuth subgallate photocatalyst. Inorganic Chemistry Communications. 2022. vol. 142. p. 109672. doi: 10.1016/j.inoche.2022.109672

2 Kumar M., Singh R., Sharma P. et al. Bismuth-catalyzed stereoselective 2-deoxyglycosylation of disarmed/armed glycal donors. Organic Letters. 2022. vol. 24. no. 2. pp. 575–580. doi: 10.1021/acs.orglett.1c04008

3 Nakate A.K. Lewis acid-catalysed α and π activation triggered cascade annulation reactions of alkynyl alcohols to construct heterocyclic compounds. Tetrahedron Letters. 2023. vol. 114. p. 154282.

4 Zenebe F.C., Taddesse A.M., Sivasubramanian M. et al. Highly efficient CdS/CeO2/Ag3PO4 nanocomposite as novel heterogenous catalyst for Knoevenagel condensation and acetylation reactions. Heliyon. 2024. vol. 10. no. 11. p. e31798. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31798

5 Steber H.B., Singh Y., Demchenko A.V. Bismuth(III) triflate as a novel and efficient activator for glycosyl halides. Organic & Biomolecular Chemistry. 2021. vol. 19. no. 14. pp. 3220–3233. doi: 10.1039/d1ob00093d

6 Tereschenko D.S., Glazunova T.Yu., Buzoverov M.E. et al. Synthesis and crystal structure of new trinuclear fluorocarboxylate complexes of cobalt(II) and nickel(II). Coordination Chemistry. 2022. vol. 48. no. 9. pp. 534–542. doi: 10.31857/s0132344x22090079 (in Russian)

7 Yukhin Yu.M., Mishchenko K.V., Daminov A.S. Production of bismuth salt solutions with its preliminary oxidation. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. vol. 51. no. 4. pp. 470–477. doi: 10.7868/s0040357117040157 (in Russian)

8 Yukhin Yu.M., Naydenko E.S., Daminov A.S. et al. Production of bismuth compounds for technology and medicine. Chemistry for Sustainable Development. 2018. vol. 26. no. 3. pp. 345–351. doi: 10.15372/khur20180309 (in Russian)

9 Weber M., Schmidt J., Wagner M. et al. Polymorphism and visible-light-driven photocatalysis of doped Bi2O3: M (M= S, Se, and Re). Inorganic Chemistry. 2022. vol. 61. no. 3. pp. 1571–1589. doi: 10.1021/acs.inorgchem.1c03330

10 Plotnikova S.E., Peregudov Yu.S., Gorbunova E.M. et al. Prospects for the use of liquid waste from the production of soda ash as a refrigerant based on the CaCl2-K2Cr2O7-H2O ternary system. Bulletin of VSUET. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 233–238. doi: 10.20914/2310-1202-2020-233-238 (in Russian)

11 Plotnikova S.E., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I. et al. Study of phase equilibria in water-salt systems containing components of whey. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 4. pp. 139–144. doi: 10.20914/2310-1202-2023-4-139-144 (in Russian)

12 Leng D., Wang T., Du C. et al. Synthesis of β-Bi2O3 nanoparticles via the oxidation of Bi nanoparticles: Size, shape and polymorph control, anisotropic thermal expansion, and visible-light photocatalytic activity. Ceramics International. 2022. vol. 48. no. 13. pp. 18270–18277. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.03.085

13 Gandhi A.C., Lai C.Y., Wu K. et al. Phase transformation and room temperature stabilization of various Bi2O3 nano-polymorphs: effect of oxygen-vacancy defects and reduced surface energy due to adsorbed carbon species. Nanoscale. 2020. vol. 12. no. 47. pp. 24119–24137. doi: 10.1039/d0nr06552h

14 Zhao X.G., Malyi O.I., Zunger A. Polymorphous nature of the local structure of δ-Bi2O3. Physical Review Materials. 2024. vol. 8. no. 12. p. 125403. doi: 10.1103/physrevmaterials.8.125403

15 Sharutin V.V., Mosunova T.V. Synthesis, structure and application of aryl bismuth compounds. Bulletin of South Ural State University. Series: Chemistry. 2020. vol. 12. no. 3. pp. 7–66. (in Russian)

16 Ikramova Z., Kadirov M., Dadakhodzhaeva M. et al. Bismuth: element characteristics and its impact on the human body. Modern aspects of the development of fundamental sciences and issues of their teaching. 2023. vol. 1. no. 1. pp. 81–86. (in Russian)

17 Chetverikova D.K., Yudin A.A. Production of metallic bismuth and its structural analysis. Physical Materials Science. Actual problems of strength: collection of materials of the X International School and LXIII International Conference. Tolyatti: 2021.

18 Yukhin Yu.M., Koledova E.S., Timakova E.V. Complex processing of metallic bismuth to obtain oxide. Metallurgy of Non-Ferrous, Rare and Noble Metals. 2022. pp. 231–236. (in Russian)

19 Levitskaia T.G., Chatterjee S., Pourmand A. et al. A review of bismuth(III)-Based materials for remediation of contaminated sites. ACS Earth and Space Chemistry. 2022. vol. 6. no. 4. pp. 883–908. doi: 10.1021/acsearthspacechem.1c00114

20 Yan H., Hu J., Deng Y.X. et al. Long-life high-voltage all-solid-state batteries enabled by bismuth(III) triflate mediated polymer electrolytes. Chemical Engineering Journal. 2024. vol. 484. p. 149516. doi: 10.1016/j.cej.2024.149516

21 Tian Y., Sakaki S. Theoretical study on bismuth(III) catalysts for synthesis of phenylsulfonyl fluoride: reasons of their catalysis. ACS Catalysis. 2024. vol. 14. no. 4. pp. 2758–2774. doi: 10.1021/acscatal.3c04874

22 Planas O., Peciukenas V., Cornella J. Bismuth-catalyzed oxidative coupling of arylboronic acids with triflate and nonaflate salts. Journal of the American Chemical Society. 2020. vol. 142. no. 26. pp. 11382–11387. doi: 10.1021/jacs.0c05343

Сведения об авторах

Светлана Е. Плотникова к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, burkovasweta@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-6331-554x

Елена М. Горбунова к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, gorbunova_elena2024@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3550-0115

Сабухи И. Нифталиев д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, niftaliev@mail.com
https://orcid.org/0000-0001-7887-3061

Ирина В. Кузнецова степень, должность, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kuznetsovaiv@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6666-6292

Анастасия М. Лучко студент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, am.luchko@mail.ru
https://orcid.org/0009-0009-5197-4765

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

Svetlana E. Plotnikova Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, burkovasweta@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-6331-554x

Elena M. Gorbunova Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, gorbunova_elena2024@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-3550-0115

Sabukhi I. Niftaliev Dr. Sci. (Chem.), professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, niftaliev@mail.com
https://orcid.org/0000-0001-7887-3061

Irina V. Kuznetsova Cand. Sci. (Chem), assistant professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuznetsovaiv@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6666-6292

Anastasiya M. Luchko student, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, am.luchko@mail.ru
https://orcid.org/0009-0009-5197-4765

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 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 10/09/2025

Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 10/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-224-233 Оригинальная статья/Research article
УДК 66.047.3.049.6 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Математическое моделирование вакуумной сублимационной сушки для трансфера технологий с лабораторного уровня на промышленный

Елизавета К. Мохова [1] lizi5263@yandex.ru 0000-0002-9995-6752
Мария Г. Гордиенко [1] gordienko@muctr.ru 0000-0002-8485-9861
Наталья В. Меньшутина [1] chemcom@muctr.ru 0000-0001-7806-1426
Ольга В. Карманова [2] kaf-tospp@vsuet.ru 0000-0003-2226-6582

1 Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Рассматривается задача математического описания вакуумной сублимационной сушки дисперсных и биологически активных материалов, применяемых при создании готовых лекарственных форм и композиционных полимерных систем. Целью работы являлось разработать модель, обеспечивающую перенос технологии лиофильной сушки с лабораторного уровня на промышленный при сохранении однородности и качества продукции. В качестве методического подхода использовано объединение одномерной модели кинетики сушки и вычислительной гидродинамики, позволяющей рассчитывать распределение водяных паров в объеме рабочей камеры лиофилизатора. Модель учитывает первый и второй периоды сушки, послойное перемещение фронта сублимации, тепломассоперенос в замороженной и высушенной областях, а также диффузионные ограничения на этапе досушки. Экспериментальные исследования выполнены на пилотной установке Labconco при минимальном давлении 5–10 Па и температуре конденсатора 188 K с использованием модельного пептидного раствора. Показано, что рассчитанные температурные кривые сопоставимы с экспериментальными данными: фактор различия составил 1.76, фактор подобия 54.77, что подтверждает адекватность предложенной модели. CFD-расчеты выявили неравномерное распределение водяных паров в объеме камеры и рост их концентрации в зоне конденсатора по мере протекания сублимации. Установлено, что совместное использование моделей кинетики и газодинамики позволяет обоснованно подбирать режимы сушки, снижать продолжительность процесса и минимизировать риск брака. Разработанный подход рекомендуется для трансфера вакуумной сублимационной сушки на промышленное оборудование различного объема.

Ключевые слова: интенсификация, кинетика сушки, математическое моделирование, дисперсные полимерные материалы, готовые лекарственные формы.

Mathematical modeling of vacuum freeze-drying for technology transfer from laboratory to industrial scale

Elizaveta K. Mokhova [1] lizi5263@yandex.ru 0000-0002-9995-6752
Maria G. Gordienko [1] gordienko@muctr.ru 0000-0002-8485-9861
Natalia V. Menshutina [1] chemcom@muctr.ru 0000-0001-7806-1426
Olga V. Karmanova [2] kaf-tospp@vsuet.ru 0000-0003-2226-6582

1 D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya square, No. 9, B.33, Moscow, 125047, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The paper focuses on mathematical description of vacuum freeze-drying applied to dispersed and biologically active materials used in the production of finished dosage forms and composite polymer systems. The aim of the study was to develop a modeling approach supporting technology transfer of freeze-drying from laboratory to industrial scale while maintaining product uniformity and quality. The proposed method combines a one-dimensional drying kinetics model with computational fluid dynamics for simulation of water vapor distribution inside the lyophilizer chamber. The model describes the first and second drying periods, layer-by-layer movement of the sublimation front, coupled heat and mass transfer in frozen and dried regions, and diffusion-controlled moisture removal during secondary drying. Experimental investigations were carried out on a Labconco pilot freeze-dryer operated at 5–10 Pa with a condenser temperature of 188 K using a model peptide solution. Calculated temperature profiles showed good agreement with experimental data: the difference factor equaled 1.76 and the similarity factor reached 54.77, confirming model adequacy. Computational fluid dynamics simulations demonstrated nonuniform water vapor distribution within the chamber and increasing vapor concentration near the condenser during sublimation. The results indicate that integration of drying kinetics modeling with gas-dynamic simulations enables rational selection of operating regimes, reduction of drying time, and decrease in batch rejection risk. The developed approach is recommended for efficient scale-up and industrial implementation of vacuum freeze-drying technologies.

Keywords: intensification, drying kinetics, mathematical modeling, dispersed polymeric materials, finished dosage forms.

Для цитирования
Мохова Е.К., Гордиенко М.Г., Меньшутина Н.В., Карманова О.В. Математическое моделирование вакуумной сублимационной сушки для трансфера технологий с лабораторного уровня на промышленный // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 224–233. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-224-233

For citation
Mokhova E.K., Gordienko M.G., Menshutina N.V., Karmanova O.V. Mathematical modeling of vacuum freeze-drying for technology transfer from laboratory to industrial scale. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 224–233. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-224-233

©2025, Мохова Е.К.и др. / Mokhova E.K. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В соответствии с прогнозом о научно-технологическом развитии России до 2030 года, разработка технологий получения готовых лекарственных форм (ГЛФ), а также новых композиционных и дисперсных полимерных материалов является актуальным и приоритетным направлением развития фармацевтики, медицины и смежных сфер науки. К такого рода материалам можно отнести лиофилизаты, представляющие твердую лекарственную форму в виде пористой матрицы с добавлением одного или нескольких действующих веществ [1–7]. Конечной стадией получения готовых лиофилизатов является вакуумная сублимационная сушка, которая часто используется в фармацевтической промышленности для удаления влаги из объема материала с сохранением его исходной формы, без потери структурной целостности и биологической активности препаратов [8]. Однако, ограниченная скорость тепло- и массопереноса, ввиду протекания сублимационной сушки в условиях пониженных температур, обычно приводит к длительному времени сушки и низкой производительности процесса в целом [9]. Продолжительность сублимационной сушки может составлять 24 часа и более. Кроме того, процесс является энерго- и ресурсозатратным, а использование дополнительного оборудования, необходимого для осуществления процесса вакуумной сублимационной сушки, такого как: вакуумный насос, компрессорные установки и холодильная техника, ведет к удорожанию технологии и конечного продукта, поэтому интенсификация данного процесса является актуальной задачей на сегодняшний день [10,11]. Помимо сокращения временных затрат на реализацию процесса, необходимо также гарантировать одинаковую глубину обезвоживания высушиваемых объектов для обеспечения однородности получаемой партии. Партии, не отвечающие установленным фармакопеей требованиям, бракуются. По данным [12] брак в фармацевтической технологии при производстве ГЛФ может составлять до 30 % от общего объема партии, что существенно сказывается на стоимости производства лекарственных препаратов. Поэтому подбор оптимальных режимов сушки в фармацевтической технологии особенно важен.

В области исследования и интенсификации процессов сушки широко применяются методы математического моделирования [13,14]. Данные методы позволяют заменить реальный физический объект на математическое описание данного объекта, с целью его исследования. Поэтому использование методов математического моделирования в области исследования и интенсификации вакуумной сублимационной сушки позволяет не только рассчитать и подобрать режим сушки, но и существенно сократить материальные, энергетические и временные затраты на эксперимент [15,16]. А использование методов вычислительной гидродинамики позволяет рассчитать распределение водяных паров в объеме рабочей камеры лиофилизатора, что особенно важно для оценки влияния параметров процесса на однородность партии.

В данной работе проводилось математическое моделирование процесса вакуумной сублимационной сушки с учетом неравномерного распределения водяных паров по объему рабочей камеры лиофилизатора. В качестве объекта исследования было выбрано модельное вещество (пептид).

Материалы и методы

В работе были использованы следующие материалы: модельное вещество (пептид), сахароза, L-гистидин, L-гистидина гидрохлорида моногидрат, хлористоводородная кислота 1 М до pH 6.5, полисорбат-80.

Приготовленный раствор на основе модельного и вспомогательных веществ разливали на металлический поддон. Толщина слоя заливки составила 1.5 см. Для проведения процесса вакуумной сублимационной сушки использовалась пилотная установка Labconco (США), поддерживающая возможность заморозки образцов внутри рабочей камеры (рисунок 1).

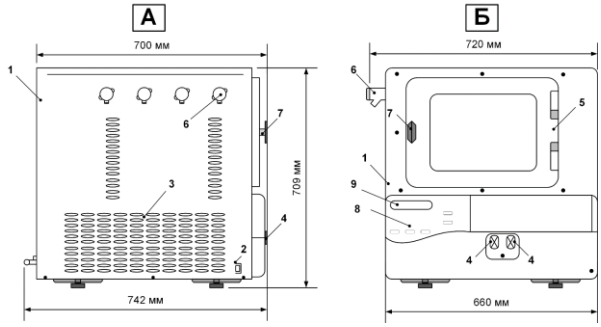


Рисунок 1. а) Схема установки Labconco, вид сбоку: 1 – корпус установки, 2 – кнопка питания, 3 – область конденсатора водяных паров, 4 – вакуумный клапан; б) вид спереди: 5 – дверца рабочей камеры, 6 – вентиляционное отверстие, 7 – ручка дверцы, 8 – панель управления, 9 – дисплей

Figure 1. a) Labconco setup diagram, side view: 1 – setup body, 2 – power button, 3 – water vapor condenser area, 4 – vacuum valve; b) front view: 5 – working chamber door, 6 – ventilation opening, 7 – door handle, 8 – control panel, 9 – display

Экспериментальная работа была проведена в подразделении консультационно-диагностического центра МНИИЭМ им. Г.Н. Габричевского.

Важными технологическими характеристиками пилотной установки Labconco являются: минимальное рабочее давление в камере, равное 5–10 Па и температура конденсатора равная 188 K. Сушильная камера содержит одну нагревательную полку, с диапазоном рабочих температур от 218.15 K до 323.15 K. Емкость конденсатора водяных паров составляет 2.5 л.

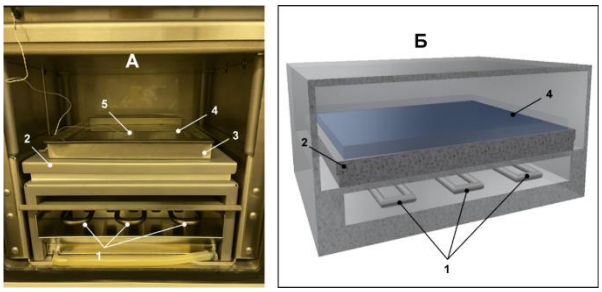


Рисунок 2. а) Внутреннее устройство рабочей камеры установки Labconco: 1 – змеевик конденсатора водяных паров, 2 – нагревательная полка, 3 – поддон, 4 – образец, 5 – датчик температуры; б) 3D-геометрия установки в разрезе

Figure 2.a) Internal structure of the working chamber of the Labconco setup: 1 – water vapor condenser coil, 2 – heating shelf, 3 – tray, 4 – sample, 5 – temperature sensor; b) 3D sectional geometry of the setup

Технологические и геометрические параметры данного оборудования использовались для построения математической модели процесса сушки и прогнозирования распределения водяных паров в объеме рабочей камеры.

На рисунке 2 представлены внутреннее устройство рабочей камеры установки Labconco и 3D-геометрия установки в разрезе, использующаяся при последующем моделировании потока водяных паров в рабочей камере.

При проведении экспериментальной работы на пилотной установке Labconco сначала предварительно охлаждали область конденсатора (1) и нагревательную полку (2). Затем заранее приготовленный раствор объемом 1 л равномерно распределяли по поддону (3). Поддон (3) вместе с образцом (4) помещали на нагревательную полку (2). В объем образца (4) по центру вводили датчик температуры (5). Рабочая камера закрывалась и на панели управления задавались условия предварительной заморозки образца: температура – 233 K; время выдерживания после достижения заданной температуры – 360 мин, без вакуумирования.

После завершения этапа предварительной заморозки установка в автоматическом режиме переходила к этапу сушки. В таблице 1 приведены температурно-временные параметры процесса сушки с вакуумированием.

Таблица 1.

Температурно-временные параметры сушки на пилотной установке Labconco

Table 1.

Temperature and time parameters of drying on the Labconco pilot plant

$T_{полки}$, K	263.15	268.15	273.15	283.15	298.15
Скорость нагрева полки, K/мин Shelf heating speed, K/min	0.25	0.25	0.05	0.05	0.15
Время выдерживания, мин Holding time, min	300	300	480	480	780

Для передачи данных о ходе процесса использовался интерфейс RS-232. Данные передавались с установки на персональный компьютер каждые 5 минут и сохранялись в протоколе. Полученные результаты изменения температуры змеевика конденсатора, нагревательной полки и образца во время этапов предварительной заморозки и сублимационной сушки приведены на рисунке 3 а. Для измерения давления в рабочей камере применяется датчик Пирани. Вакуумирование камеры происходит только на этапе сушки, поэтому изменение давления в камере фиксируется в интервале времени от 1390 до 3995 минут, соответствующему этапу сублимации (рисунок 3 б).

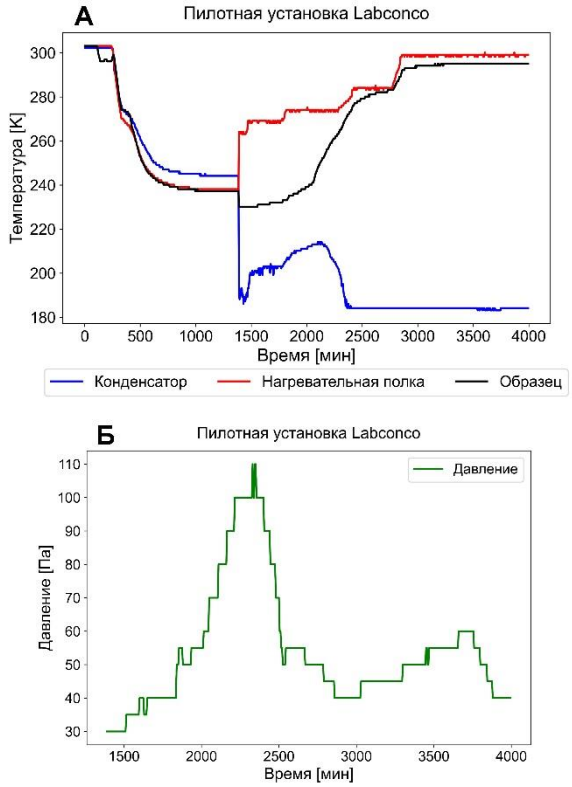


Рисунок 3. а) Экспериментальные данные о ходе процесса сублимационной сушки образца альгината натрия: изменение температуры; б) изменение давления

Figure 3. a) Experimental data on the progress of the sublimation drying process of a sodium alginate sample: change in temperature; b) change in pressure

Полученные данные изменения температуры образца использовались для последующей оценки адекватности математической модели кинетики сушки.

Математическое моделирование вакуумной сублимационной сушки

Математическая модель кинетики сушки является одномерной, т. е. перенос тепла и влаги происходит только вдоль оси X, и строится на уравнениях тепло- и массопереноса. В структуру настоящей математической модели входит описание первого и второго периодов сушки [17].

В математической модели делается допущение об однородности теплофизических параметров замороженного и высушенного слоев материала по объему в каждый момент времени. Значения плотности, удельной теплоемкости и теплопроводности рассматривались как постоянные по всей толщине слоя [18].

В ходе расчета весь материал делился по высоте на 50 слоев, в каждом из которых рассчитывалось изменение влагосодержания и температуры материала во времени [19]. Шаг по времени выбирался из условия устойчивости разностной схемы (условие Куранта). Перемещение фронта сушки осуществляется послойно: высушенный слой меняет статус с «лед» на «сухой материал».

В данной работе кинетическая модель для высушиваемого материала – код Python, объединялись с CFD-моделью распределения водяных паров по объему пилотного лиофилизатора. Для этого значения изменения температуры и влагосодержания материала, полученные по кинетической модели, записывались в UDF-файлы: temperature_flow и mass_flow_rate. UDF-файлы прикреплялись к соответствующим областям 3D-геометрии сублимационной камеры, в качестве граничных условий в среде моделирования Ansys Fluent 17.0 (рисунок 4).

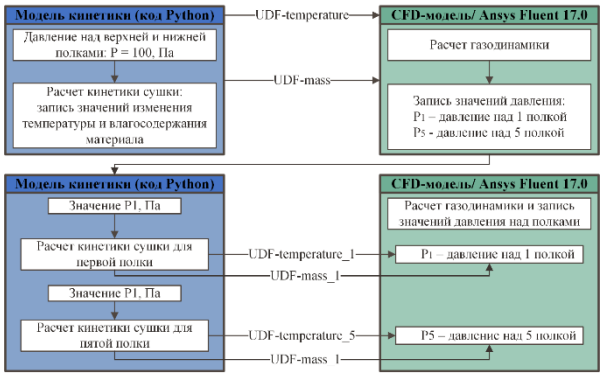


Рисунок 4. Алгоритм объединения двух моделей

Figure 4. Algorithm for combining two models

Такой подход позволил получить модель с учетом неравномерного распределения водяных паров по объему вакуумной камеры.

При составлении математического описания первого периода сушки для условно гомогенного материала, был принят ряд следующих допущений:

1. Весь материал делится на 50 слоев, в каждом из которых рассчитывается изменение влагосодержания и температуры, с учетом особенностей строения материала.
2. Фронт сублимации, положение которого задается координатой $X_н$, делит образец на замороженную область (I) и высушенную (II) области.
3. Граница раздела (фронт сублимации) в процессе сушки равномерно двигается вниз, пока вся замороженная свободная влага не удалится из материала толщиной L. При этом меняется статус слоя: с «лед» на «сухой материал». Высота слоев остается постоянной в течение всего расчета.
4. На границе раздела фаз выполняется закон сохранения массы.
5. Теплопередача к материалу осуществляется кондуктивно от полки снизу.

Для замороженной области (I) уравнение теплопроводности и граничное условие выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial T_I}{\partial \tau} = a_I \frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} + \frac{Q_I}{\rho_I c_{pI}} \quad (1)$$

$$0 \le x \le X(\tau), \tau > 0 \quad (2)$$

где T – температура, К; τ – время, с; a_I – температуропроводность, м^2/с; x – декартова координата, м; Q_I – объемная мощность источников теплоты, Вт/м^3; ρ_I – плотность, кг/м^3; c_{pI} – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Для высушенной области (II) уравнение теплопроводности и граничное условие выглядят так, как показано ниже:

$$\frac{\partial T_{II}}{\partial \tau} = a_{II} \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial x^2} - \frac{c_{p_{пар}}}{\rho_{II} c_{pII}} \frac{\partial (N_{пар} T_{II})}{\partial x} + \frac{Q_{II}}{\rho_{II} c_{pII}} \quad (3)$$

$$X(\tau) \le x \le L, \tau > 0 \quad (4)$$

где ρ_{II} – насыпная плотность сухого материала, кг/м^3; $N_{пар}$ – поток водяного пара во II области, кг/(м^2·с).

Дифференциальные уравнения, описывающие массообмен для замороженной области (I) и высушенной области (II) представлены ниже:

$$\lambda_I \frac{\partial T_I}{\partial x} = \left(W_н - W_{кр}\right) \rho_{II} \Delta H_c \frac{\partial X_I}{d\tau} \quad (5)$$

$$x = X_I, \tau > 0 \quad (6)$$

$$\lambda_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x} = -\left(W_н - W_{кр}\right) \rho_{II} \Delta H_c \frac{\partial X_{II}}{d\tau} \quad (7)$$

$$x = X_{II}, \tau > 0 \quad (8)$$

Приращение координаты и влагосодержания для замороженной области (I) в размерном виде представлено ниже:

$$\frac{dX_I}{d\tau} = \frac{\lambda_I}{X_I \rho_{II}} \frac{\left(T_{фс} - T_{низ}\right)}{\Delta H_c \left(W_н - W_{кр}\right)} \quad (9)$$

$$\frac{dW_I}{d\tau} = \frac{\lambda_I \left(T_{фс} - T_{низ}\right)}{L \cdot \Delta H_c X_I \rho_{II}} \quad (10)$$

гдеλ – теплопроводность материала, Вт/(м·К); $W_н$ – начальное влагосодержание, кг влажного/кг сухого материала; $W_{кр}$ – критическое влагосодержание, кг влажного/кг сухого материала; ΔH_c – энтальпия сублимации, Дж/кг; $T_{фс}$ – температура фронта сублимации, К; $T_{низ}$ – нагревательной полки, К.

Приращение координаты и влагосодержания для замороженной области (I) в безразмерном виде представлено ниже:

$$\frac{dX_I^*}{d\tau^*} = \frac{\lambda_I}{a_I X_I^* \rho_{II}} \frac{\left(T_{фс} - T_{низ}\right)}{\Delta H_c \left(W_н - W_{кр}\right)} \quad (11)$$

$$\frac{dW_I^*}{d\tau^*} = \frac{\lambda_I}{a_I X_I^* \rho_{II}} \frac{\left(T_{фс} - T_{низ}\right)}{\Delta H_c \left(W_н - W_{кр}\right)} \quad (12)$$

Приращение координаты и влагосодержания для высушенной области (II) в размерном виде представлено ниже:

$$\frac{dX_{II}}{d\tau} = \frac{\lambda_{II}}{(L - X_{II}) \rho_{II}} \frac{\left(T_{фс} - T_{пов}\right)}{\Delta H_c \left(W_н - W_{кр}\right)} \quad (13)$$

$$\frac{dW_{II}}{d\tau} = \frac{\lambda_{II} \left(T_{фс} - T_{пов}\right)}{L \cdot \rho_{II} \Delta H_c (L - X_{II})} \quad (14)$$

где $T_{пов}$ – температура поверхности материала, К.

Приращение координаты и влагосодержания для высушенной области (II) в безразмерном виде представлено ниже:

$$\frac{dX_{II}^*}{d\tau^*} = \frac{\lambda_{II}}{a_{II}(1 - X_{II}^*) \rho_{II}} \frac{\left(T_{фс} - T_{пов}\right)}{\Delta H_c \left(W_н - W_{кр}\right)} \quad (15)$$

$$\frac{dW_{II}^*}{d\tau^*} = \frac{\lambda_{II}}{a_{II}(1 - X_{II}^*) \rho_{II}} \frac{\left(T_{фс} - T_{пов}\right)}{\Delta H_c \left(W_н - W_{кр}\right)} \quad (16)$$

Приращение координаты фронта сублимации ΔX и влагосодержания ΔW в безразмерном виде рассчитывалось по уравнениям для замороженной и высушенной областей соответственно:

$$\Delta X_I^{*n+1} = \Delta W_I^{*n+1} = q_I^{*n+1} \cdot Ste_I \cdot \Delta \tau^* \quad (17)$$

$$\Delta X_{II}^{*n+1} = \Delta W_{II}^{*n+1} = q_I^{*n+1} \cdot Ste_{II} \cdot \Delta \tau^* \quad (18)$$

Числа Стефана Ste_I и Ste_{II} рассчитывались по уравнениям, представленным ниже:

$$Ste_I = \frac{\lambda_I}{a_I \rho_{II}} \frac{\left(T_{низ} - T_{фс}\right)}{\Delta H_c \left(W_н - W_{кр}\right)} \quad (19)$$

$$Ste_{II} = \frac{\lambda_{II}}{a_{II} \rho_{II}} \frac{\left(T_{пов} - T_{фс}\right)}{\Delta H_c \left(W_н - W_{кр}\right)} \quad (20)$$

Расчет смещения фронта сублимации $X^{*n}+1$ и изменения влагосодержания $W^{*n}+1$ проводился также в безразмерном виде по уравнениям:

$$X^{*n+1} = X^{*n} + \Delta X_I^{*n+1} + \Delta X_{II}^{*n+1} \quad (21)$$

$$W^{*n+1} = W^{*n} + \Delta W_I^{*n+1} + \Delta W_{II}^{*n+1} \quad (22)$$

Перевод влагосодержания в размерный вид осуществлялся по формуле:

$$W = W^* \left(W_н - W_{кр}\right) + W_{кр} \quad (23)$$

где W – текущее влагосодержание, кг влажного/кг сухого материала.

Начальное условие для замороженной и высушенной областей материала приведено ниже:

$$T_I = T_{II}, 0 \le x \le L, \tau = 0 \quad (24)$$

$$W = W_н, 0 \le x \le L, \tau = 0 \quad (25)$$

Граничные условия для нижней (I) и верхней (II) частей материала представлены ниже:

$$T_{низ} = T_I, \; x = 0, \; \tau > 0 \quad (26)$$

$$T_{II} =, \; x = L, \tau > 0 \quad (27)$$

$$x = X(\tau), \tau > 0 \quad (28)$$

В момент времени, когда текущее влагосодержание материала (W) становится равным критическому влагосодержанию ($W_{кр}$) начинается второй период сушки. При составлении математического описания второго периода сушки были сделаны следующие допущения:

1. содержание влаги в материале в момент начала второго периода сушки равно критическому влагосодержанию при средней температуре высушенного слоя в конце этапа сублимации ($W=W_{кр}$);
2. механизмом массопереноса является десорбция влаги.

Баланс влаги в высушенной области материала рассчитывался по формуле, приведенной ниже:

Баланс влаги в высушенной области материала рассчитывался по формуле, приведенной ниже:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = K\left(W_{экв} - W\right) \quad (29)$$

где $W_{экв}$ – эквивалентное влагосодержание, кг влажного/кг сухого материала.

Для расчета кинетического коэффициента K использовалось уравнение:

$$K = \frac{60 D_{эфф}}{d_{пор}^2} \quad (30)$$

где $D_{эфф}$ – коэффициент эффективной диффузии, м^2/с; $d_{пор}$ – диаметр пор, м.

Эффективный коэффициент диффузии $D_{эфф}$, а также коэффициент диффузии по Кнудсену D_K и коэффициент поверхностной диффузии $D_{пов}$ рассчитывались по следующим формулам:

$$D_{эфф} = D_{пов} + D_K \frac{\varepsilon_{пор} M_в}{\rho} \frac{\partial y^*_{пар}}{\partial W} \quad (31)$$

$$D_K = 1.0638 r_{пор} \sqrt{\frac{RT}{M_в}} \quad (32)$$

$$D_{пов} = D_{пов\,0} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (33)$$

где $\varepsilon_{пор}$ – пористость; $M_в$ – молекулярная масса воды, г/моль; $r_{пор}$–радиус пор, м; E_a – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(мольК).

Производная $\partial y^*_{пар} / \partial W$ в уравнении (31) рассчитывалась аналитически:

$$\frac{\partial y^*_{пар}}{\partial W} = \frac{W_0 \exp\left(\frac{a}{T}\right)}{b \exp\left(\frac{c}{T}\right) P\left[W - W_0 \exp\left(\frac{a}{T}\right)\right]^2} \quad (34)$$

где$y_{пар}$ – равновесная мольная доля водяного пара, моль / моль; a – константа, K; b – константа, Па$^{-1}$; c – константа, K; P-давление, Па.

Для расчета теплового баланса в высушенном слое использовалось следующее уравнение:

$$-\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \left(1 - \varepsilon_{пор}\right) \rho_{гс} c_м \frac{\partial T}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^{s} \Delta h_{адс} \frac{\rho_{кж}}{M_в} \frac{\partial W}{\partial \tau} = 0 \quad (35)$$

где $\Delta h_{адс}$ – теплота адсорбции, Дж/моль.

Начальные условия для решения уравнений второго периода сушки:

$$W = W_{кр}, \tau = 0 \quad (36)$$

$$T = T(x, 0), \tau = 0 \quad (37)$$

Граничные условия для решения уравнений второго периода сушки:

$$T = T_{низ}, x = 0, \tau > 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = L, \tau > 0 \quad (39)$$

Для реализации расчетов кинетики сушки вышеописанная математическая модель была оформлена в программный код на языке программирования Python.

Для оценки сопоставимости кинетических кривых сушки использовались факторы различия и подобия. Фактор различия (f_1) показывает процент ошибки между двумя кривыми сушки, полученными при разных режимах, по всем временным точкам. Фактор различия рассчитывается по уравнению (40):

$$f_1 = \frac{\sum_{t=1}^{k} \left| T_{эксп_t} - T_{расчет_t} \right|}{\sum_{t=1}^{k} T_{эксп_t}} 100\ \% \quad (40)$$

где $T_{эксп_\tau}$ – экспериментальная средняя температура в момент времени τ, K; $T_{расчет_\tau}$ – эрасчетная средняя температура материала в момент времени τ, K.

Фактор различия равен нулю, если кривые сушки идентичны. По мере увеличения различия между двумя кривыми сушки значение фактора возрастает. Кинетические кривые сушки считаются сопоставимыми, если значение фактора различия f_1 находится в интервале от 0 до 15.

Фактор подобия (f_2) – это величина, представляющая собой логарифмическое преобразование значения суммы квадратов ошибок, рассчитанных по разности между значениями двух кривых сушки во всех точках времени. Фактор подобия рассчитывается по уравнению (41):

$$f_2 = 50 log\left(100 \Big/ \sqrt{1 + \frac{\sum_{t=1}^{k} \left| T_{эксп_t} - T_{расчет_t} \right|^2}{k}}\right) \quad (41)$$

где k – количество временных точек.

Кинетические кривые сушки считаются сопоставимыми, если значение фактора подобия f_2 находится в интервале от 50 до 100.

Если хотя бы один из факторов не попадает в диапазон значений, при которых кинетические кривые считаются сопоставимыми, то принимают, что такие кривые значимо различаются.

На основании полученных данных кинетики сублимационной сушки с помощью метода вычислительной гидродинамики (CFD) и пакета программ Ansys Fluent 17.0 были произведены расчеты распределения водяных паров в объеме рабочей камеры пилотной установки Labconco.

Результаты и обсуждение

Анализ графиков температуры (рисунок 3 а) показал, что, начиная с 255 минут, система начинает активно охлаждаться (резкое падение температуры нагревательной полки, конденсатора и образца). В период времени от 330 до 405 минут наблюдается температурное плато, соответствующее фазовому переходу на этапе заморозки. Период времени от 405 до 1390 минут соответствует полному затвердеванию раствора. Начиная от 1390 минут, установка переходит к этапу сушки. В данный момент времени давление в рабочей камере снижается от нормально атмосферного давления до уровня вакуума, равного 30 Па (рисунок 3 б). Вакуумирование рабочей камеры приводит к резкому понижению температуры конденсатора, а понижение температуры образца связано с эффектом самозамораживания. Температура нагревательной полки повышается в соответствии с заданным режимом (таблица 2). В интервале времени от 1390 до 2180 минут протекает первый период сушки (сублимация льда). Конденсатор активно поглощает водяные пары, поступающие из рабочей зоны, соответственно температура конденсатора (рисунок 3 а) и давление в рабочей камере (рисунок 3 б) повышаются. Пик температуры конденсатора и пик давления в рабочей камере соответствуют завершению первого периода сушки. Начиная с 2180 минут образец начинает активно прогреваться (начало второго периода сушки), температура образца повышается до заданной температуры нагревательной полки (досушка образца при положительных температурах). Во втором периоде сушки лимитирует диффузионный перенос влаги и скорость сушки падает, следовательно, нагрузка на конденсатор снижается, что приводит к уменьшению температуры конденсатора. Концентрация водяных паров в рабочей камере также снижается, что приводит к уменьшению давления.

Результаты оценки адекватности математической модели кинетики вакуумной сублимационной сушки приведены на рисунке 5.

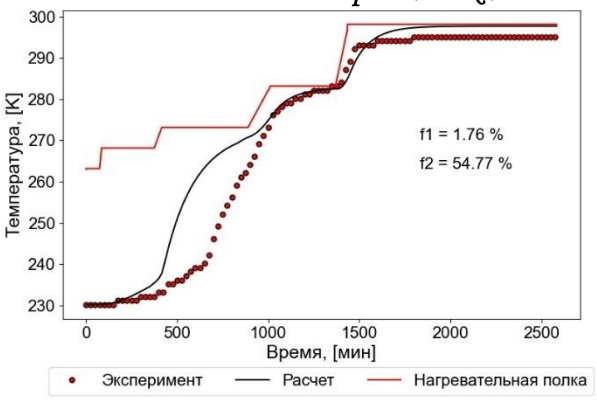


Рисунок 5.Оценка адекватности математической модели кинетики вакуумной сублимационной сушки образца

Figure 5. Evaluation of the adequacy of the mathematical model of the kinetics of vacuum sublimation drying of a sample

Рассчитанные значения факторов различия f_1 – 1.76, и подобия f_2 – 54.77, позволили оценить адекватность математической модели кинетики вакуумной сублимационной сушки. Ни один из факторов не выходит за диапазон значений, при которых кинетические кривые значимо различаются. Следовательно, температурные кривые являются сопоставимыми, а математическая модель адекватно описывает экспериментальные данные.

На рисунке 6 приведено распределение доли водяного пара в объеме рабочей камеры (вид сбоку) в интервале времени от 33 до 333 минут.

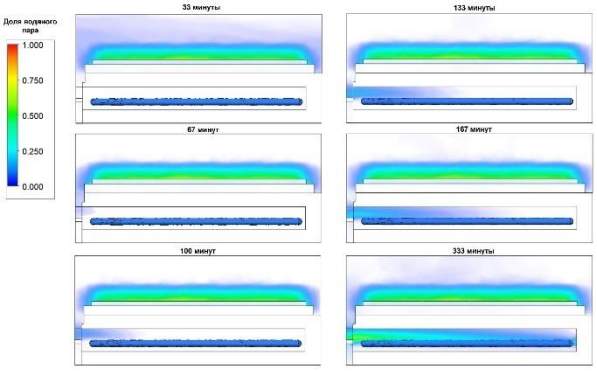


Рисунок 6. Распределение доли водяного пара в объеме рабочей камеры пилотной установки Labconco (вид сбоку)

Figure 6. Distribution of the proportion of water vapor in the volume of the working chamber of the Labconco pilot plant (side view)

В момент времени 33 минуты водяной пар в основном сосредоточен в верхней части рабочей камеры (область материала). Под действием разности парциальных давлений, водяной пар постепенно двигается в область конденсатора водяных паров. К моменту времени, равному 333 минуты, доля водяного пара в области конденсатора значительно увеличивается.

Полученные данные согласуются с экспериментальными – Рис. 3 А, где в момент времени 1723 минуты (333 минуты от начала процесса сублимационной сушки) видно, что нагрузка на конденсатор повышается, а его температура возрастает.

Заключение

Разработанный подход математического моделирования, основанный на объединении модели кинетики сушки (код – язык программирования Python) и CFD-моделирования газодинамики (программный пакет Ansys Fluent 17.0) для материалов, представляющих интерес для фармацевтической промышленности, является эффективным в области исследования и подбора режимов вакуумной сублимационной сушки в аппаратах различного объема.

Стоит отметить, что разработанная математическая модель позволяет подбирать технологические режимы ведения процесса для различных типов материалов, что существенно сокращает материальные и энергетические затраты, а также время на эксперимент.

Совместное использование математической модели кинетики сушки и CFD-моделирования газодинамики показало, что рассчитываемые данные согласуются с экспериментальными, поэтому данный подход может быть предложен при осуществлении трансфера технологии с лабораторного уровня на промышленный.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSSM-2025–0003).

Литература

1 Maia F.R., Rui L.C., Reis R.L., et al. Natural origin materials for bone tissue engineering // Principles of Regenerative Medicine. 2019. P. 535–558. doi: 10.1016/b978-0-12-809880-6.00032-1.

2 Nie W., Dai X., Copus J.S., et al. Rapid mineralization of graphene-based 3D porous scaffolds by semi-dry electrodeposition for photothermal treatment of tumor-induced bone defects // Acta Biomaterialia. 2022. V. 153. P. 573–584. doi: 10.1016/j.actbio.2022.09.019.

3 Chopra H., Kumar S., Singh I. Biopolymer-based scaffolds for tissue engineering applications // Current Drug Targets. 2021. V. 22. № 3. P. 282–295. doi: 10.2174/1389450121999201102140408.

4 Beltran-Vargas N.E., Del Prado-Audelo M.L., Leyva-Gómez G., et al. Sodium alginate/chitosan scaffolds for cardiac tissue engineering: The influence of its three-dimensional material preparation and the use of gold nanoparticles // Polymers. 2022. V. 14. № 16. P. 3233. doi: 10.3390/polym14163233.

5 Osman M.A., Elbashir A.A., Elwassif M.M., et al. Development and characterization of functional polylactic acid/chitosan porous scaffolds for bone tissue engineering // Polymers. 2022. V. 14. № 23. P. 5079. doi: 10.3390/polym14235079.

6 Gordienko M.G., Menshutina N.V., Lesnichaya M.V., et al. The alginate–chitosan composite sponges with biogenic Ag nanoparticles produced by combining of cryostructuration, ionotropic gelation and ion replacement methods // International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. 2022. V. 71. № 1. P. 34–44. doi: 10.1080/00914037.2020.1798439.

7 Ramli R.H., Soon Fhong C., Rus Mohd A.Z. Synthesis of chitosan/alginate/silver nanoparticles hydrogel scaffold // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 78. P. 01031. doi: 10.1051/matecconf/20167801031.

8 Keller T., Wolf M., Pröll T. Enhancing energy efficiency in pharmaceutical freeze drying: Adapting to EU legislation on fluorinated gases // International Journal of Thermofluids. 2025. V. 21. P. 101304. doi: 10.1016/j.ijft.2025.101304.

9 Garcia-Amezquita L.E., Welti-Chanes J., Vergara-Balderas F.T., et al. Freeze-drying: The basic process // Encyclopedia of Food and Health / Ed. by B. Caballero, P.M. Finglas, F. Toldrá. Oxford: Academic Press, 2016. P. 104–109. doi: 10.1016/b978-0-12-384947-2.00328-7.

10 Liao J., Guo Z., Yu G. Process intensification and kinetic studies of ultrasound-assisted extraction of flavonoids from peanut shells // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. V. 76. P. 105661. doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105661.

11 Patel B.A., Pereira C.S. Process intensification at scale: an industrial perspective // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2022. V. 181. P. 109098. doi: 10.1016/j.cep.2022.109098.

12 Куркин Д.В., Макаров В.Г., Чумакова Н.В. и др. Методологические и регуляторные аспекты фармацевтической разработки биопрепаратов // Фармация и фармакология. 2023. Т. 11. № 5. С. 384–398.

13 Гордеев Л.С., Мещерякова С.А., Ахназарова С.Л. и др. Математическое моделирование химико-технологических систем периодического действия: методические указания. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1999. 68 с.

14 Ахназарова С.Л., Гордеев Л.С., Глебов М.Б. Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов с неполной информацией о механизме: учебное пособие. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010. 100 с.

15 Mokhova E., Gordienko M., Menshutina N. Mathematical model of freeze drying taking into account uneven heat and mass transfer over the volume of the working chamber // Drying Technology. 2022. V. 40. № 12. P. 2470–2493. doi: 10.1080/07373937.2022.2058958.

16 Nuytten G., Revatta S.R., Van Bockstal P.J., et al. Development and application of a mechanistic cooling and freezing model of the spin freezing step within the framework of continuous freeze-drying // Pharmaceutics. 2021. V. 13. № 12. P. 2076. doi: 10.3390/pharmaceutics13122076.

17 Мохова Е.К., Гордиенко М.Г. Математическая модель вакуумной сублимационной сушки с неравномерным распределением паров по объему камеры // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 3. С. 10–22.

18 Tchessalov S., Dassu D., Latshaw II G., et al. Best practices and guidelines (2022) for scale-up and tech transfer in freeze-drying based on case studies. Part 1: challenges during scale up and transfer // AAPS PharmSciTech. 2022. V. 24. № 1. P. 11. doi: 10.1208/s12249-022-02463-x.

19 Navrátil O., Kolář J., Zadražil A., et al. Model-based evaluation of drying kinetics and solvent diffusion in pharmaceutical thin film coatings // Pharmaceutical Research. 2022. V. 39. № 9. P. 2017–2031. doi: 10.1007/s11095-022-03352-5.

20 Kerkhoff J., Thomas A., Štěpánek F., et al. Drying kinetics of polymer-based pharmaceutical formulations // Fluid Phase Equilibria. 2025. V. 594. P. 114390. doi: 10.1016/j.fluid.2025.114390.

21 Uhlemann J., Diedam H., Hoheisel W., et al. Modeling and simulation of process technology for nanoparticulate drug formulations—a particle technology perspective // Pharmaceutics. 2020. V. 13. № 1. P. 22. doi: 10.3390/pharmaceutics13010022.

References

1 Maia F.R., Rui L.C., Reis R.L. et al. Natural origin materials for bone tissue engineering. Principles of Regenerative Medicine. 2019. pp. 535–558. doi: 10.1016/b978-0-12-809880-6.00032-1

2 Nie W., Dai X., Copus J.S. et al. Rapid mineralization of graphene-based 3D porous scaffolds by semi-dry electrodeposition for photothermal treatment of tumor-induced bone defects. Acta Biomaterialia. 2022. vol. 153. pp. 573–584. doi: 10.1016/j.actbio.2022.09.019

3 Chopra H., Kumar S., Singh I. Biopolymer-based scaffolds for tissue engineering applications. Current Drug Targets. 2021. vol. 22. no. 3. pp. 282–295. doi: 10.2174/1389450121999201102140408

4 Beltran-Vargas N.E., Del Prado-Audelo M.L., Leyva-Gómez G. et al. Sodium alginate/chitosan scaffolds for cardiac tissue engineering: The influence of its three-dimensional material preparation and the use of gold nanoparticles. Polymers. 2022. vol. 14. no. 16. p. 3233. doi: 10.3390/polym14163233

5 Osman M.A., Elbashir A.A., Elwassif M.M. et al. Development and characterization of functional polylactic acid/chitosan porous scaffolds for bone tissue engineering. Polymers. 2022. vol. 14. no. 23. p. 5079. doi: 10.3390/polym14235079

6 Gordienko M.G., Menshutina N.V., Lesnichaya M.V. et al. The alginate–chitosan composite sponges with biogenic Ag nanoparticles produced by combining of cryostructuration, ionotropic gelation and ion replacement methods. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. 2022. vol. 71. no. 1. pp. 34–44. doi: 10.1080/00914037.2020.1798439

7 Ramli R.H., Soon Fhong C., Rus Mohd A.Z. Synthesis of chitosan/alginate/silver nanoparticles hydrogel scaffold. MATEC Web of Conferences. 2016. vol. 78. p. 01031. doi: 10.1051/matecconf/20167801031

8 Keller T., Wolf M., Pröll T. Enhancing energy efficiency in pharmaceutical freeze drying: Adapting to EU legislation on fluorinated gases. International Journal of Thermofluids. 2025. vol. 21. p. 101304. doi: 10.1016/j.ijft.2025.101304

9 Garcia-Amezquita L.E., Welti-Chanes J., Vergara-Balderas F.T. et al. Freeze-drying: The basic process. Encyclopedia of Food and Health. Ed. by B. Caballero, P.M. Finglas, F. Toldrá. Oxford: Academic Press, 2016. pp. 104–109. doi: 10.1016/b978-0-12-384947-2.00328-7

10 Liao J., Guo Z., Yu G. Process intensification and kinetic studies of ultrasound-assisted extraction of flavonoids from peanut shells. Ultrasonics Sonochemistry. 2021. vol. 76. p. 105661. doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105661

11 Patel B.A., Pereira C.S. Process intensification at scale: an industrial perspective. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2022. vol. 181. p. 109098. doi: 10.1016/j.cep.2022.109098

12 Kurkin D.V., Makarov V.G., Chumakova N.V. et al. Methodological and regulatory aspects of pharmaceutical development of biologics. Pharmacy & Pharmacology. 2023. vol. 11. no. 5. pp. 384–398. (in Russian)

13 Gordeev L.S., Meshcheryakova S.A., Akhnazarova S.L. et al. Mathematical modeling of batch chemical engineering systems: methodological guidelines. Moscow: D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 1999. 68 p. (in Russian)

14 Akhnazarova S.L., Gordeev L.S., Glebov M.B. Modeling and optimization of chemical engineering processes with incomplete information about the mechanism: textbook. Moscow: D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2010. 100 p. (in Russian)

15 Mokhova E., Gordienko M., Menshutina N. Mathematical model of freeze drying taking into account uneven heat and mass transfer over the volume of the working chamber. Drying Technology. 2022. vol. 40. no. 12. pp. 2470–2493. doi: 10.1080/07373937.2022.2058958

16 Nuytten G., Revatta S.R., Van Bockstal P.J. et al. Development and application of a mechanistic cooling and freezing model of the spin freezing step within the framework of continuous freeze-drying. Pharmaceutics. 2021. vol. 13. no. 12. p. 2076. doi: 10.3390/pharmaceutics13122076

17 Mokhova E.K., Gordienko M.G. Mathematical model of vacuum sublimation drying with uneven distribution of vapors over the chamber volume. Software & Systems. 2021. vol. 34. no. 3. pp. 10–22. (in Russian)

18 Tchessalov S., Dassu D., Latshaw II G. et al. Best practices and guidelines (2022) for scale-up and tech transfer in freeze-drying based on case studies. Part 1: challenges during scale up and transfer. AAPS PharmSciTech. 2022. vol. 24. no. 1. p. 11. doi: 10.1208/s12249-022-02463-x

19 Navrátil O., Kolář J., Zadražil A. et al. Model-based evaluation of drying kinetics and solvent diffusion in pharmaceutical thin film coatings. Pharmaceutical Research. 2022. vol. 39. no. 9. pp. 2017–2031. doi: 10.1007/s11095-022-03352-5

20 Kerkhoff J., Thomas A., Štěpánek F. et al. Drying kinetics of polymer-based pharmaceutical formulations. Fluid Phase Equilibria. 2025. vol. 594. p. 114390. doi: 10.1016/j.fluid.2025.114390

21 Uhlemann J., Diedam H., Hoheisel W. et al. Modeling and simulation of process technology for nanoparticulate drug formulations—a particle technology perspective. Pharmaceutics. 2020. vol. 13. no. 1. p. 22. doi: 10.3390/pharmaceutics13010022

Сведения об авторах

Елизавета К. Мохова к.т.н., кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия, lizi5263@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9995-6752

Мария Г. Гордиенко д.т.н., доцент, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия, gordienko@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0002-8485-9861

Наталья В. Меньшутина д.т.н., профессор, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, г. Москва, 125047, Россия, chemcom@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0001-7806-1426

Ольга В. Карманова д.т.н., профессор, кафедра технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-tospp@vsuet.ru
https://orcid.org/0000-0003-2226-6582

Information about authors

Elizaveta K. Mokhova Cand. Sci. (Engin.), chemical and pharmaceutical engineering department, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya Sq. 9, Moscow, 125047, Russia, lizi5263@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-9995-6752

Maria G. Gordienko Dr. Sci. (Engin.), associate professor, chemical and pharmaceutical engineering department, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya Sq. 9, Moscow, 125047, Russia, gordienko@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0002-8485-9861

Natalia V. Menshutina Dr. Sci. (Engin.), professor, chemical and pharmaceutical engineering department, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya Sq. 9, Moscow, 125047, Russia, chemcom@muctr.ru
https://orcid.org/0000-0001-7806-1426

Olga V. Karmanova Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of organic compounds and polymer processing department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-tospp@vsuet.ru
https://orcid.org/0000-0003-2226-6582

Вклад авторов

Елизавета К. Мохова обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Мария Г. Гордиенко консультация в ходе исследования
Наталья В. Меньшутина консультация в ходе исследования
Ольга В. Карманова консультация в ходе исследования

Contribution

Elizaveta K. Mokhova review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Maria G. Gordienko consultation during the study
Natalia V. Menshutina consultation during the study
Olga V. Karmanova consultation during the study

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 22/07/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 03/09/2026

Received 22/07/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 03/09/2026

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-234-240 Оригинальная статья/Research article
УДК 691.17 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Модифицирование отечественного полипропилена бутадиен-стирольным термоэластопластом

Надежда И. Бондаренко [1] bondarenko-71@mail.ru введите здесь orcid
Ирина Д. Скворцова [1] suhonosovairina46@gmail.com
Александр А. Скворцов [1] krokus.777@bk.ru

1 Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул.Костюкова, 46, г. Белгород, 308012, Россия

Аннотация. Разработан близкий по эксплуатационным и физико-механическим свойствам аналог полимерного материала, основанного на гомополипропилене, модифицированном бутадиен-стирольным термоэластопластом (СБС ТЭП). Подобрано оптимальное соотношение массовых частей наиболее подходящих сырьевых материалов отечественных торговых марок, а именно гомополимера пропилена и линейного бутадиен-стирольного термоэластопласта. Исследовано влияние бутадиен-стирольного термоэластопласта, представляющего собой сополимер, состоящий из бутадиеновых и стирольных блоков с различным соотношением жестких, играющих роль сетки и наполнителя, и мягких фаз, определяющих гибкую эластомерную природу, с линейным или разветвленным строением, на гомополимер пропилена. Процесс смешения компонентов осуществлялся с использованием метода экструзии и последующей перегрануляцией. Температурный режим переработки и смешения полимерных материалов был подобран через проведение экспериментальной работы с сырьевыми материалами. С помощью исследования физико-механических свойств полученных полимерных материалов, было выявлено, что введение бутадиен-стирольного термоэластопласта в полипропилен позволяет получить материал, что имеет улучшенные эксплуатационные характеристики по сравнению с «оригинальным» полипропиленом. Разработанный полимерный материал более устойчив к работе в условиях эластичных нагрузок. Полученный полимерный композиционный материал имеет расширенный температурный диапазон работы за счет снижения температуры хрупкости на 30 ℃ и повышения ударной вязкости при -30℃. При этом полученный в ходе эксперимента полипропилен, модифицированный бутадиен-стирольным термоэластопластом является аналогом по эксплуатационным свойствам некоторым зарубежным материалам, при этом состоит из сырьевых материалов отечественного производства. С точки зрения технологии, данный материал имеет потенциал к удешевлению за счет введения в его состав минеральных наполнителей, как в зарубежных аналогах.

Ключевые слова: термоэластопласты, полипропилен, полимерные материалы, экструзия, модифицирующие добавки.

Modification of domestic polypropylene with styrene butadiene thermoplastic

Nadezhda I. Bondarenko [1] bondarenko-71@mail.ru введите здесь orcid
Irina D. Skvortsova [1] suhonosovairina46@gmail.com
Alexander A. Skvortsov [1] krokus.777@bk.ru

1 Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, st. Kostyukova, 46, Belgorod, 308012, Russia

Abstract. An analog of a polymer material based on homopolypropylene modified with styrene butadiene thermoplastic (SBS TEP), which is similar in operational and physico-mechanical properties, has been developed. The optimal ratio of the mass parts of the most suitable raw materials of domestic brands, namely propylene homopolymer and linear styrene butadiene thermoplastic, was selected. The effect of styrene-butadiene thermoplastics, which is a copolymer consisting of butadiene and styrene blocks with a different ratio of rigid, acting as a mesh and filler, and soft phases, defining a flexible elastomeric nature, with a linear or branched structure, on the homopolymer of propylene, has been studied. The process of mixing the components was carried out using the extrusion method and subsequent rearrangement. The temperature regime of processing and mixing of polymer materials was selected through experimental work with raw materials. By studying the physico-mechanical properties of the obtained polymer materials, it was revealed that the introduction of styrene-butadiene thermoplastic into polypropylene makes it possible to obtain a material that has improved performance characteristics compared to the "original" polypropylene. The developed polymer material is more resistant to work under elastic loads. The resulting polymer composite material has an extended operating temperature range by reducing the brittleness temperature by 30 °C and increasing the impact strength at -30°C. At the same time, the polypropylene obtained during the experiment, modified with styrene butadiene thermoplastic, is similar in performance properties to some foreign materials, while it consists of raw materials of domestic production. From the point of view of technology, this material has the potential to be cheaper due to the introduction of mineral fillers into its composition, as in foreign analogues.

Keywords: thermoplastic elastomer, polypropylene, polymer materials, extrusion, modifying additives.

Для цитирования
Бондаренко Н.И., Скворцова И.Д., Скворцов А.А.Модифицирование отечественного полипропилена бутадиен-стирольным термоэластопластом // Вестник ВГУИТ.2025. Т. 87. №. С. 234–240. doi:10.20914/2310-1202-2025--234-240

For citation
Bondarenko N.I., Skvortsova I.D., Skvortsov A.A.Modification of domestic polypropylene with styrene butadiene thermoplastic. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. . pp. 234–240. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025--234-240

© 2025, Бондаренко Н.И. и др. / Bondarenko N.I. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Термоэластопласты (ТЭП) имеют большое распространение в отрасли полимерной промышленности, а также научной среде. Ключом к популярности этих материалов служат их уникальные свойства [1]. Термоэластопласты, будучи аналогами натурального каучука и других традиционных резин по своим характеристикам, выделяются рядом технологических и эксплуатационных преимуществ. Они позволяют осуществлять получение изделий на высокоскоростном и автоматизированном оборудовании, поддаются многократной переработке, обеспечивают безотходность процесса производства и исключают этап вулканизации из технологии [3–6].

Сфера применения термоэластопластов обширна: от производства шлангов, уплотнителей, труб и контейнеров до создания различных покрытий (включая защитные), клеев, герметиков и электроизоляционных материалов. Данные полимерные материалы также активно используются в обувной и дорожной промышленности [2–4].

Благодаря уникальному сочетанию свойств термоэластопластов, включающему эластичность и термопластичность, они служат отличными модификаторами для полимерных материалов, обеспечивая их необходимыми характеристиками даже в процессе производства.

Термоэластполасты широко применяются для модификации смесей из несовместимых гомополимеров. Поливинилароматические и полидиеновые блоки термоэластопластов, совмещаясь с соответствующими гомополимерами смесей играют роль эмульгирующего агента типа «масло в масле». Термоэластопласт влияет на степень диспергируемости фаз гомополимеров и обеспечивает адгезию на поверхности раздела фаз.

Применение термоэластопласта в качестве компонента полимерных смесей способствует улучшению ряда ключевых физико-механических показателей. В частности, наблюдается увеличение относительного удлинения, повышение устойчивости к раздиру и улучшение морозостойкости. Важным преимуществом является также повышение ударной вязкости, причем это изменение сохраняется как при положительных, так и при отрицательных температурах эксплуатации. Помимо этого, термоэластопласт способен снижать температуру текучести, что упрощает процесс переработки за счет возможности использования более низких температур. Однако стоит отметить, что перечисленные выше свойства не являются универсальными для всех типов полимеров. Процентное содержание термоэластопласта в конечной смеси подбирается индивидуально, исходя из требований к готовому изделию, его предполагаемым условиям эксплуатации и необходимым физико-механическим характеристикам [7–9].

Наиболее часто в качестве компонентов для модификации термоэластопласты используются для полистирола, полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида. Важно отметить, что термоэластопласты также могут выступать в роли модификаторов полимеров и сополимеров, улучшая их характеристики. Примерами такого применения являются введение термоэластопласта для повышения ударной вязкости поли-4-метилпентена-1 или введение термоэластопласта для улучшения эластичности поликарбоната [9–11].

Термоэластопласты, применяемые как модификаторы полимеров, обогащают их свойства, что приводит к созданию полимерных композиций с расширенными эксплуатационными характеристиками. Вследствие этого, такие материалы отличаются высокой универсальностью и находят широкое применение в различных отраслях [12–15].

В зарубежных компаниях продажа таких полимерных материалов уже давно имеет большое распространение, за счет чего компании могут предложить более подходящий под запрос клиента сырьевой материал [16].

В связи с изменением политической ситуации в мире, многие зарубежные компании отказались от поставок своих сырьевых материалов из-за чего на рынке образовалась незаполненная ниша, так как ведущие отечественные производители не продают полимеры, модифицированные термоэластопластами. Несмотря на это, потребность у заводов-изготовителей в данном сырье все еще есть, в связи с чем появляется необходимость в создании доступного аналога таким материалам.

Материалы и методы

В качестве зарубежных сырьевых материалов были использованы полимерные композиции на основе полипропилена торговых марок: Expalex производства компании PolyPacific Pty. Ltd, Австрия и Finalloy производства компании Fina Chemicals, Petrofina SA, Бельгия. Характеристики данных материалов приведены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, данные материалы по физико-механическим свойствам являются аналогами друг для друга.

В качестве сырьевых материалов для создания аналога были использованы полимерные материалы производства компании «Сибур», имеющие торговые марки: ДСТ Л 30–01, ДСТ Р 30–00, PP H030. Физико-механические свойства полипропилена PP H030 приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что устойчивость к физическому воздействию при низких температурах у стандартного полипропилена на 45% ниже, чем у полипропиленов, модифицированных бутадиен-стирольным термоэластопластом.

Для связи термоэластопласта с полипропиленом использовался метод совмещения через расплав в процессе экструзии с последующей перегрануляцией.

Условная прочность при растяжении определялась согласно ГОСТ 11262–2017 и для исследуемых зарубежных полимерных композиций составляет: Expalex – 32,0 МПа и Finalloy – 32,1 МПа соответственно, согласно таблице 1.

Относительное удлинение при разрыве определялось по ГОСТ 270–75, так для исследуемых зарубежных полимерных композиций составляет: Expalex – 52% и Finalloy – 55% соответственно, что видно из таблицы 1.

Определение ударной вязкости при -30°С проводилось в соответствии с ГОСТ 4647–2015, результаты данного испытания показали, что материалы Expalex и Finalloy имеют схожие эксплуатационные характеристики при низких температурах.

Температура хрупкости, °С была измерена согласно ГОСТ 16782–92, данный эксперимент доказал, что модифицированные бутадиенстирольным термоэластопластом полипропилены имеют достаточно высокую устойчивость к низким температурам.

Температура плавления, °С была определена по ГОСТ 21553 – 76.

Результаты и обсуждение

В рамках исследования по поиску оптимального соотношения бутадиен-стирольного термоэластопласта (СБС ТЭП) и полипропилена было сформировано шесть экспериментальных композиций. Содержание бутадиен-стирольного термоэластопласта (ДСТ Л 30–01 или ДСТ Р 30–00): пять массовых частей, десять массовых частей и двадцать массовых частей от всей полимерной смеси. Составы композиционных материалов, полученных с использованием ДСТ Л 30–01, представлены в таблице 3, а составы композитов с добавлением ДСТ Р 30–00 приведены в таблице 4.

Для создания композиционного материала был подобран оптимальный технологический режим: установлена подходящая температура расплава, чтобы структура полимера не разрушалась из-за повышенного давления в голове экструдера, и при этом все введенные компоненты полноценно смешались. Так как термоэластопласты перерабатываются в форме расплава, то температуру поднимали выше температуры плавления жестких блоков. В связи с этим, на основе данных, полученных при исследовании температур плавления материалов Expalex и Finalloy, а также полипропилена PP H030, было выявлено, что минимально допустимая температура переработки и изготовления экспериментальных материалов составила – 165°С.

В процессе получения и изготовления образцов 1–6 (таблица 3, 4) было установлено, что 170 °С – оптимальная температура расплава при переработке, при которой не происходит температурная деструкция, а давление в голове экструдера не достигает предельно допустимых значений.

При переработке и изготовлении материалов 4–6 (таблица 4) на основе полипропилена PP H030 и ДСТ Р 30–00 были получены образцы с большим количеством газовых включений, изменение и корректировка технологических режимов производства и переработки не дали видимого результата. При этом материалы на основе полипропилена PP H030 и ДСТ Л 30–01 при получении и переработке имели достаточно однородную структуру. Это говорит о том, что разветвленная структура ДСТ Р 30–00 оказала негативное влияние на качество материала.

После получения и переработки материалы 1–6 прошли ряд испытаний, чтобы определить такие характеристики, как условная прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, ударная вязкость при температуре -30 °С, температура хрупкости и плавления.

На рисунке 1 приведена зависимость изменения условной прочности при растяжении при соотношении полипропилен / бутадиен-стирольный термоэластопласт.

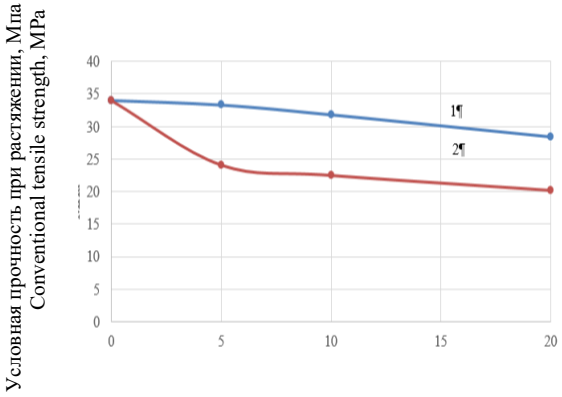


Рисунок 1. Зависимость изменения условной прочности при растяжении при соотношении полипропилен / бутадиен-стирольный термоэластопласт: 1 – композиции 1–3; 2 – композиции 4–6

Figure 1. Dependence of the change in conditional tensile strength on the ratio of polypropylene to butadiene-styrene thermoelastoplast: 1 – compositions 1–3; 2 – compositions 4–6

Как следует из рисунка 1, с ростом содержания бутадиен-стирольного термоэластопласта в композиции уменьшается условная прочность при растяжении. Вместе с этим достаточно заметна разница между композициями с использованием ДСТ Л 30–01 и с использованием ДСТ Р 30–00. Эту разницу возможно объяснить наличием большого количества газовых включений в толще материала и, как следствие, значительное снижение условной прочности при растяжении и неоднородность материала. Таким образом, при использовании ДСТ Л 30–01 условная прочность при растяжении снижается максимально на 27%, а при использовании ДСТ Р 30–00 на 41%.

На рисунке 2 приведена зависимость изменения относительного удлинения при разрыве при соотношении полипропилен / бутадиен-стирольный термоэластопласт.

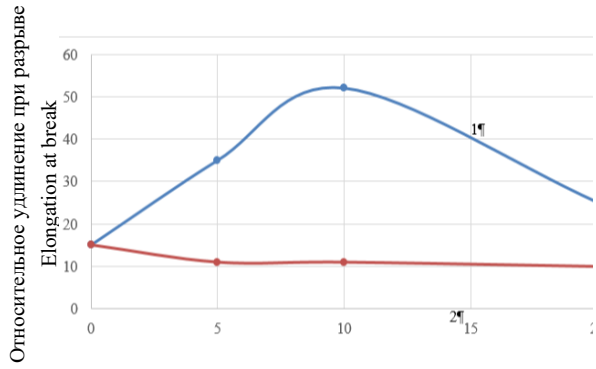


Рисунок 2. Зависимость изменения относительного удлинения при разрыве при соотношении полипропилен/бутадиен-стирольный термоэластопласт: 1 – композиции 1–3; 2 – композиции 4–6

Figure 2. Dependence of the change in relative elongation at break on the ratio of polypropylene to butadiene-styrene thermoelastoplast: 1 – compositions 1–3; 2 – compositions 4–6

Как видно из рисунка 2, относительное удлинение при разрыве растёт по мере увеличения содержания бутадиен-стирольного термоэластопласта, но после 20 массовых частей происходит резкое снижение этого показателя. Это свидетельствует о том, что при введении 10 массовых частей ДСТ Л 30–01 в полипропилен РР Н030, получившийся композиционный материал обладает наибольшей структурной подвижностью по сравнению с материалами, в которые введено 5 и 20 массовых частей ДСТ Л 30–01

Вместе с этим явно прослеживается разница между композициями, созданными на основе ДСТ Л 30–01 и ДСТ Р 30–00, и, вероятно, она связана с неоднородностью материала, в котором используется ДСТ Р 30–00. Таким образом, при использовании ДСТ Л 30–01 возможно получить материал с высоким показателем относительного удлинения при разрыве.

На рисунке 3 приведена зависимость изменения ударной вязкости при -30 °С, при соотношении полипропилен/бутадиен-стирольный термоэластопласт.

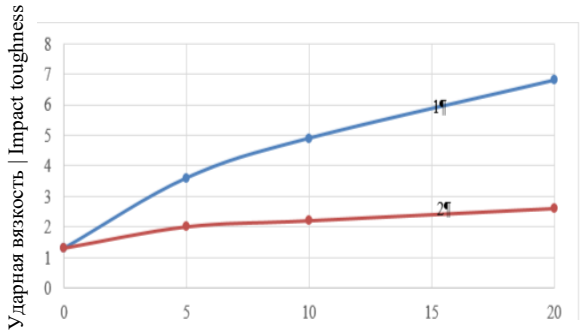


Рисунок 3. Зависимость изменения ударной вязкости при -30°С при соотношении полипропилен / бутадиен-стирольный термоэластопласт: 1 – композиции 1–3; 2 – композиции 4–6

Figure 3. Dependence of the change in impact strength at -30 °C at the poly-propylene / butadiene-styrene thermoelastic layer ratio: 1 – compositions 1–3; 2 – compositions 4–6

На рисунке 3 заметно, что ударная вязкость при -30 °С линейно растёт по мере увеличения содержания бутадиен-стирольного термоэластопласта по сравнению с оригинальным полипропиленом.

На рисунке 4 приведена зависимость изменения температуры хрупкости, при соотношении полипропилен / бутадиен-стирольный термоэластопласт.

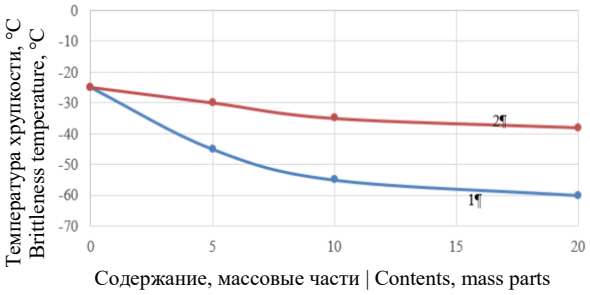


Рисунок 4. Зависимость изменения температуры хрупкости при соотношении полипропилен / бутадиен-стирольный термоэластопласт: 1 – композиции 1–3; 2 – композиции 4–6

Figure 4. Dependence of the change in brittleness temperature at the ratio of polypropylene / butadiene-styrene thermoplastic: 1 – compositions 1–3; 2 – compositions 4–6

На рисунке 4, заметно, что с увеличением содержания бутадиен-стирольного термоэластопласта температура хрупкости линейно снижается, что говорит о повышении устойчивости материала к низким температурам. При этом важно отметить, что у полимерных композиций с применением ДСТ Л 30–01 температура хрупкости значительно ниже.

В ходе экспериментального исследования температуры плавления, ее изменение с увеличением содержания бутадиен-стирольного термоэластопласта не было выявлено.

Таким образом, использование 10 массовых частей бутадиен-стирольного термоэластопласта ДСТ Л 30–01 значительно улучшает свойства материала. Относительное удлинение при разрыве возрастает более чем в 3 раза, что критически важно для работы в условиях динамических нагрузок. Температура хрупкости снижается на 30 °С, что делает материал более устойчивым к низким температурам.

Таблица 1.
Характеристики материалов Expalex и Finalloy
Table 1.
Characteristics of Expalex and Finalloy materials

Показатель Indicator	Expalex	Finalloy
Условная прочность при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	32,0	32,1
Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	52	55
Ударная вязкость при 30°С, МПа Impact strength at 30°C, MPa	4,6	4,9
Температура хрупкости, °С Brittle point, °C	-52	-55
Температура плавления, °С Melting point, °C	165	167

Таблица 2.
Характеристики полипропилена PP H030
Table 2.
Characteristics of polypropylene PP H030

Показатель Indicator	Expalex	Finalloy
Условная прочность при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	32,0	32,1
Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	52	55
Ударная вязкость при 30°С, МПа Impact strength at 30°C, MPa	4,6	4,9
Температура хрупкости, °С Brittle point, °C	-52	-55
Температура плавления, °С Melting point, °C	165	167

Таблица 3.
Состав композиционного материала для эксперимента с добавлением ДСТ Л 30–01 и PP H030
Table 3.
Composition of the composite material for the experiment with the addition of DST L 30–01 and PP H030

Композиция Composition	1	2	3
Количество массовых частей полипропилена PP H030 Number of mass parts of polypropylene PP H030	95 мас. ч.	90 мас. ч.	80 мас. ч.
Количество массовых частей ДСТ Л 30–01 Number of mass parts of DST L 30-01	5 мас. ч.	10 мас. ч.	20 мас. ч.

Таблица 4.
Состав композиционного материала для эксперимента с добавлением ДСТ Р 30–00 и PP H030
Table 4.
Composition of the composite material for the experiment with the addition of DST P 30–00 and PP H030

Композиция Composition	4	5	6
Количество массовых частей полипропилена PP H030 Number of mass parts of polypropylene PP H030	95 мас. ч.	90 мас. ч.	80 мас. ч.
Количество массовых частей ДСТ Л 30–01 Number of mass parts of DST L 30-01	5 мас. ч.	10 мас. ч.	20 мас. ч.

Заключение

Введение 10 массовых частей бутадиен-стирольного термоэластопласта ДСТ Л 30–01 в полипропилен приводит к модифицированию его свойств за счет изменений в надмолекулярной структуре, при этом степень кристалличности полипропилена остается неизменной. ДСТ Л 30–01, вероятно, располагается в межкристаллитных областях полипропилена, препятствуя росту кристаллитов. При введении ДСТ Л 30–01 в размере 10 массовых частей наблюдается пик тангенса угла механических потерь, что указывает на максимальную молекулярную и структурную подвижность, минимум динамического модуля Юнга, о чём свидетельствует изменение относительного удлинения при разрыве. Это говорит об ослаблении внутри- и межмолекулярных взаимодействий в структуре полимера. Эти структурные изменения, в свою очередь, обуславливают наблюдаемые изменения физико-механических характеристик модифицированного полипропилена.

Исходя из вышеперечисленного и результатов экспериментальных исследований получившихся смесей на основе полипропилена с добавлением бутадиен-стирольного термоэластопласта возможно сделать вывод, что наиболее близкой по свойствам композицией к зарубежным материалам Expalex и Finalloy является композиция 2 с использованием 10 массовых частей от смеси бутадиен-стирольного термоэластопласта. Данная композиция является близким по свойствам аналогом, также она имеет потенциал к улучшению эксплуатационных свойств необходимых потребителю и удешевлению себестоимости за счет введения различных минеральных наполнителей.

Литература

1 Ковылова Ю.В., Конченкова А.Н., Ковылов А.Л. и др. Композиционные материалы на основе бутадиен-стирольного каучука // Семьдесят пятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: сборник докладов. В 3-х ч. Ярославль, 2022. С. 116–119.

2 Павленко В.И., Кашибадзе В.В., Бондаренко Н.И. и др. Модифицирование наполнителя полимерных композитов силикатными системами // Международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии и материалы»: сборник докладов. Севастополь, 2021. С. 140–143.

3 Трофимов А.Н., Иванов А.А., Петров С.В. и др. Характеристики полых стеклянных микросфер и проектирование легких полимерных композиционных материалов различного состава и дисперсной структуры // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2023. Т. 59. № 1. С. 56–66.

4 Klyuchnikova N.V., Klepikova M.A., Denisova L.V. Finishing materials in construction using polymer composites // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 012011. P. 012011.

5 Бондаренко Н.И., Бондаренко Д.О., Ковылова Ю.В. и др. О возможности получения нефриттованных глазурей для керамической плитки с применением вторичных источников сырья // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 4. С. 29–32. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_4_29

6 Бондаренко Д.О., Строкова В.В. Использование отходов промышленности для покрытий на мелкозернистом бетоне // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2018. № 10. С. 256–259.

7 Прокопчук Н.Р., Долинская Р.М. Изготовление формовых резинотехнических изделий на основе вторичного сырья // Нефтехимия-2020: сборник статей, 2020. С. 75–76.

8 Гармонов И.В. История науки и промышленности синтетического каучука в СССР 1931–1990 гг. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. 240 с.

9 Евстратов В.Ф., Яшунская Ф.И. Новые каучуки. Свойства и применение: сборник переводов статей из иностранной периодической литературы. Москва: Изд-во иностранной литературы, 1958. 500 с.

10 Шишкина Н.Н., Закирова Л.Ю. Исследование деформационно-прочностных свойств эластомерных композиций с добавками на основе фенилкарбамида // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25. № 8. С. 131–134. doi: 10.55421/1998-7072_2022_25_8_131

11 Догадкин Б.А. Химия и физика каучука. Москва; Ленинград: Госхимиздат, 1947. 422 с.

12 Ключникова Н.В., Пискарева А.О., Урванов К.А. и др. Влияние шунгита на эксплуатационные свойства полимерного композиционного материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 96–105. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-96-105

13 Спиридонов И.С., Белов А.В., Козлов Д.Н. и др. Исследование влияния бутадиен-стирольных каучуков на свойства резины для изделий, работающих в морской воде // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2024. Т. 17. № 1. С. 68–73.

14 Пат. 2172788 Российская Федерация, МПК C22B7/00. Способ переработки пиритных огарков / С.Н. Шин, Р.И. Гуляева; заявитель и патентообладатель Институт металлургии Уральского отделения РАН. № 2000118920/02; заявл. 17.07.2000; опубл. 27.08.2001, Бюл. № [укажите номер бюллетеня]. 7 с.

15 Бондаренко Н.И., Ковылова Ю.В., Даценко А.О. Пиритные огарки как наполнитель композиционного материала на основе бутадиен-стирольного каучука // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 1. С. 78–86. doi: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-78-86

16 Котов А.М. Полимерные поверхностно-активные вещества для повышения нефтеотдачи пластов, 2021. С. 37.

17 Singh P., Katiyar P., Singh H. Impact of compatibilization on polypropylene (PP) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) blend: A review // Materials Today: Proceedings. 2023. V. 78. P. 189–197.

18 Yang K., Zhang L., Chen J. et al. Performance and Preparation of Styrene-Butadiene Copolymer Modified Polypropylene Matte Films // Journal of Composites Science. 2025. V. 9. № 10. P. 566.

19 Luna C.B.B., Silva A.L.N., Araujo R.C. et al. Transforming vulcanized styrene–butadiene waste into valuable raw material: an opportunity for high-impact polypropylene production // Polymer Bulletin. 2024. V. 81. № 1. P. 423–447.

20 Azeez T.O. Thermoplastic Recycling: Properties, Modifications, and Applications // Thermosoftening Plastics, 2020. P. 53.

References

1 Kovyilova Yu.V., Konchenkova A.N., Kovyilov A.L. et al. Composite materials based on styrene-butadiene rubber. Seventy-fifth All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Undergraduates and Postgraduates with International Participation: collection of reports. In 3 parts. Yaroslavl, 2022. pp. 116–119. (in Russian)

2 Pavlenko V.I., Kashibadze V.V., Bondarenko N.I. et al. Modification of filler of polymer composites with silicate systems. International Scientific and Practical Conference "Advanced Technologies and Materials": collection of reports. Sevastopol, 2021. pp. 140–143. (in Russian)

3 Trofimov A.N., Ivanov A.A., Petrov S.V. et al. Characteristics of hollow glass microspheres and design of lightweight polymer composite materials of various composition and dispersed structure. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Chemical Sciences. 2023. vol. 59. no. 1. pp. 56–66. (in Russian)

4 Klyuchnikova N.V., Klepikova M.A., Denisova L.V. Finishing materials in construction using polymer composites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. vol. 880. p. 012011.

5 Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Kovyilova Yu.V. et al. On the possibility of obtaining unglazed glazes for ceramic tiles using secondary raw material sources. Bulletin of the Technological University. 2023. vol. 26. no. 4. pp. 29–32. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_4_29 (in Russian)

6 Bondarenko D.O., Strokova V.V. Use of industrial waste for coatings on fine-grained concrete. Resource and Energy Efficient Technologies in the Regional Construction Complex. 2018. no. 10. pp. 256–259. (in Russian)

7 Prokopchuk N.R., Dolinskaya R.M. Manufacture of molded rubber products based on secondary raw materials. Petrochemistry-2020: collection of articles, 2020. pp. 75–76. (in Russian)

8 Garmonov I.V. History of the science and industry of synthetic rubber in the USSR 1931–1990. Kazan: Publishing House of KNRTU, 2013. 240 p. (in Russian)

9 Evstratov V.F., Yashunskaya F.I. New rubbers. Properties and applications: collection of translations of articles from foreign periodical literature. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1958. 500 p. (in Russian)

10 Shishkina N.N., Zakirova L.Yu. Investigation of deformation and strength properties of elastomeric compositions with additives based on phenylcarbamide. Bulletin of the Technological University. 2022. vol. 25. no. 8. pp. 131–134. doi: 10.55421/1998-7072_2022_25_8_131 (in Russian)

11 Dogadkin B.A. Chemistry and physics of rubber. Moscow; Leningrad: State Chemical Publishing House, 1947. 422 p. (in Russian)

12 Klyuchnikova N.V., Piskareva A.O., Urvanov K.A. et al. Influence of shungite on the operational properties of polymer composite material. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. no. 2. pp. 96–105. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-96-105 (in Russian)

13 Spiridonov I.S., Belov A.V., Kozlov D.N. et al. Study of the influence of styrene-butadiene rubbers on the properties of rubber for products operating in sea water. Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2024. vol. 17. no. 1. pp. 68–73. (in Russian)

14 Shin S.N., Gulyaeva R.I. Method for processing pyrite cinders. Patent RF, no. 2172788, 2001. (in Russian)

15 Bondarenko N.I., Kovyilova Yu.V., Datsenko A.O. Pyrite cinders as filler for composite material based on styrene-butadiene rubber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. no. 1. pp. 78–86. doi: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-78-86 (in Russian)

16 Kotov A.M. Polymeric surfactants for enhanced oil recovery, 2021. p. 37. (in Russian)

17 Singh P., Katiyar P., Singh H. Impact of compatibilization on polypropylene (PP) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) blend: A review. Materials Today: Proceedings. 2023. vol. 78. pp. 189–197.

18 Yang K., Zhang L., Chen J. et al. Performance and Preparation of Styrene-Butadiene Copolymer Modified Polypropylene Matte Films. Journal of Composites Science. 2025. vol. 9. no. 10. p. 566.

19 Luna C.B.B., Silva A.L.N., Araujo R.C. et al. Transforming vulcanized styrene–butadiene waste into valuable raw material: an opportunity for high-impact polypropylene production. Polymer Bulletin. 2024. vol. 81. no. 1. pp. 423–447.

20 Azeez T.O. Thermoplastic Recycling: Properties, Modifications, and Applications. Thermosoftening Plastics, 2020. p. 53.

Сведения об авторах

Надежда И. Бондаренко к.т.н., доцент, кафедра технологии стекла и керамики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, 308012, Россия, bondarenko-71@mail.ru

https://orcid.org/введите здесь orcid

Ирина Д. Скворцова мастрант, кафедра технологии стекла и керамики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, 308012, Россия, suhonosovairina46@gmail.com

Александр А. Скворцов мастрант, кафедра технологии стекла и керамики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород, 308012, Россия, krokus.777@bk.ru

Information about authors

Nadezhda I. Bondarenko Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Glass and Ceramics Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, st. Kostyukova, 46 Belgorod, 308012, Russia, bondarenko-71@mail.ru

https://orcid.org/введите здесь orcid

Irina D. Skvortsova Master student, Department of Glass and Ceramics Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, t. Kostyukova, 46 Belgorod, 308012, Russia, suhonosovairina46@gmail.com

Alexander A. Skvortsov Master student, Department of Glass and Ceramics Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, t. Kostyukova, 46 Belgorod, 308012, Russia, krokus.777@bk.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 11/08/2025	**После редакции** 25/08/2025	**Принята в печать** 04/09/2025

Received 11/08/2025	**Accepted in revised** 25/08/2025	**Accepted** 04/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-241-248 Оригинальная статья/Research article
УДК 691.175 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Создание электропроводящего композита с полимерными материалами для 3D-печати на основе поверхностной модификации

Антонина А. Филимонова [1] aachichirova@mail.ru 0000-0001-6238-188X
Алена Ю. Власова [1] vlasovaay@mail.ru 0000-0001-8520-5432
Рузина Ф. Камалиева [1] rruzzi@yandex.ru 0009-0001-0427-9358
Егор С. Майоров [1] mes.tegatu@gmail.com 0009-0006-3925-1458
Андрей А. Филимонов [1] vip.jokermigel@m.ru 0009-0000-8251-5267

1 Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия

Аннотация. В работе рассмотрена задача придания электропроводящих свойств стандартным полимерным материалам для 3D-печати методом поверхностной модификации. Объектами исследования являлись полилактид, полиэтилентерефталатгликоль и термопластичный полиуретан. В качестве модификатора использован проводящий полимерный комплекс поли(3,4-этилендиокситиофен) поли(стиролсульфонат) (PEDOT:PSS). Метод модификации включал пропитку образцов водной дисперсией PEDOT:PSS с последующей термообработкой. Электрические характеристики композитов определяли путем измерения сопротивления и расчета удельной электропроводности. Установлено, что поверхностная модификация приводит к увеличению электропроводности полимеров на 12–14 порядков по сравнению с исходными диэлектрическими материалами. Максимальная удельная электропроводность достигнута для композита полиэтилентерефталатгликоль + PEDOT:PSS и составила 9.26×10^-2 См/м. Для полилактида значение электропроводности равно 2.73×10^-3 См/м, для термопластичного полиуретана – 3.97×10^-6 См/м, что связано с особенностями структуры и смачиваемости поверхности. Определены оптимальные технологические параметры процесса: время ультразвуковой обработки 30 минут и температура сушки 100 °С. Показано, что разбавление дисперсии водой снижает проводимость, а введение органических растворителей в модификатор неэффективно. Выявлен синергетический эффект при сочетании объемного наполнения полилактида многостенными углеродными нанотрубками и поверхностной модификации PEDOT:PSS, при этом максимальная проводимость наблюдается при содержании 7 % нанотрубок. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенного метода для создания функциональных электропроводящих элементов аддитивного производства.

Ключевые слова: электропроводящий композит, 3D-печать, PEDOT:PSS, удельная проводимость, полимерная матрица, поверхностная модификация.

Creation of an electrically conductive composite with polymer materials for 3D-printing based on surface modification

Antonina A. Filimonova [1] aachichirova@mail.ru 0000-0001-6238-188X
Alyona Yu. Vlasova [1] vlasovaay@mail.ru 0000-0001-8520-5432
Ruzina F. Kamalieva [1] rruzzi@yandex.ru 0009-0001-0427-9358
Egor S. Mayorov [1] mes.tegatu@gmail.com 0009-0006-3925-1458
Andrey A. Filimonov [1] vip.jokermigel@m.ru 0009-0000-8251-5267

1 Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia

Abstract. The study addresses the problem of imparting electrical conductivity to conventional polymer materials for 3D printing by means of surface modification. Polylactide, polyethylene terephthalate glycol, and thermoplastic polyurethane were used as the polymer matrices. The conductive polymer complex poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) was applied as a surface modifier. The modification procedure consisted of impregnating polymer samples with an aqueous PEDOT:PSS dispersion followed by thermal treatment. Electrical properties of the obtained composites were evaluated by measuring resistance and calculating specific electrical conductivity. Surface modification was shown to increase the conductivity of the polymers by 12–14 orders of magnitude compared to the initial dielectric materials. The highest specific conductivity was achieved for the polyethylene terephthalate glycol + PEDOT:PSS composite and reached 9.26×10^-2 S/m. The conductivity of the polylactide-based composite was 2.73×10^-3 S/m, while thermoplastic polyurethane exhibited the lowest value of 3.97×10^-6 S/m, which is attributed to the structural features and reduced wettability of the elastomer surface. Optimal processing parameters were established as 30 minutes of ultrasonic treatment and a drying temperature of 100 °C. Dispersion dilution with water was found to reduce electrical conductivity, whereas the addition of organic solvents to the modifier was ineffective. A synergistic effect was revealed when combining bulk filling of polylactide with multiwalled carbon nanotubes and subsequent surface modification with PEDOT:PSS, with maximum conductivity observed at a nanotube content of 7 %. The results demonstrate the practical potential of the proposed method for manufacturing electrically conductive functional components using additive manufacturing technologies.

Keywords: electrically conductive composite, 3D-printing, PEDOT:PSS, specific conductivity, polymer matrix, surface modification.

Для цитирования
Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф., Майоров Е.С., Филимонов А.А.. 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

For citation
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. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 241–248. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-241-248

© 2025, 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

Внедрение аддитивных технологий в промышленность стимулирует поиск простых и эффективных методов функционализации полимерных материалов, в частности придания им электропроводящих свойств.

Традиционные подходы, рассмотренные в предыдущих исследованиях, включают введение в полимерную матрицу углеродных наполнителей (графит, графен, углеродные нанотрубки) или металлических порошков. Однако эти методы часто сопряжены с технологическими сложностями, такими как необходимость обеспечения равномерного распределения наполнителя, агрегация частиц и ухудшения механических свойств при высоких концентрациях.

Альтернативным перспективным направлением является использование проводящих полимеров, которые могут формировать проводящие слои на поверхности или в объёме материала. Одним из наиболее стабильных и технологичных проводящих полимеров является комплекс PEDOT:PSS, обладающий высокой проводимостью, прозрачностью в видимом диапазоне и хорошей адгезией к различным подложкам.

Цель работы – оценка эффективности поверхностной модификации стандартных полимеров для 3D-печати (PLA, PETG, TPU) проводящим комплексом PEDOT:PSS.

Основная задача заключалась в сравнительном анализе удельной электропроводности полученных композитов и демонстрации значительного улучшения их электропроводящих свойств по сравнению с исходными диэлектрическими материалами.

Материалы и методы

В работе исследовались образцы полимерных материалов, широко используемых в 3D-печати: полилактид (PLA) белого цвета, полиэтилентерефталатгликоль (PETG) красного цвета и термопластичный полиуретан (TPU) чёрного цвета. Также изучались пластины на основе PLA с 10; 7; 5; 2 и 0,5% содержанием многостенных углеродных нанотрубок (мУНТ), полученные методом литья из раствора. Геометрические параметры всех образцов, включая толщину и диаметр, контролировались с помощью микрометра «Mechanic 150 PRO» с точностью ± 0,001 мм. Площадь поперечного сечения рассчитывалась стандартными методами на основе измеренных геометрических параметров.

В таблице 1 представлены характеристики используемых образцов для поверхностной модификации.

Таблица 1.

Характеристики используемых в работе полимеров

Table 1.

Characteristics of polymers used in work

Полимер Polymer	Толщина, мм Thickness, mm	Диаметр, мм Diameter, mm	Площадь сечения, мм^2 Cross-sectional area, mm^2
PETG	4.40	1.78	2.796
TPU	5.78	1.69	2.654
PLA	4.80	1.76	2.764
PLA + % мУНТ	0.10	-	105.307

В качестве модификатора использовалась коммерческая водная дисперсия проводящего полимерного комплекса PEDOT:PSS. Процесс модификации включал две последовательные стадии: перемешивания и термообработку. Пропитка проводилась путём полного погружения образцов в 20 мл дисперсии PEDOT:PSS на 30 минут при постоянном перемешивании ультразвуковым гомогенизатором «Санслар». Термообработка осуществлялась в сушильном шкафу при температуре 100 °C в течение 60 минут.

Электрические характеристики полученных композитов исследовались с помощью измерителя иммитанса Е7–20 и универсального мультиметра APPA 501. По следующей методике образец размещали в ячейку, представляющую собой керамический каркас с резьбой, на которую накручивали проводники, образец зажимали между проводниками, тем самым замыкая цепь, проводники при помощи клемм присоединяли к рабочим разъёмам измерителя иммитанса, в результате чего определяли комплексное сопротивление образца. Определение комплексной проводимости производили при частоте 1 кГц. Для каждого образца проводилась серия из 5 измерений в различных точках с последующим расчётом среднего арифметического значения.

Удельное сопротивление ρ определялось по формуле

$$\rho = RS/l, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление, Ом×см; R – измеренное сопротивление, Ом; S – площадь контакта образца с проводниками, м^2; l – толщина образца.

Удельная электропроводность рассчитывалась по формуле

$$\sigma = 1/\rho, \quad (2)$$

Для определения влияния ключевых технологических параметров на конечную электропроводность композитов был проведён ряд дополнительных серий экспериментов.

Влияние времени перемешивания – образцы каждого полимера погружались в дисперсию PEDOT:PSS и обрабатывались ультразвуковым гомогенизатором в течение 0; 5; 15; 30; 60 и 120 минут с последующей сушкой при 100 °С.

Влияние температуры сушки – образцы, обработанные в дисперсии в течение 30 минут, подвергались сушке при температурах 60; 80 и 100 °С.

Влияние разбавления дисперсии – исходная дисперсия PEDOT:PSS разбавлялась деионизированной водой в объёмных соотношениях 1:1, 1:2 и 1:4. Обработка образцов в полученных растворах проводилась в течение 30 минут с сушкой при 100 °С.

Влияние добавок в состав поверхностного модификатора – были проведены испытания по добавлению в дисперсию PEDOT:PSS по 5% растворителей, таких как диметилсульфоксид, этиленгликоль и глицерин.

Также было проведено исследование образцов, включающих мУНТ. Исследовались образцы композита PLA с объёмным содержанием мУНТ (0,5; 2; 5; 7 и 10%), дополнительно модифицированные PEDOT:PSS по стандартной методике (30 минут перемешивания, сушка при 100°С).

Результаты

После проведения поверхностной модификации стандартных полимерных материалов (PLA, PETG, TPU) по базовой методике (30 минут перемешивания и сушка при 100 °С) были получены следующие значения удельного сопротивления и проводимости (таблица 2).

Таблица 2.

Электрические характеристики композитов после модификации PEDOT:PSS при условиях 30 мин перемешивания и сушки при 100 °С

Table 2.

Electrical characteristics of composites after PEDOT:PSS modification under 30 min of stirring and drying at 100 °С

Материал Material	Сопротивление, Ом Resistance, Om	Удельная проводимость, См/м Specific conductivity, S/m
PETG + PEDOT : PSS	1.70×10^{4}	9.26×10^{-2}
PLA + PEDOT : PSS	6.35×10^{5}	2.73×10^{-3}
TPU + PEDOT : PSS	5.49×10^{8}	3.97×10^{-6}
PLA + 10.0% + PEDOT : PSS	1.63×10^{3}	5.84×10^{-4}
PLA + 7.0% мУНТ + PEDOT : PSS	1.51×10^{3}	6.82×10^{-4}
PLA + 5.0% мУНТ + PEDOT : PSS	1.49×10^{3}	6.02×10^{-4}
PLA + 2.0% мУНТ + PEDOT : PSS	2.30×10^{3}	1.29×10^{-4}
PLA + 0.5% мУНТ + PEDOT : PSS	4.8×10^{6}	3.16×10^{-6}

Результаты измерения удельной проводимости в зависимости от времени ультразвукового перемешивания представлены в таблице 3. Для всех полимеров наблюдается значительной рост проводимости при увеличении времени обработки от 0 до 30 минут с последующей стабилизацией показателей.

Таблица 3.

Зависимость удельной проводимости от времени перемешивания

Table 3.

Dependence of specific conductivity on mixing time

Время перемешивания, мин Mixing time, min	Удельная проводимость, См/м Specific conductivity, S/m		
	PLA	PETG	TPU
0	4.10×10^{-7}	5.16×10^{-5}	1.47×10^{-8}
5	5.20×10^{-6}	2.15×10^{-4}	2.32×10^{-7}
15	1.53×10^{-5}	6.89×10^{-3}	3.01×10^{-6}
30	4.80×10^{-5}	9.26×10^{-2}	3.97×10^{-6}
60	4.96×10^{-5}	9.14×10^{-2}	3.50×10^{-6}
120	4.95×10^{-5}	9.30×10^{-2}	3.84×10^{-6}

Измерения электропроводности после сушки при различных температурах показали выраженную зависимость данного параметра от термического режима (таблица 4). Для PLA и PETG наблюдается монотонный рост проводимости с повышением температуры, тогда как для TPU оптимальной является температура 80 °С.

Таблица 4.

Влияние температуры сушки на удельную проводимость

Table 4.

Effect of drying temperature on specific conductivity

Сушка, °С Drying	Удельная проводимость, См/м Specific conductivity, S/m		
	PLA	PETG	TPU
60	3.34×10^{-6}	8.30×10^{-2}	2.36×10^{-7}
80	4.68×10^{-6}	9.16×10^{-2}	3.97×10^{-6}
100	4.80×10^{-5}	9.26×10^{-2}	3.80×10^{-6}

Разбавление исходной дисперсии деионизированной водой в различных соотношениях продемонстрировало обратную зависимость между степенью разбавления и удельной проводимостью полученных композитов. (Таблица 5). Нужно отметить, что добавка растворителей в дисперсию не дала положительных результатов, удельная проводимость образцов резко снизилась до значений обычных пластиков.

Таблица 5.

Влияние разбавления дисперсии на удельную проводимость

Table 5.

Effect of dispersion dilution on specific conductivity

Концентрация воды к PEDOT:PSS Water concentration to PEDOT:PSS	Удельная проводимость, См/м Specific conductivity, S/m		
	PLA	PETG	TPU
1:4	1.24×10^{-5}	3.69×10^{-2}	2.71×10^{-6}
1:2	4.68×10^{-6}	8.34×10^{-2}	7.64×10^{-7}
1:1	5.38×10^{-7}	6.36×10^{-3}	6.32×10^{-8}

Исследование композитов PLA с различным содержанием мУНТ, дополнительно модифицированных PEDOT:PSS, выявило нелинейную зависимость удельной проводимости от концентрации углеродных нанотрубок (рисунок 1). Максимальное значение проводимости зафиксировано при содержании 7% мУНТ.

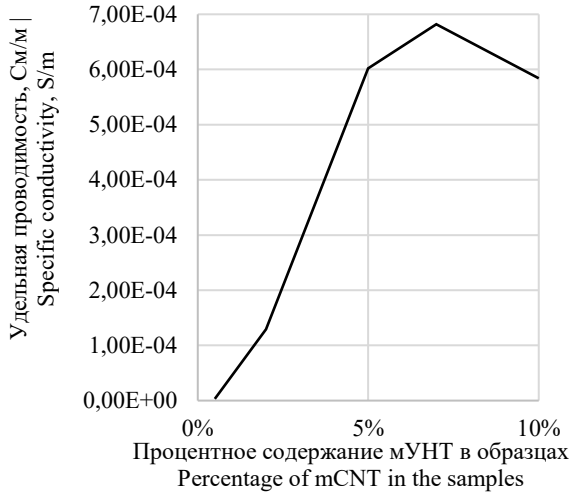


Рисунок 1. Зависимость удельной проводимости образцов от содержания мУНТ

Figure 1. Dependence of the specific conductivity of samples on the content of multi-walled carbon nanotubes

Также стоит отметить, что добавки растворителей в дисперсию не дали положительного результата, свойства проводимости образцов приблизились к начальным значениям.

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность поверхностной модификации PEDOT:PSS для придания электропроводящих свойств полимерным материалам. Наибольшая удельная проводимость зафиксирована для композита PETG + PEDOT : PSS ($9{,}26\times10^{-2}$ См/м), что на 12–14 порядков превышает проводимость исходного диэлектрика. Столь значительное улучшение электрофизических характеристик связано с формированием непрерывного проводящего слоя на поверхности полимера после коалесценции части PEDOT:PSS в процессе сушки [1–2].

Сравнительно низкая проводимость TPU ($3{,}97\times10^{-6}$ См/м) объясняется гидрофобной природой эластомера, затрудняющей смачивание и адсорбцию водной дисперсии [3].

Зависимость проводимости от времени перемешивания (рисунок 2) имеет характерный вид с выходом на насыщение после 30 минут обработки. Начальный рост обусловлен улучшением смачивания поверхности и диффузией дисперсии в поверхностный слой полимера. Достижение плато свидетельствует о завершении формирования равномерного проводящего слоя, при этом дальнейшая обработка не приводит к существенному улучшению характеристик [4–5].

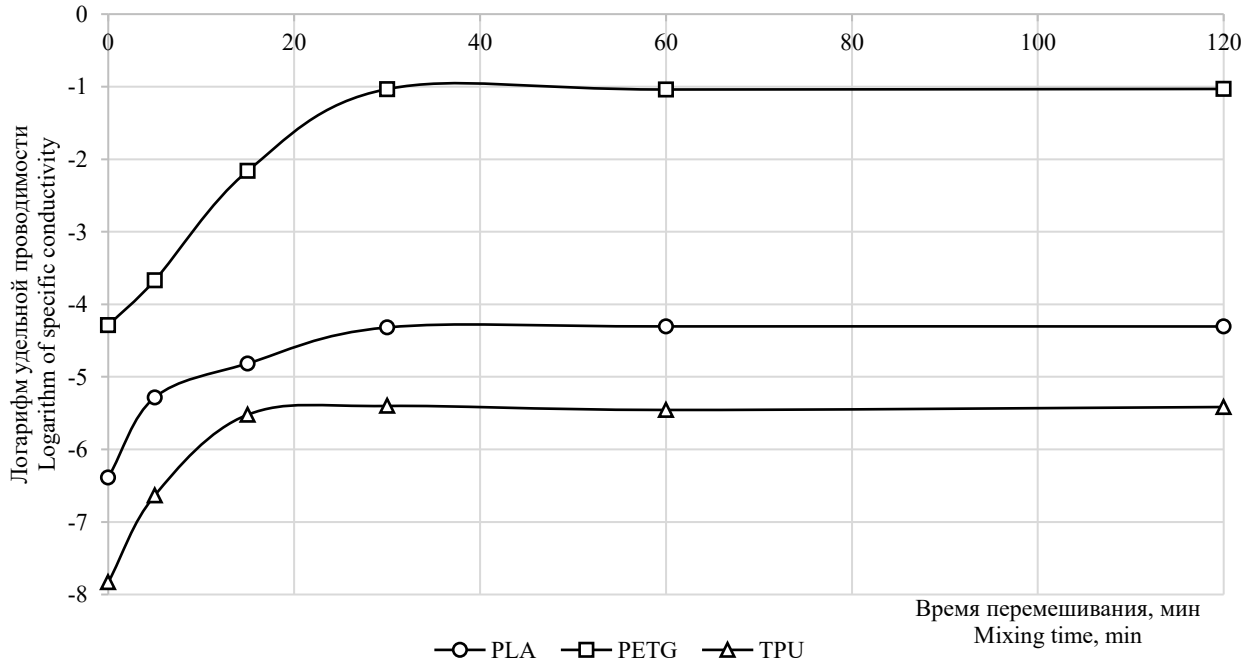


Рисунок 2. Зависимость логарифма удельной проводимости от времени перемешивания

Figure 2. Dependence of the logarithm of specific conductivity on mixing time

Температурный режим сушки оказался критическим параметром (рисунок 3). Рост проводимости при повышении температуры до 100°C для PLA и PETGсвязан с более полным удалением воды и улучшением морфологии проводящего слоя [6–7]. Для TPU оптимальной является температура 80 °C, что, вероятно, обусловлено ограниченной термостабильностью эластомера и возможной деградацией проводящего слоя при более высоких температурах [8].

Разбавление дисперсии водой приводит к ожидаемому снижению проводимости (рисунок 4) вследствие уменьшения концентрации проводящей фазы. Однако при умеренном разбавлении (1:4) для PETG сохраняется достаточно высокая проводимость ($3{,}69\times10^{-2}$ См/м), что может быть использовано для оптимизации расхода реагента в практических приложениях [9].

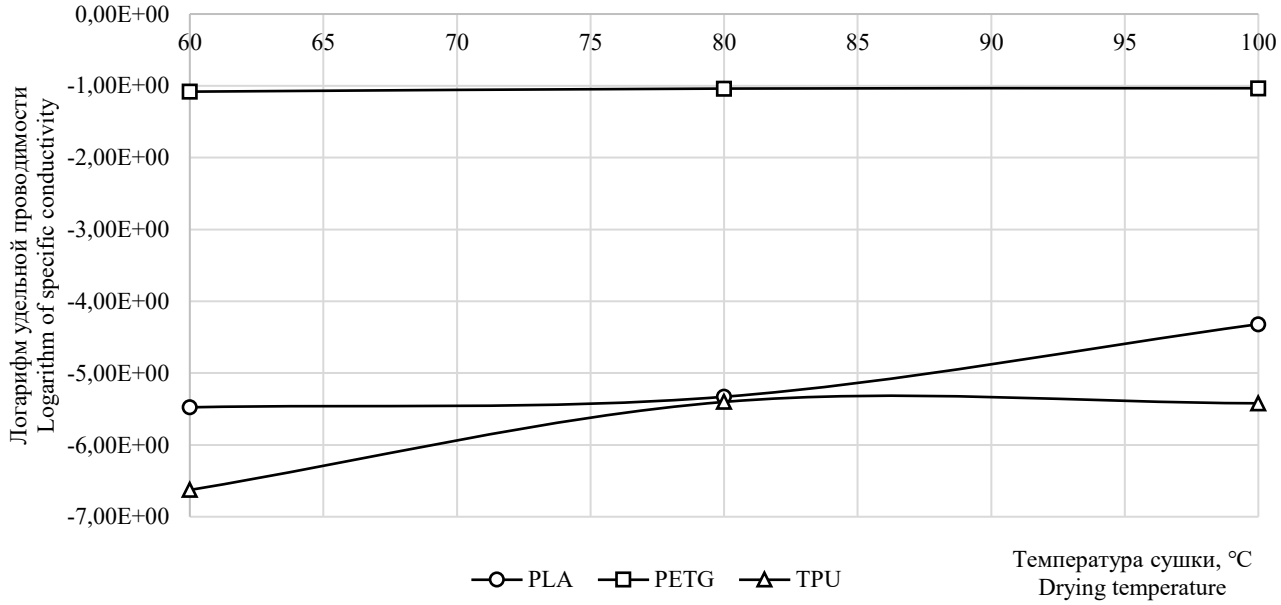


Рисунок 3. Зависимость логарифма удельной проводимости от температуры сушки
Figure 3. Dependence of the logarithm of specific conductivity on the drying temperature

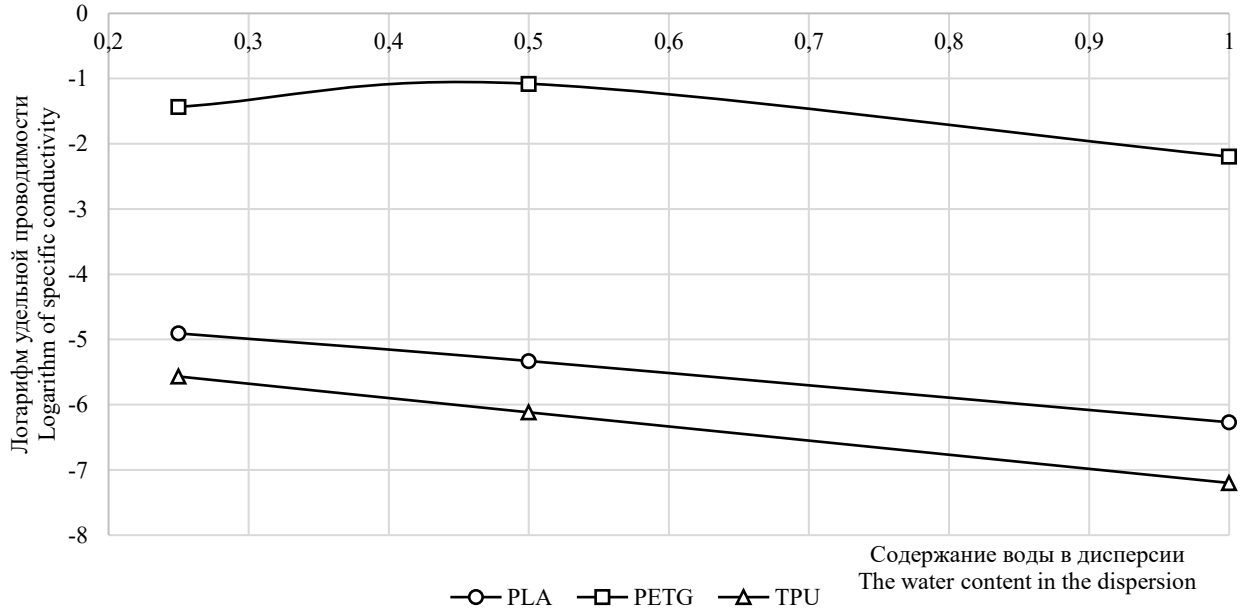


Рисунок 4. Зависимость логарифма удельной проводимости от содержания воды в дисперсии
Figure 4. Dependence of the logarithm of specific conductivity on the water content in the dispersion

Исследование гибридных композитов PLA + мУНТ + PEDOT : PSS выявило наличие синргетического эффекта (график 1). Максимальная проводимость достигается при содержании 7% мУНТ, что на два порядка превышает проводимость образца PLA + PEDOT : PSS. Полученная зависимость носит немонотонный характер со снижением проводимости при дальнейшем увеличении содержания нанотрубок. Наблюдаемый эффект может быть объяснён формированием гибридной проводящей сети, где PEDOT:PSS выполняет функцию проводящих мостиков между агломератами и мУНТ [10]. Снижение проводимости при содержании 10% мУНТ возможно связано с образованием изолирующих прослоек полимера между объёмной и поверхностной проводящими фазами, а также с увеличением вязкости системы, затрудняющей формирование непрерывной проводящей сети.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности комбинированного подхода, сочетающего объёмное и поверхностное наполнение для создания высокоэффективных электропроводящих полимерных композитов [11–12].

Заключение

В ходе комплексного исследования установлена высокая эффективность поверхностной модификации полимеров PLA, PETG и TPU дисперсией PEDOT:PSS для создания электропроводящих композитов. Метод позволяет увеличить удельную электропроводность материалов на 12–14 порядков по сравнению с исходными диэлектриками.

Определены оптимальные параметры процесса, обеспечивающие максимальную проводимость: время ультразвуковой обработки в дисперсии – 30 минут, (0.0926 См/м). Для эластомера TPU метод показал наименьшую эффективность, что связано с особенностями его поверхности.
температура сушки – 100°C. Показано, что разбавление дисперсии водой приводит к снижению проводимости, однако может быть использовано для экономии реагентов.

Наибольшая удельная проводимость достигнута для композита PETG + PEDOT : PSS.

Выявлен синергетический эффект при совместном использовании объёмного наполнителя (мУНТ) и поверхностного покрытия (PEDOT:PSS). Максимальная проводимость гибридного материала PLA + 7% мУНТ + PEDOT : PSS (0.000682 См/м) значительно превосходит проводимость композитов только с мУНТ или только с PEDOT:PSS.

Полученные результаты и оптимизированные технологические параметры открывают широкие возможности для практического применения метода в быстром прототипировании гибкой электроники, сенсоров и функциональных элементов устройств с использованием стандартных материалов для 3D-печати.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-00306, https://rscf.ru/project/25-29-00306/

Литература

1 Zhang X., Yang W., Zhang H. et al. PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors // Nanotechnology and Precision Engineering. 2021. V. 4. P. 045004. doi: 10.1063/10.0006866

2 Huang H., Zhao Y., Cong T. et al. Flexible and Alternately Layered High-Loading Film Electrode based on 3D Carbon Nanocoils and PEDOT:PSS for High-Energy-Density Supercapacitor // Advanced Functional Materials. 2022. V. 32. № 43. P. 2110777. doi: 10.1002/adfm.202110777

3 Cui Y., Zhang F., Chen G. et al. A Stretchable and Transparent Electrode Based on PEGylated Silk Fibroin for In Vivo Dual-Modal Neural-Vascular Activity Probing // Advanced Materials. 2021. V. 33. № 34. P. e2100221. doi: 10.1002/adma.202100221

4 Tang H. Research progress on the modification of organic highly conductive polymer PEDOT:PSS // Applied and Computational Engineering. 2023. V. 25. P. 186–191. doi: 10.54254/2755-2721/25/20230757

5 Решетилов А.Н., Китова А.Е., Тарасов С.Е. и др. Высокопроводящий полимер ПЭДОТ:ПСС – применение в биомедицинских и биоэлектрохимических системах // РЭНСИТ. 2020. № 4. С. 387–402.

6 Abbott J., Ye T., Krenek K. et al. A nanoelectrode array for obtaining intracellular recordings from thousands of connected neurons // Nature Biomedical Engineering. 2019. V. 4. P. 232–241. doi: 10.1038/s41551-019-0455-7

7 Dipalo M., Amin H., Lovato L. et al. Intracellular and extracellular recording of spontaneous action potentials in mammalian neurons and cardiac cells with 3D plasmonic nanoelectrodes // Nano Letters. 2017. V. 17. P. 3932–3939. doi: 10.1021/acs.nanolett.7b01523

8 Рожкова К.С., Новиков Д.В., Петрова А.А. и др. Влияние структурных особенностей PEDOT:PSS на транспорт носителей заряда // Передовые технологии и материалы будущего: сборник статей IV Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения 2021» (Минск, 9 декабря 2021 г.). В 3 т. Минск: БГТУ, 2021. Т. 2. С. 151–155.

9 Пономаренко В.П., Попов В.С., Попов С.В. Фотоэлектроника на основе квазинульмерных структур (обзор) // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 1. С. 25–67.

10 Бадьин А.В., Сидоренко С.В., Григорьев В.П. и др. Полимерные электропроводящие материалы для применения в технологии 3D-печати изделий СВЧ и КВЧ техники. [Город]: [Издательство], 2023. 25 с. (Примечание редактора: Необходимо уточнить тип издания (монография, отчет), город и издательство).

11 Аймуханов А.К., Рожкова К.С., Абдигалиева А.М. Влияние модификации полимера PEDOT:PSS на его оптические характеристики // Актуальные проблемы современной физики и смысловой педагогики = Actual problems of modern physics and semantic pedagogy: сборник статей. [Город]: [Издательство], 2021. С. 45–48.

12 Yağci Ö., Özdemir O.K. Improving the electrical conductivity and electrochemical properties of PEDOT:PSS thin films by Ca and Mg doping // Polymer Bulletin. 2022. V. 79. P. 11493–11509. doi: 10.1007/s00289-021-04028-7

13 Фархутдинов М.М., Фетисов Л.В. Материалы, применяемые для 3D печати в электротехнических устройствах // Современные инновации. 2024. № 2 (45). С. 11–14.

14 Лозицкая А.В., Утехин А.Н., Кондратов А.П. Электропроводящие полимерные композиты на эластичной волокнистой основе // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85. № 2. С. 237–246.

15 Кондратова В.М., Орлов А.С., Кузнецова Е.Д. и др. Особенности электропроводности изделий, изготовленных с помощью 3D-печати методом FFF из саженаполненной полимерной композиции // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 688–693.

16 Каблов Е.Н., Антипов В.В., Алексеев А.А. и др. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). С. 32–51.

17 Mahato S.K., Patel D., Kumar R. et al. Material selection considerations for 3D printing of electrically conductive polymer composites: A review // Materials Today: Proceedings. 2024. V. 113. P. 25–32.

18 Yuk H., Lu B., Lin S. et al. 3D printing of conducting polymers // Nature Communications. 2020. V. 11. P. 1604.

19 Tran C.M., Yue Z., Qin C. et al. 3D Printing of Conducting Polymer Hydrogels for Electrostimulation-Assisted Tissue Engineering // Advanced Materials. 2025. V. 37. № 36. P. 2507779.

20 Distler T., Boccaccini A.R. 3D printing of electrically conductive hydrogels for tissue engineering and biosensors – A review // Acta Biomaterialia. 2020. V. 101. P. 1–13.

21 Li J., Cao J., Lu B. et al. 3D-printed PEDOT:PSS for soft robotics // Nature Reviews Materials. 2023. V. 8. № 9. P. 604–622.

References

1 Zhang X., Yang W., Zhang H., Xie M., Duan X. PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors. Nanotechnology and Precision Engineering. 2021. vol. 4. no. 4. p. 045004. doi: 10.1063/10.0006866

2 Huang H., Zhao Y., Cong T., Li C., Wen N., Zuo X., Guo Y., Zhang H., Fan Z., Pan L. Flexible and Alternately Layered High-Loading Film Electrode based on 3D Carbon Nanocoils and PEDOT:PSS for High-Energy-Density Supercapacitor. Advanced Functional Materials. 2022. vol. 32. no. 18. p. 2110777. doi: 10.1002/adfm.202110777

3 Cui Y., Zhang F., Chen G., Yao L., Zhang N., Liu Z., Li Q., Zhang F., Cui Z., Zhang K., Li P., Cheng Y., Zhang S., Chen X. A Stretchable and Transparent Electrode Based on PEGylated Silk Fibroin for In Vivo Dual-Modal Neural-Vascular Activity Probing. Advanced Materials. 2021. vol. 33. no. 34. p. 2100221. doi: 10.1002/adma.202100221

4 Tang H. Research progress on the modification of organic highly conductive polymer PEDOT:PSS. Applied and Computational Engineering. 2023. vol. 25. pp. 186–191. doi: 10.54254/2755-2721/25/20230757

5 Reshetilov A.N., Kitova A.E., Tarasov S.E., Plekhanova Yu.V., Bykov A.G., Sandramorti A.K., Kuznetsova I.E., Kolesov V.V., Gotovtsev P.M. Highly conductive polymer PEDOT:PSS – application in biomedical and bioelectrochemical systems. RENSIT. 2020. no. 4. (in Russian)

6 Abbott J., Ye T., Krenek K., Gertner R.S., Ban S., Kim Y. et al. A nanoelectrode array for obtaining intracellular recordings from thousands of connected neurons. Nature Biomedical Engineering. 2019. vol. 4. no. 2. pp. 232–241. doi: 10.1038/s41551-019-0455-7

7 Dipalo M., Amin H., Lovato L., Moia F., Caprettini V., Messina G.C. et al. Intracellular and extracellular recording of spontaneous action potentials in mammalian neurons and cardiac cells with 3D plasmonic nanoelectrodes. Nano Letters. 2017. vol. 17. no. 6. pp. 3932–3939. doi: 10.1021/acs.nanolett.7b01523

8 Rozhkova K.S. et al. The effect of structural features of PEDOT:PSS on charge carrier transport. Advanced technologies and materials of the future: proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference "Minsk Scientific Readings 2021", Minsk, December 9, 2021: in 3 vols. Minsk: BSTU, 2021. vol. 2. pp. 151–155. (in Russian)

9 Ponomarenko V.P., Popov V.S., Popov S.V. Photoelectronics based on quasi-zero-dimensional structures (review). Advances in Applied Physics. 2021. vol. 9. no. 1. pp. 25–67. (in Russian)

10 Badin A.V. et al. Polymer electrically conductive materials for use in 3D printing technology for products of microwave and EHF equipment. 2023. (in Russian)

11 Aimukhanov A.K., Rozhkova K.S., Abdigaliyeva A.M. Effect of polymer PEDOT:PSS modification on its optical characteristics. Actual problems of modern physics and semantic pedagogy. 2021. pp. 45–48. (in Russian)

12 Yağci Ö., Özdemir O.K. Improving the electrical conductivity and electrochemical properties of PEDOT:PSS thin films by Ca and Mg doping. Polymer Bulletin. 2022. vol. 79. no. 12. pp. 11493–11509. doi: 10.1007/s00289-021-04028-7

13 Farkhutdinov M.M., Fetisov L.V. Materials used for 3D printing in electrical devices. Modern Innovations. 2024. no. 2 (45). pp. 11–14. (in Russian)

14 Lozitskaya A.V., Utekhin A.N., Kondratov A.P. Electrically conductive polymer composites on an elastic fibrous base. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2023. vol. 85. no. 2. pp. 237–246. (in Russian)

15 Kondratova V.M. et al. Features of electrical conductivity of products manufactured using 3D printing by FFF method from carbon black-filled polymer composite. Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. 2023. no. 11. pp. 688–693. (in Russian)

16 Kablov E.N. et al. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). Proceedings of VIAM. 2022. no. 2 (108). pp. 32–51. (in Russian)

17 Mahato S.K. et al. Material selection considerations for 3D printing of electrically conductive polymer composites: A review. Materials Today: Proceedings. 2024. vol. 113. pp. 25–32.

18 Yuk H., Lu B., Lin S. et al. 3D printing of conducting polymers. Nature Communications. 2020. vol. 11. no. 1. p. 1604.

19 Tran C.M., Yue Z., Qin C. et al. 3D Printing of Conducting Polymer Hydrogels for Electrostimulation-Assisted Tissue Engineering. Advanced Materials. 2025. vol. 37. no. 36. p. 2507779.

20 Distler T., Boccaccini A.R. 3D printing of electrically conductive hydrogels for tissue engineering and biosensors–A review. Acta Biomaterialia. 2020. vol. 101. pp. 1–13.

21 Li J., Cao J., Lu B. et al. 3D-printed PEDOT: PSS for soft robotics. Nature Reviews Materials. 2023. vol. 8. no. 9. pp. 604–622.

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

Рузина Ф. Камалиева студент., инженер, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, rruzzi@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0001-0427-9358

Егор С. Майоров студент, инженер, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, mes.tegatu@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-3925-1458

Андрей А. Филимонов студент, лаборат-исследователь, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, vip.jokermigel@m.ru
https://orcid.org/0009-0000-8251-5267

Information about authors

Antonina A. Filimonova Dr. Sci. (Engin.), assistant professor, Head of the Department of Autonomous Distributed Energy, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, aachichirova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6238-188X

Alyona Yu. Vlasova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, vlasovaay@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8520-5432

Ruzina F. Kamalieva student, research engineer, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, rruzzi@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0001-0427-9358

Egor S. Mayorov student, research engineer, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, mes.tegatu@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-3925-1458

Andrey A. Filimonov student, laboratory researcher, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, vip.jokermigel@m.ru
https://orcid.org/0009-0000-8251-5267

Вклад авторов

Антонина А. Филимонова консультация в ходе исследования
Алена Ю. Власова предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания
Рузина Ф. Камалиева консультация в ходе исследования
Егор С. Майоров обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Андрей А. Филимонов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Antonina A. Filimonova consultation during the study
Alyona Yu. Vlasova proposed a scheme of the experiment and organized production trials
Ruzina F. Kamalieva consultation during the study
Egor S. Mayorov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Andrey A. Filimonov 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 19/08/2025 **После редакции** 26/08/2025 **Принята в печать** 04/09/2025

Received 19/08/2025 **Accepted in revised** 26/08/2025 **Accepted** 04/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-249-254 Оригинальная статья/Research article
УДК 691.175 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование функциональных свойств пьезорезистивного эффекта и джоулева нагрева электропроводящих композитов на основе 3D-печати полимеров с поверхностным слоем PEDOT:PSS

Антонина А. Филимонова [1] aachichirova@mail.ru 0000-0001-6238-188X
Алена Ю. Власова [1] vlasovaay@mail.ru 0000-0001-8520-5432
Рузина Ф. Камалиева [1] rruzzi@ya.ru 0009-0001-0427-9358
Егор С. Майоров [1] mes.tegatu@gmail.com 0009-0006-3925-1458
Андрей А. Филимонов [1] vip.jokermigel@m.ru 0009-0000-8251-5267

1 Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного исследования функциональных свойств электропроводящих композитов, полученных методом поверхностной модификации полимерных материалов для 3D-печати – полилактида (PLA), полиэтилентерефталатгликоля (PETG) и термопластичного полиуретана (TPU) – проводящим полимерным комплексом поли(3,4-этилендиокситиофен):поли(стиролсульфонат) (PEDOT:PSS). Исследован пьезорезистивный отклик образцов при механической деформации на изгиб в диапазоне 0–2%. Проведен расчет коэффициента тензочувствительности (Gauge Factor, GF). Наибольшую чувствительность продемонстрировал композит PETG + PEDOT:PSS с максимальным GF ≈ 47, что связано с формированием жесткого и хорошо адгезированного проводящего слоя, подверженного растрескиванию при деформации. Для композитов PLA + PEDOT:PSS и TPU + PEDOT:PSS максимальные значения GF составили ≈19.5 и ≈13.5 соответственно. Исследование эффекта Джоулева нагрева при подаче постоянного напряжения 70 В выявило незначительный рост температуры образцов (ΔT = 0.5–1.9 °C), что обусловлено высоким удельным сопротивлением поверхностного слоя. Показано, что, несмотря на ограниченную эффективность для целей активного нагрева, материалы демонстрируют стабильность при прохождении тока. Результаты работы подтверждают перспективность применения разработанных композитов для создания пассивных датчиков деформации и гибких электронных компонентов методами аддитивных технологий на атомных электростанциях (АЭС).

Ключевые слова: электропроводящий композит, 3D-печать, PEDOT:PSS, пьезорезистивный эффект, тензочувствительность, Gauge Factor, деформация, Джоулев нагрев, атомная электростанция.

Study of the functional properties of the piezoresistive effect and Joule heating of electrically conductive composites based on 3D-printed polymers with a PEDOT:PSS surface layer

Antonina A. Filimonova [1] aachichirova@mail.ru 0000-0001-6238-188X
Alyona Yu. Vlasova [1] vlasovaay@mail.ru 0000-0001-8520-5432
Ruzina F. Kamalieva [1] rruzzi@ya.ru 0009-0001-0427-9358
Egor S. Mayorov [1] mes.tegatu@gmail.com 0009-0006-3925-1458
Andrey A. Filimonov [1] vip.jokermigel@m.ru 0009-0000-8251-5267

1 Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive study of the functional properties of electrically conductive composites obtained by surface modification of polymer materials for 3D printing – polylactide (PLA), polyethylene terephthalate glycol (PETG), and thermoplastic polyurethane (TPU) – with a conducting polymer complex of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS). The piezoresistive response of the samples was studied under mechanical bending deformation in the range of 0–2%. The gauge factor (GF) was calculated. The PETG + PEDOT:PSS composite demonstrated the highest sensitivity with a maximum GF of ≈ 47, which is due to the formation of a rigid and well-adhered conductive layer that is prone to cracking during deformation. For the PLA + PEDOT:PSS and TPU + PEDOT:PSS composites, the maximum GF values were ≈ 19.5 and ≈ 13.5, respectively. A study of the Joule heating effect under a constant voltage of 70 V revealed a slight increase in the sample temperature (ΔT = 0.5–1.9 °C), which is due to the high resistivity of the surface layer. It was shown that, despite their limited effectiveness for active heating purposes, the materials exhibit stability when subjected to current flow. These findings demonstrate the potential of these composites for the development of passive strain sensors and flexible electronic components using additive manufacturing techniques in nuclear power plants (NPPs).

Keywords: electrically conductive composite, 3D printing, PEDOT:PSS, piezoresistive effect, strain sensitivity, Gauge Factor, deformation, Joule heating, nuclear power plant.

Для цитирования
Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф., Майоров Е.С., Филимонов А.А.. Исследование функциональных свойств пьезорезистивного эффекта и джоулева нагрева электропроводящих композитов на основе 3D-печати полимеров с поверхностным слоем PEDOT:PSS // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 249–254. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-249-254

For citation
Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Kamalieva R.F., Mayorov E.S., Filimonov A.A Study of the functional properties of the piezoresistive effect and Joule heating of electrically conductive composites based on 3D-printed polymers with a PEDOT:PSS surface layer. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 249–254. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-249-254

© 2025, 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

Бурное развитие технологий гибкой и растяжимой электроники стимулирует интенсивный поиск новых функциональных материалов, сочетающих в себе электропроводящие свойства и способность обратимо изменять свои электрофизические характеристики под воздействием внешних стимулов, таких как механическая деформация. Особый интерес в этом контексте представляют проводящие полимеры, в частности, комплекс PEDOT:PSS, который является одним из наиболее стабильных и технологичных материалов своего класса.

В предыдущих работах была успешно продемонстрирована эффективность метода поверхностной модификации стандартных полимерных филаментов для 3D-печати (PLA, PETG, TPU) дисперсией PEDOT:PSS. Было установлено, что данный метод позволяет увеличить удельную электропроводность материалов на 12–14 порядков, достигнув максимального значения для композита PETG + PEDOT : PSS ($9{,}26 \cdot 10^{-2}$ См/м). Однако для практического применения созданных композитов в качестве функциональных элементов (например, датчиков или нагревателей) необходимо изучение их поведения в реальных рабочих условиях.

Настоящее исследование логически продолжает предыдущую работу и направлено на всестороннее изучение двух ключевых функциональных свойств полученных композитов: пьезорезистивного эффекта – изменения электрического сопротивления при механической деформации, что является основой для создания датчиков деформации, изгиба и давления и эффекта Джоулева нагрева – способности материала нагреваться при пропускании через него электрического тока, что определяет применимость в качестве нагревательных элементов или в системах теплового управления.

Особое внимание уделено количественной оценке тензочувствительности материалов путем расчета коэффициента тензочувствительности (Gauge Factor, GF).

Материалы и методы

Образцы из полилактида (PLA), полиэтилентерефталатгликоля (PETG) и термопластичного полиуретана (TPU) были подвергнуты поверхностной модификации путем пропитки в коммерческой водной дисперсии PEDOT:PSS (Clevios PH 1000) в течение 30 минут с последующей термообработкой при 100 °C в течение 60 минут. Использовались образцы в виде консольных балок стандартных размеров, подготовленные для механических испытаний на изгиб.

Механическая деформация образцов осуществлялась путем контролируемого изгиба с фиксацией величины прогиба. Деформация (ε) рассчитывалась по стандартным формулам для консольной балки. Значения деформации составляли 0,0; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0%. Электрическое сопротивление образцов измерялось на каждой ступени деформации с помощью высокоточного цифрового мультиметра MASTECH MAS830L по двухточечной схеме. Для обеспечения надежного контакта использовались позолоченные щупы. Для каждого образца проводилась серия из 3 измерений с последующим усреднением.

Для количественной оценки пьезорезистивной чувствительности материалов был рассчитан коэффициент тензочувствительности (GF) по формуле:

$GF=(\Delta R/R_0)/\varepsilon=((R-R_0)/R_0)/\varepsilon$

$$GF = \left(\Delta R / R_0\right)/\varepsilon = \left(\left(R - R_0\right)/R_0\right)/\varepsilon, \qquad (1)$$

где R_0 – исходное электрическое сопротивление образца при нулевой деформации, R – сопротивление при деформации ε, $\Delta R/R_0$ – относительное изменение сопротивления.

Образцы помещались на теплоизолирующую подложку. К их концам подводилось постоянное напряжение 70 В от источника питания. Температура поверхности в центральной части образца контролировалась с помощью бесконтактного инфракрасного пирометра МЕГЕОН 16400 с точностью ±0.5 °C. Измерения температуры проводились до подачи напряжения и через 5 минут после подачи, когда температура образца стабилизировалась. Рассчитывался перегрев $\Delta T = T_{кон} - T_{нач.}$

Результаты

Результаты измерений сопротивления и рассчитанные значения относительного изменения сопротивления ($\Delta R/R_0$) в зависимости от приложенной деформации представлены в таблице 1 и графике 1.

Таблица 1.

Электрические характеристики композитов при механической деформации

Table 1.

Electrical characteristics of composites during mechanical deformation

Материал | Material	R_0, кОм	$\Delta R/R_0$ (0.5%)	$\Delta R/R_0$ (1%)	$\Delta R/R_0$ (1.5%)	$\Delta R/R_0$ (2%)
PLA + PEDOT : PSS	635	0,12	0,25	0,31	0,39
PETG + PEDOT : PSS	17	0,12	0,35	0,76	0,94
TPU + PEDOT : PSS	549000	0,08	0,11	0,23	0,27

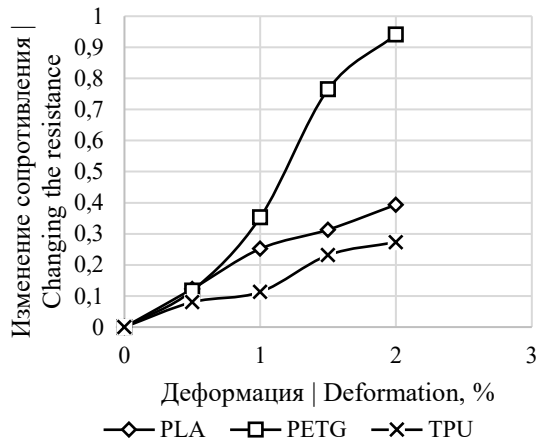


Рисунок 1. Зависимость электрического сопротивления от деформации образцов

Figure 1. Dependence of electrical resistance on deformation of samples

На основе данных Таблицы 1 были рассчитаны коэффициенты тензочувствительности (GF) для каждого материала на различных ступенях деформации. Результаты представлены в таблице 2.

Результаты измерения температуры образцов до и после подачи напряжения 70 В представлены в таблице 3.

Таблица 2.

Коэффициент тензочувствительности (GF) композитов

Table 2.

The strain sensitivity coefficient (GF) of composites

Материал | Material	GF (0.5%)	GF (1%)	GF (1.5%)	GF (2%)	$GF_{ср}$
PLA + PEDOT : PSS	24,0	25,0	20,7	19,5	22,3
PETG + PEDOT : PSS	24,0	35,0	50,7	47,0	39,2
TPU + PEDOT : PSS	16,0	11,0	15,3	13,5	13,9

Таблица 3.

Параметры Джоулева нагрева композитов при U = 70 В

Table 3.

Joule heating parameters of composites at U = 70 V

Материал | Material	R, кОм	Начальная T, °C	Конечная T, °C	ΔT, °C
TPU + PEDOT : PSS	549	23,0	24,2	+1,2
PETG + PEDOT : PSS	17	22,9	23,4	+0,5
PLA + PEDOT : PSS	635	21,3	23,2	+1,9

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют выраженный пьезорезистивный отклик всех исследованных композитов, однако его величина и характер существенно различаются в зависимости от типа полимерной матрицы [1–3].

Композит PETG + PEDOT : PSS показал наивысшую тензочувствительность со средним значением GF = 39,2 и максимальным GF ≈ 50,7 при деформации 1,5% (график 2). Столь высокие значения GF, на порядок превышающие таковые для металлических тензорезисторов (GF ≈ 2), свидетельствуют о преимущественно хрупком характере разрушения проводящего слоя PEDOT:PSS на поверхности PETG. Жесткая матрица PETG и хорошая адгезия к ней проводящего полимера приводят к тому, что при изгибе в слое PEDOT:PSS возникают микротрещины, которые эффективно разрывают проводящие пути, вызывая резкое увеличение сопротивления [4–7]. Нелинейный рост GF с увеличением деформации (с 24 при 0,5% до 50,7 при 1.5%) подтверждает этот механизм, указывая на прогрессирующее повреждение проводящей сети.

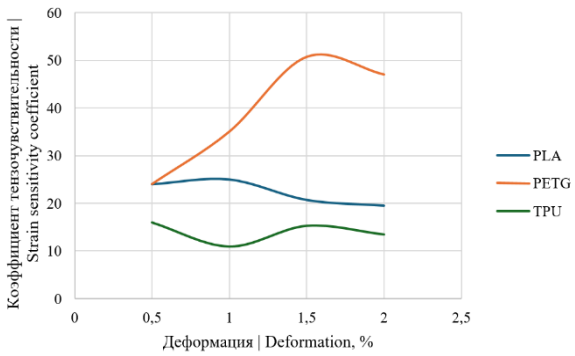


Рисунок 2. Зависимость коэффициента тензочувствительности от деформации образцов

Figure 2. Dependence of the strain sensitivity coefficient on the deformation of the samples

Композит PLA + PEDOT : PSS демонстрирует умеренную и достаточно стабильную тензочувствительность со средним GF ≈ 22,3 (график 2). Его поведение носит более линейный характер по сравнению с PETG, что может быть связано с иным характером взаимодействия PEDOT:PSS с поверхностью PLA. Возможно,

на поверхности PLA формируется менее хрупкий и более устойчивый к образованию макротрещин проводящий слой, что приводит к более плавному изменению сопротивления [8].

Композит TPU + PEDOT : PSS обладает наименьшей чувствительностью к деформации ($GF_{ср} \approx 13.9$) (график 2). Это полностью согласуется с эластомерной природой TPU. Гибкая и растяжимая матрица эффективно поглощает механическую деформацию, минимизируя передачу нагрузок на хрупкий проводящий слой PEDOT:PSS. В результате проводящая сеть испытывает меньшие повреждения, что приводит к меньшему изменению сопротивления. Стоит отметить немонотонное изменение GF для TPU (16.0 → 11.0 → 15.3 → 13.5), что может быть связано с комплексной перестройкой как проводящего слоя, так и самой полимерной матрицы при деформации [9].

Нагрев всех образцов при подаче напряжения 70 В оказался незначительным ($\Delta T < 2$ °C), что является прямым следствием их высокого удельного сопротивления. Несмотря на то, что образец PETG + PEDOT : PSS обладал наименьшим сопротивлением и, следовательно, в нем рассеивалась наибольшая мощность (~0.29 Вт), его нагрев оказался минимальным ($\Delta T = 0.5$ °C). Это может объясняться лучшей теплопроводностью материала PETG по сравнению с PLA и TPU, что способствовало более эффективному отводу тепла в держатель и окружающую среду (график 3) [10–11].

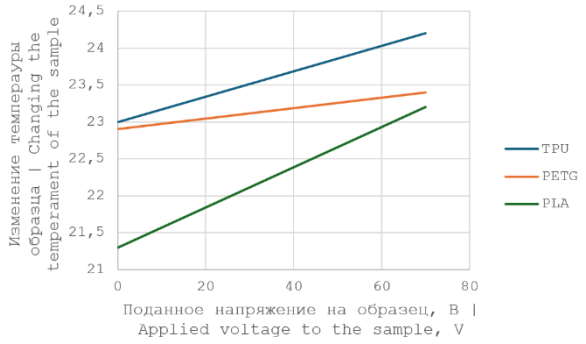


Рисунок 3. Изменение температуры образцов, °C от напряжения, В

Figure 3. Change in sample temperature, °C, with voltage, V

Наибольший нагрев наблюдался у образца PLA + PEDOT : PSS ($\Delta T = 1.9$ °C), хотя рассеиваемая мощность в нем была крайне мала (~0.008 Вт). Это указывает на очень низкую эффективность теплоотвода в данной системе, возможно, из-за особенностей контакта с держателем и низкой теплопроводности самого PLA.

Образец TPU + PEDOT : PSS показал промежуточное значение $\Delta T = 1.2$ °C при очень низкой рассеиваемой мощности. Низкая теплопроводность эластомера TPU способствует удержанию тепла в зоне проводящего слоя.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в текущей конфигурации композиты не могут эффективно использоваться в качестве активных нагревательных элементов, требующих значительного тепловыделения. Однако эксперимент подтвердил целостность проводящих путей и способность материалов выдерживать приложенное электрическое поле без пробоя, что важно для их применения в гибкой электронике, где возможны умеренные токовые нагрузки [12].

Заключение

В ходе комплексного исследования функциональных свойств электропроводящих композитов на основе 3D-печатных полимеров, модифицированных PEDOT:PSS, получены следующие основные результаты. Все исследованные композиты обладают выраженным пьезорезистивным эффектом. Количественно оценена их тензочувствительность путем расчета коэффициента Gauge Factor (GF). Наибольшей чувствительностью к деформации характеризуется композит PETG + PEDOT : PSS, у которого максимальное значение GF достигло ~47–51, а среднее составило 39.2. Это делает его высокоперспективным материалом для создания датчиков деформации и изгиба. Композиты PLA + PEDOT : PSS ($GF_{ср} \approx 22.3$) и TPU + PEDOT : PSS ($GF_{ср} \approx 13.9$) демонстрируют умеренную и низкую тензочувствительность соответственно, что определяется механическими свойствами полимерной матрицы и характером ее взаимодействия с проводящим слоем.

Исследование эффекта Джоулева нагрева при напряжении 70 В показало незначительный рост температуры образцов ($\Delta T = 0.5 – 1.9$ °C), что обусловлено высоким удельным сопротивлением поверхностного проводящего слоя. Прямое применение данных материалов в качестве нагревателей малоперспективно, однако подтверждена их стабильность при пропускании электрического тока. Установленные зависимости «деформация–сопротивление» и количественные значения GF являются основой для проектирования сенсорных устройств. Простота технологии получения и использования стандартных материалов 3D-печати открывает широкие возможности для быстрого прототипирования гибкой электроники и интеллектуальных структур с сенсорными функциями.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-29-00306, https://rscf.ru/project/25-29-00306/

Литература

1 Zhang X., Yang W., Zhang H. et al. PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors // Nanotechnology and Precision Engineering. 2021. V. 4. P. 045004. doi: 10.1063/10.0006866

2 Huang H., Zhao Y., Cong T. et al. Flexible and Alternately Layered High-Loading Film Electrode based on 3D Carbon Nanocoils and PEDOT:PSS for High-Energy-Density Supercapacitor // Advanced Functional Materials. 2022. V. 32. P. 2110777. doi: 10.1002/adfm.202110777

3 Cui Y., Zhang F., Chen G. et al. A Stretchable and Transparent Electrode Based on PEGylated Silk Fibroin for In Vivo Dual-Modal Neural-Vascular Activity Probing // Advanced Materials. 2021. V. 33. № 34. P. e2100221. doi: 10.1002/adma.202100221

4 Tang H. Research progress on the modification of organic highly conductive polymer PEDOT:PSS // Applied and Computational Engineering. 2023. V. 25. P. 186–191. doi: 10.54254/2755-2721/25/20230757

5 Решетилов А.Н., Китова А.Е., Тарасов С.Е. и др. Высокопроводящий полимер ПЭДОТ:ПСС – применение в биомедицинских и биоэлектрохимических системах // РЭНСИТ. 2020. № 4. С. 387–402.

6 Abbott J., Ye T., Krenek K. et al. A nanoelectrode array for obtaining intracellular recordings from thousands of connected neurons // Nature Biomedical Engineering. 2019. V. 4. P. 232–241. doi: 10.1038/s41551-019-0455-7

7 Melle G., Bruno U., Gallo V. et al. Intracellular recording of human cardiac action potentials on market-available multielectrode array platforms // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2020. V. 8. P. 66. doi: 10.3389/fbioe.2020.00066

8 Рожкова К.С., Новиков Д.В., Петрова А.А. и др. Влияние структурных особенностей PEDOT:PSS на транспорт носителей заряда // Передовые технологии и материалы будущего: сборник статей IV Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения 2021» (Минск, 9 декабря 2021 г.). В 3 т. Минск: БГТУ, 2021. Т. 2. С. 151–155.

9 Пономаренко В.П., Попов В.С., Попов С.В. Фотоэлектроника на основе квазинульмерных структур (обзор) // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 1. С. 25–67.

10 Фархутдинов М.М., Фетисов Л.В. Материалы, применяемые для 3D печати в электротехнических устройствах // Современные инновации. 2024. № 2 (45). С. 11–14.

11 Аймуханов А.К., Рожкова К.С., Абдигалиева А.М. Влияние модификации полимера PEDOT:PSS на его оптические характеристики // Актуальные проблемы современной физики и смысловой педагогики = Actual problems of modern physics and semantic pedagogy: сборник статей, 2021. С. 45–48.

12 Yağci Ö., Özdemir O.K. Improving the electrical conductivity and electrochemical properties of PEDOT:PSS thin films by Ca and Mg doping // Polymer Bulletin. 2022. V. 79. P. 11493–11509. doi: 10.1007/s00289-021-04028-7

13 Jain N., Waidi Y.O. The Multifaceted Role of 3D Printed Conducting Polymers in Next-Generation Energy Devices: A Critical Perspective // JACS Au. 2025. V. 5. № 2. P. 411–425. doi: 10.1021/jacsau.4c00796

14 Saadi O.W., Khan K.A. Advancements in vat photopolymerization for piezoresistive sensors: materials, mechanisms, and applications // Virtual and Physical Prototyping. 2025. V. 20. № 1. P. e2505994. doi: 10.1080/17452759.2025.2505994

15 Baysal H.E., Güner S., Günsel A. et al. Omnidirectional 3D Printing of PEDOT:PSS Aerogels with Tunable Electromechanical Performance: A Playground for Unconventional Stretchable Interconnects and Thermoelectrics // Advanced Science. 2025. V. 12. № 11. P. 2412491.

16 Lee B.M., Nguyen Q.H., Shen W. Flexible multifunctional sensors using 3D-printed PEDOT:PSS composites // IEEE Sensors Journal. 2024. V. 24. № 6. P. 7584–7592.

17 Fan W., Zhang L., Chen Y. et al. All-3D-Printed PEDOT:PSS-Based Stretchable Thermoelectric Devices for Power Generation // ACS Applied Materials & Interfaces. 2025. V. 17. № 1. P. 1798–1808.

18 Iervolino F., Suriano R., Cavallaro M. et al. Additively Manufactured Polymers for Electronic Components // Applied Sciences. 2025. V. 15. № 15. P. 8689.

19 Patil I.G., Thakur K., Nath S.S. et al. 3D-printed energy harvesting devices for flexible and wearable electronics // Sustainable Energy & Fuels. 2024. V. 8. № 24. P. 5731–5767.

20 Li J., Cao J., Lu B. et al. 3D-printed PEDOT:PSS for soft robotics // Nature Reviews Materials. 2023. V. 8. № 9. P. 604–622.

References

1 Zhang X., Yang W., Zhang H. et al. PEDOT:PSS: From conductive polymers to sensors. Nanotechnology and Precision Engineering. 2021. vol. 4. p. 045004. doi: 10.1063/10.0006866

2 Huang H., Zhao Y., Cong T. et al. Flexible and Alternately Layered High-Loading Film Electrode based on 3D Carbon Nanocoils and PEDOT:PSS for High-Energy-Density Supercapacitor. Advanced Functional Materials. 2022. vol. 32. p. 2110777. doi: 10.1002/adfm.202110777

3 Cui Y., Zhang F., Chen G. et al. A Stretchable and Transparent Electrode Based on PEGylated Silk Fibroin for In Vivo Dual-Modal Neural-Vascular Activity Probing. Advanced Materials. 2021. vol. 33. no. 34. p. e2100221. doi: 10.1002/adma.202100221

4 Tang H. Research progress on the modification of organic highly conductive polymer PEDOT:PSS. Applied and Computational Engineering. 2023. vol. 25. pp. 186–191. doi: 10.54254/2755-2721/25/20230757

5 Reshetilov A.N., Kitova A.E., Tarasov S.E. et al. Highly conductive polymer PEDOT:PSS – application in biomedical and bioelectrochemical systems. RENSIT. 2020. no. 4. pp. 387–402. (in Russian)

6 Abbott J., Ye T., Krenek K. et al. A nanoelectrode array for obtaining intracellular recordings from thousands of connected neurons. Nature Biomedical Engineering. 2019. vol. 4. pp. 232–241. doi: 10.1038/s41551-019-0455-7

7 Melle G., Bruno U., Gallo V. et al. Intracellular recording of human cardiac action potentials on market-available multielectrode array platforms. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2020. vol. 8. p. 66. doi: 10.3389/fbioe.2020.00066

8 Rozhkova K.S., Novikov D.V., Petrova A.A. et al. The effect of structural features of PEDOT:PSS on charge carrier transport. Advanced technologies and materials of the future: collection of articles of the IV International Scientific and Technical Conference "Minsk Scientific Readings 2021" (Minsk, December 9, 2021). In 3 vols. Minsk: BSTU, 2021. vol. 2. pp. 151–155. (in Russian)

9 Ponomarenko V.P., Popov V.S., Popov S.V. Photoelectronics based on quasi-zero-dimensional structures (review). Advances in Applied Physics. 2021. vol. 9. no. 1. pp. 25–67. (in Russian)

10 Farkhutdinov M.M., Fetisov L.V. Materials used for 3D printing in electrical devices. Modern Innovations. 2024. no. 2 (45). pp. 11–14. (in Russian)

11 Aimukhanov A.K., Rozhkova K.S., Abdigaliyeva A.M. Effect of polymer PEDOT:PSS modification on its optical characteristics. Actual problems of modern physics and semantic pedagogy: collection of articles, 2021. pp. 45–48. (in Russian)

12 Yağci Ö., Özdemir O.K. Improving the electrical conductivity and electrochemical properties of PEDOT:PSS thin films by Ca and Mg doping. Polymer Bulletin. 2022. vol. 79. pp. 11493–11509. doi: 10.1007/s00289-021-04028-7

13 Jain N., Waidi Y.O. The Multifaceted Role of 3D Printed Conducting Polymers in Next-Generation Energy Devices: A Critical Perspective. JACS Au. 2025. vol. 5. no. 2. pp. 411–425. doi: 10.1021/jacsau.4c00796

14 Saadi O.W., Khan K.A. Advancements in vat photopolymerization for piezoresistive sensors: materials, mechanisms, and applications. Virtual and Physical Prototyping. 2025. vol. 20. no. 1. p. e2505994. doi: 10.1080/17452759.2025.2505994

15 Baysal H.E., Güner S., Günsel A. et al. Omnidirectional 3D Printing of PEDOT:PSS Aerogels with Tunable Electromechanical Performance: A Playground for Unconventional Stretchable Interconnects and Thermoelectrics. Advanced Science. 2025. vol. 12. no. 11. p. 2412491.

16 Lee B.M., Nguyen Q.H., Shen W. Flexible multifunctional sensors using 3D-printed PEDOT:PSS composites. IEEE Sensors Journal. 2024. vol. 24. no. 6. pp. 7584–7592.

17 Fan W., Zhang L., Chen Y. et al. All-3D-Printed PEDOT:PSS-Based Stretchable Thermoelectric Devices for Power Generation. ACS Applied Materials & Interfaces. 2025. vol. 17. no. 1. pp. 1798–1808.

18 Iervolino F., Suriano R., Cavallaro M. et al. Additively Manufactured Polymers for Electronic Components. Applied Sciences. 2025. vol. 15. no. 15. p. 8689.

19 Patil I.G., Thakur K., Nath S.S. et al. 3D-printed energy harvesting devices for flexible and wearable electronics. Sustainable Energy & Fuels. 2024. vol. 8. no. 24. pp. 5731–5767.

20 Li J., Cao J., Lu B. et al. 3D-printed PEDOT: PSS for soft robotics. Nature Reviews Materials. 2023. vol. 8. no. 9. pp. 604–622.

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

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

Егор С. Майоров студент., инженер, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, mes.tegatu@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-3925-1458

Андрей А. Филимонов студент, лаборат-исследователь, кафедра атомные и тепловые электрические станции, Казанский государственный энергетический университет, ул. Красносельская, 51, г. Казань, 420066, Россия, vip.jokermigel@m.ru
https://orcid.org/0009-0000-8251-5267

Information about authors

Antonina A. Filimonova Dr. Sci. (Engin.), assistant professor, Head of the Department of Autonomous Distributed Energy, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, aachichirova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6238-188X

Alyona Yu. Vlasova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, vlasovaay@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-8520-5432

Ruzina F. Kamalieva student, research engineer, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, rruzzi@ya.ru
https://orcid.org/0009-0001-0427-9358

Egor S. Mayorov student, research engineer, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, mes.tegatu@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-3925-1458

Andrey A. Filimonov student, laboratory researcher, nuclear and thermal power plants department, Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya St., 51 Kazan, 420066, Russia, vip.jokermigel@m.ru
https://orcid.org/0009-0000-8251-5267

Вклад авторов

Антонина А. Филимонова консультация в ходе исследования
Алена Ю. Власова предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания
Рузина Ф. Камалиева консультация в ходе исследования
Егор С. Майоров обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Андрей А. Филимонов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Antonina A. Filimonova consultation during the study
Alyona Yu. Vlasova proposed a scheme of the experiment and organized production trials
Ruzina F. Kamalieva consultation during the study
Egor S. Mayorov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Andrey A. Filimonov 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 19/08/2025	**После редакции** 26/08/2025	**Принята в печать** 04/09/2025
Received 19/08/2025	**Accepted in revised** 26/08/2025	**Accepted** 04/09/2025

Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-3-255-261 Оригинальная статья/Research article
УДК 678.7:544.6 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Повышение сорбционных свойств полипропиленовых материалов с помощью поверхностно-активных веществ

Иван В. Елохин [1] ivaneloxin@gmail.com 0000-0002-4934-4096

1 Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, 18, г. Санкт-Петербург, 191186, Россия

Аннотация. Работа посвящена повышению сорбционных свойств полипропиленовой пленки путем поверхностной модификации водными растворами поверхностно-активных веществ катионного и амфотерного типа. Объектом исследования являлась биаксиально ориентированная полипропиленовая пленка, обработанная при температуре около 99 °С с последующей промывкой и без нее. Сорбционные характеристики оценивали по изотермам сорбции паров воды, набуханию в органических растворителях различной полярности и показателям бензостойкости. Показано, что исходный полипропилен характеризуется минимальной сорбционной способностью по отношению к воде, при этом характеристическая энергия сорбции составляет 1298 Дж/моль. Обработка поверхностно-активными веществами приводит к формированию более гидрофильной поверхности и резкому увеличению сорбционного потенциала. Для пленки, модифицированной кокамидопропилбетаином, характеристическая энергия сорбции водяного пара возрастает до 8338 Дж/моль. Установлено увеличение степени набухания полимера в ацетоне с 0.13% до 7.05%, а в гексане с 0.57% до 2.53%, что свидетельствует об усилении взаимодействия полимера с полярными и неполярными сорбатами. Определено, что промывка образцов после обработки является определяющим фактором повышения сорбции и улучшения бензостойкости. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения поверхностно-активных веществ для целенаправленного регулирования сорбционных свойств полипропиленовых материалов и расширения областей их практического использования.

Ключевые слова: полипропилен, сорбция, поверхностно-активные вещества, сорбция паров воды, бензостойкость, органические растворители, четвертичные аммониевые соли.

Enhancement of the sorption properties of polypropylene materials using surfactants

Ivan V. Elokhin [1] ivaneloxin@gmail.com 0000-0002-4934-4096

1 Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Bolshaya Morskaya,18, Saint Petersburg, 191186, Russia

Abstract. The study addresses the improvement of sorption properties of polypropylene films through surface modification with aqueous solutions of cationic and amphoteric surfactants. Biaxially oriented polypropylene film was used as the research object and treated at a temperature of about 99 °C with and without a subsequent washing step. Sorption behavior was evaluated by water vapor sorption isotherms, swelling in organic solvents of different polarity, and gasoline resistance tests. The untreated polypropylene exhibited very low affinity for water, with a characteristic sorption energy of 1298 J/mol. Surfactant treatment resulted in significant surface modification accompanied by a marked increase in hydrophilicity and sorption potential. For films treated with cocamidopropyl betaine, the characteristic water vapor sorption energy increased to 8338 J/mol. A substantial rise in swelling degree was observed, from 0.13% to 7.05% in acetone and from 0.57% to 2.53% in hexane, indicating enhanced interactions with both polar and nonpolar sorbates. The washing of treated samples was identified as a key factor governing sorption efficiency and improved gasoline resistance. The results demonstrate that surfactant-assisted surface modification is an effective approach for controlling the sorption properties of polypropylene materials and provides a basis for extending their application in industrial, medical, and environmental fields.

Keywords: polypropylene, sorption, surfactants, water vapor sorption, gasoline resistance, organic solvents.

Введение

Полипропилен (ПП) – один из самых универсальных и часто применяемых полимеров на сегодняшний день. Согласно данным [1] аудиторской компании «Агроан» производство ПП вырастет с 2,138 млн т. (2023 г.) до 2,749 млн т. (2028 г.). ПП не только [2–4] легкий, дешевый, имеет высокую прочность, износостойкость, но и обладает уникальными (специфическими) свойствами, которые необходимы материалам в:

– медицине [5, 6] для производства бахил, хирургических простыней, медицинских масок. Ключевые достоинства для применения является такие особенности полимера, как: гидрофобность, инертность, гипоаллергенность.

– в текстильной промышленности [6, 7] востребованы эластичность, прочность, устойчивость к воздействию окружающей среды, что дает возможность активного применения его в производстве геотекстиля, канатов, ковровых покрытий.

Для цитирования
Елохин И.В. Повышение сорбционных свойств полипропиленовых материалов с помощью поверхностно-активных веществ // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 255–261. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-255-261

For citation
Elokhin I.V. Enhancement of the sorption properties of polypropylene materials using surfactants. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 255–261. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-255-261

© 2025, Елохин И.В. / Elokhin I.V.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

– в нефтехимической промышленности [6, 8], где требуется стойкость к агрессивным средам, термопластичность, устойчивость к коррозии и позволяет использовать ПП для изготовления труб, реакторного оборудования.

– в сельском хозяйстве [6, 9] наличие таких свойств как инертность, устойчивость к коррозии, долговечность позволяют получить упаковки (ПП мешки), резервуары для хранения воды, ПП пленки для мульчирования и т. д.

Однако применение ПП невозможно в обозначенных областях промышленности в полную силу в связи с тем, что он обладает низкой адсорбционной способностью, что могло бы пригодится для улавливания нефтепродуктов при разливе нефти в море и очистке воды на нефтедобывающих платформах, сорбции лекарственных препаратов, крашении текстильных материалов и т. д.

По своим свойствам ПП является неполярным полимером, а значит лучше сорбирует неполярные и малополярные вещества. Недостаток, в ограниченной площади поверхности, объема пор, плохой адгезии заметно ухудшает сорбционные характеристики данного полимерного материала.

Еще одним недостатком ПП является то, что он трудноразлагаемый. Эта проблема оказывает экологическое воздействие на окружающую среду. Разложение ПП занимает от 20 до 500 лет на свалке [10]. Из-за своей стойкости к биоразложению, ПП способствует загрязнению водоемов, морей, океанов и почвы. Это приносит вред флоре и фауне.

К примеру, ПП медленно распадается на микропластик. Площадь поверхности и объем пор составляет 7,04 $м^2/г$ и 0,007 $см^3/г$ соответственно [11].

В своей работе [12] ученые из Китая изучали поведение стареющего микропластика по отношению к загрязняющим веществам в разное время года (лето/зима). Так сообщается об увеличении сорбционной величины нонилфенола на ПП из-за большей удельной поверхности, а также наличия большого количества функциональных кислородосодержащих групп. При этом анализ показал, что ПП, который был летней выдержки, демонстрирует более выраженные изменения характеристик по сравнению с ПП, который был подвешен на крышу для естественного старания зимой. Оценка сорбционной способности нонилфенола показала: ПП летнего старения (477 мкг/г) превосходит ПП зимнего старения (407 мкг/г). При этом показатель для исходного ПП составил 389 мкг/г.

Для увеличения сорбционной способности ПП проводят модификацию его поверхности.

Например, для этой цели вводят в ПП волокно [13] нанодобавки диоксида кремния и галлуазитовые нанотрубки. Модифицированные волокна ПП с галлуайзитом показали более высокую удельную абсорбционную способность по сравнению с парами диоксида кремния.

Ученые Каунасского технологического университета в Литве [14] повышают гидрофильность и адгезионные свойства ИПП пленки с помощью термоокислительной кислотной обработки поверхности в условиях термостатирования. После 20 мин обработки краевой угол смачивания (контакт капли дистиллированной воды с поверхностью) уменьшился с 104 до 77 ° (потеря массы – на 2 $г/м^2$), также наблюдалось увеличение работы адгезии с 16 до 27 $мДж/м^2$. Это доказывает усиление взаимодействия между поверхностью ПП и водой. ИК-спектр показал появление полярных функционных групп на поверхности (–OH, –C=O, –COOH).

Гидрофобные волокна обладают сорбционной способностью по отношению к нефтепродуктам [15]. Производили физическую модификацию ПП воздействием СВЧ. Установлено, что процесс поглощения нефтепродуктов ПП материалами протекает с высокой скоростью. Сорбционное равновесие достигается в течение 5 мин.

Использование в качестве модификатора поверхностно-активных веществ [16] (ПАВ), позволяет гидрофобным материалам повышать сродство к воде. Это потенциально увеличивает эффективность поглощения водорастворимых загрязняющих веществ.

В ходе изучения влияния ПАВ на структуру ПП волокна коллективом нашего ВУЗа [17] было установлено, что ионные ПАВ могут влиять на ориентацию полимерных цепей ПП в аморфных областях.

Таким образом, целью данной работы является изучение влияния обработки ПП пленки водным раствором катионных и амфотерных ПАВ на сорбцию паров воды, полярных и неполярных растворителей полимером.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали биаксиальноориентированную ПП пленку. Ее модификацию осуществляли водными растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ) с разным типом заряда гидрофильной группы: Цетилтриметиламмония бромид КПАВ 1; Додецилтриметиламмония бромид (КПАВ 2); Кокамидопропилбентаин (АмПАВ).

Обработку ПП пленки водными растворами ПАВ осуществляли в течение 60 мин при температуре ±99 °С. Половину образцов промывали водой для удаления остатков соли, а другая часть образцов промывке не подвергалась.

Для построения изотерм сорбции паров воды использовали гравиметрический анализ, который основан на периодическом измерении массы образцов при их выдержке в закрытом эксикаторе с заданной и постоянной относительной влажностью водяного пара (p/p_0) и температуре. Подготовленные образцы предварительно взвешивали и помещали в эксикатор до достижения равновесного влагосодержания.

Поддержание постоянной относительной влажности осуществляли с помощью растворов серной кислоты (60; 45; 30 и 10%). Равновесное влагосодержание (а, мг/г) при данном относительном давлении и температуре рассчитывали по уравнению:

$$a = \frac{m_3 - m_2}{m_2 - m_1}, \qquad (1)$$

где m_1 – масса бюкса; m_2 – масса бюкса с сухим образцом; m_3 – масса бюкса с образцом, выдержанным в эксикаторе с требуемым относительным давлением паров воды.

Взвешивание осуществляли на электронных аналитических весах с погрешностью ±0.0001 г.

Исследование сорбции ПП жидкими сорбатами разной полярности при помощи гравиметрического метода [18, 19]. Образцы погружали в жидкость при атмосферном давлении и комнатной температуре. Равновесную степень набухания полимера определяли в заданные промежутки времени и продолжали до достижения постоянной массы.

Бензостойкость ПП изучали в присутствии бензина марки «Галоша» и выдерживали при температуре 20 °С в течение 1 нед. Степень набухания рассчитывали по уравнению:

$$Q = \frac{m - m_0}{m_0} 100\% \qquad (2)$$

где, Q – степень набухания, в%; m – масса после набухания, г.; m_0 – масса до набухания, г.

Результаты и обсуждения

Равновесные изотермы сорбции паров воды для исходного и модифицированного ПП, представлены на рисунке 1.

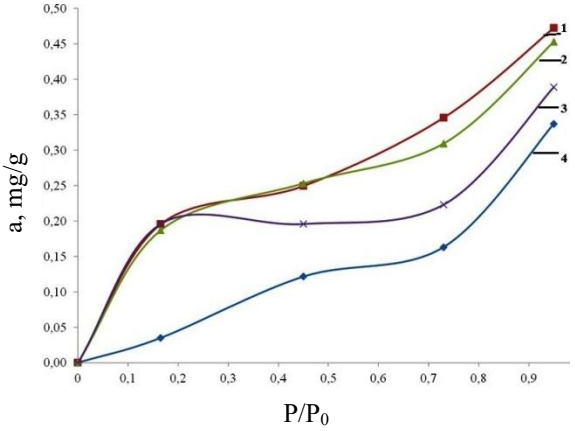


Рисунок 1. Сорбция паров воды немодифицированной (4) и модифицированной ПАВ (1, 2, 3) ПП пленкой: 1 – КПАВ-1, 2 – КПАВ-2, 3 – АмПАВ

Figure 1. Water vapor sorption by unmodified (4) and surfactant-modified (1, 2, 3) polypropylene film: 1 – Cat-1, 2 – Cat-2, 3 – Amph., 4 – untreated sample

На рисунке 1 видно, что все образцы характеризуются S-образная изотерма адсорбции, что свидетельствует о полимолекулярной абсорбции БЭТ. Для образца ПП, который не был подвергнут модификации, такая форма изотермы наблюдается при 0,45 (p/p0). Для модифицированных образцов наблюдается крутой подъем в области малых значений ПП пленки – 0,16 (p/p0). Модификация образцов приводит к более высокому адсорбционному потенциалу.

Для вычисления характеристической энергии сорбции изотермы представляли в линейных координатах (рисунок 2) при T = T0 = 298 К.

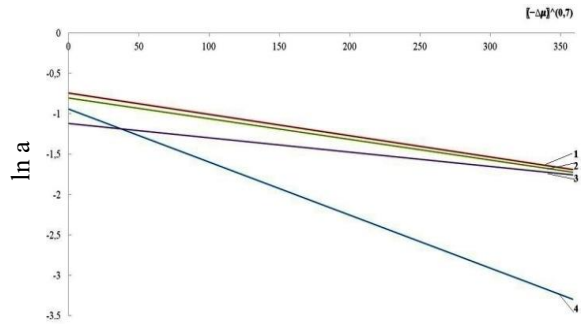


Рисунок 2. Изотермы сорбции паров воды немодифицированной (4) и модифицированной ПАВ (1, 2, 3) пленками ПП в линейных координатах: 1 – КПАВ-1, 2 – КПАВ-2, 3 – АмПАВ

Figure 2. Linear plots of the water vapor sorption isotherms on unmodified (4) and surfactant-modified (1, 2, 3) PP films: 1 – Cat-1, 2 – Cat-2, 3 – Amph., 4 – untreated sample

Рассчитано равновесное влагосодержание по уравнению 3:

$$\ln a = \ln a_0 - \frac{1}{E^n}\left(-RT\ln\frac{p}{p_0}\right)^n \qquad (3)$$

где, a_0 – отрезок, отсекаемой прямой на оси ординат ln a_0, E – характеристическая энергия сорбции, p / p_0 – относительная влажность, 1/n (Г) – гамма-функция, при n = 0,5, Г = 1, $\Delta\mu = RT\ln p/p_0$ – изменение химического потенциала водяного пара при сорбции.

На основе полученных прямых находили a_0 и вычисляли E, для чего использовали уравнение 4.

$$\frac{1}{tg\alpha} = \frac{\triangle\mu}{\triangle ln\, a} \qquad (4)$$

где, tgα – тангенс угла наклона равный $1/E^n$.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Основные характеристики сорбции паров воды
Table 1.
Fundamental characteristics of eater vapor sorption

ПП пленка PP film	a_0, мг/г	1/tgα	E, Дж/моль
КПАВ-1 Cat Surfactant-1	0,432	384,62	4930
КПАВ-2 Cat Surfactant-2	0,449	384,62	4930
АмПАВ AmSurfactant	0,326	555,56	8338
Немодифицированная Unmodified	0,387	151,1	1298

По данным таблицы видно, что для немодифицированной пленки наблюдается самое низкое значение характеристической энергии сорбции – 1298 Дж/моль. Наибольшее значение энергии установлено для ПП-пленки, которая была обработана АмПАВ, энергия сорбции увеличилась в 7 раз.

Изменение характеристической энергии сорбции паров воды в результате обработки ПАВ свидетельствует об изменении поверхности материала, приводящее к усилению его взаимодействия с молекулами сорбата (в данном случае с водой). Поверхность стала более гидрофильной, а материал более гигроскопичным.

Эти данные совпадают и с установленными ранее результатами [20]: изменением надмолекулярной структуры полимера и повышенным значением параметра внутрицепной кооперативности плавления для ПП, который обработан растворами ПАВ.

Изучая изменение сорбционной способности ПП-пленки по отношению к органическим соединениям, использовали гексан и ацетон. Выбор данных растворителей основан на их существенных отличиях друг от друга. Гексан – является неполярным растворителем и растворяет вещества за счет дисперсионных взаимодействий. Ацетон – напротив является полярным апротонным растворителем. Он способен сольватировать как неполярные, так и полярные
молекулы, к примеру катионы за счет наличия неподеленной электронной пары кислорода

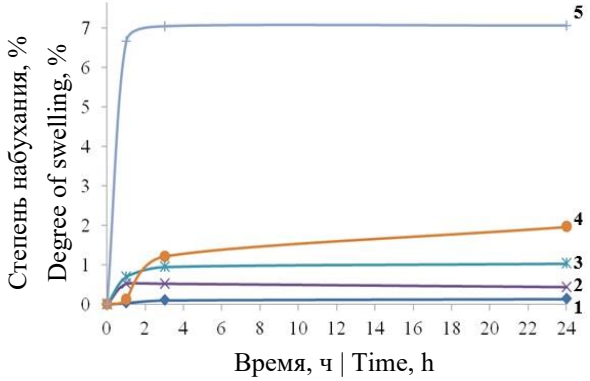


Рисунок 3. Зависимость степени набухания немодифицированного (1) и модифицированного ПАВ (2, 3, 4) ПП (в%) от времени нахождения в среде ацетоне: 2 – КПАВ-2, 3 – КПАВ-2 (промытый), 4 – АмПАВ, 5 – АмПАВ (промытый)

Figure 3. Swelling degree dependence of unmodified (1) and surfactant-modified (2, 3, 4) polypropylene (%) on the exposure time in an acetone environment: 1 – untreated sample, 2-Cat-2, 3 – Cat-2 (washing step), 4 – Amph., 5 – Amph. (washing step)

Исходя из рисунка 3 видно, что абсорбция ацетона ПП достигает сорбционного равновесия в течение 3 ч. При этом исходный образец ПП имеет самое низкое значение степени набухания (0,13%). Образец, который был обработан КПАВ-2 и АмПАВ показал, что степень набухания непромытых и промытых исследуемых образцов отличается.

При обработке ПП-пленки КПАВ-2 с последующей промывкой степень набухания составляет 1,03%, а для образца без промывки – 0,43%. Так и для образца, который был обработан АмПАВ наблюдается такая же тенденция: для промытого – 7,05%, для непромытого – 1,96%. При этом наибольшее значение адсорбции наблюдается для образца, который был подвергнут смыванию ПАВ с поверхности ПП пленки.

В ходе изучения изменений сорбции ПП в гексане была построена следующая зависимость, представленная на рисунке 4:

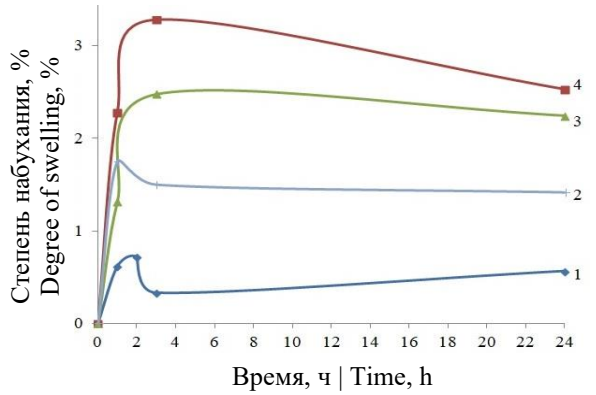


Рисунок 4. Кинетика набухания пленок немодифицированного (1) и модифицированного ПАВ (2, 3, 4) ПП (в%) в среде н-гексана: 1- исходный образец, 2 – АмПАВ (промытый), 3 – КПАВ-1 (промытый), 4 – КПАВ-1

Figure 4. Swelling kinetics (%) of unmodified (1) and surfactant-modified (2, 3, 4) PP films in hexane: 1 – untreated sample, 2 – Amph. (washing step) Cat-1 (washing step), 4 – Cat-1.

Тенденция адсорбции довольно схожа по сравнению с ацетоном, но в присутствии гексана наблюдается снижение набухания по истечению 24 ч. Это может быть связано с тем, что согласно правилу растворимости «подобное растворяется в подобном» – гексан растворяет ПП.

Модификация ПП приводит к повышению сорбционной способности полимера по отношению к неполярному растворителю, в том числе за счет возможного частичного растворения. Для исходного образца степень набухания достигает 0,56% в сут. При обработке КПАВ-1 наблюдается снижение степени набухания с 3,28 до 2,53 для непромытого образца и с 2,47 до 2,24% для промытого образца.

Известно, что изменение равновесной степени набухания предоставляет исчерпывающую количественную информацию о стойкости полимерного материала к воздействию бензола и других неполярных сред.

Определяющими факторами по отношению сорбции к гексану и ацетону являются: смывание соли с поверхности ПП пленки, а также тип ПАВ. Такая же закономерность была обнаружена при изучении бензостойкости.

Данные по степени набухания ПП в бензине представлены в таблице 2.

При контакте полимера с агрессивной средой наблюдается изменение его массы. Для всех исследуемых образцов масса полимера выросла. Бензостойким материал считается, если его изменение массы не более 10%.

Из данных таблицы 2 видно, что модификация ПП пленки с последующей промывкой приводит к снижению степени набухания по сравнению с исходным образцом. Таким образом, происходит улучшение стойкости материала к бензину.

Таблица 2.

Результаты бензостойкости обработанной ПП пленки

Table 2.

Results of the Benzene resistance tests for the treated PP film

Обработка Treat	Промывка Water	Qcp, %
Исходный | Original	-	3,122
КПАВ-1	-	5,436
КПАВ-1	+	1,964
КПАВ-2	-	17,026
КПАВ-2	+	2,596
АмПАВ	-	2,402
АмПАВ	+	1,150

Использование КПАВ-2 без смывания соли с поверхности пленки приводит к снижению бензостойкости на 14%.

Заключение

В ходе изучения влияния обработки поверхностно-активными веществами ПП пленки установлено:

1. Модификация ПП пленки с помощью тепловой обработки водными растворами ПАВ приводит к повышению сорбционной способности полимера по отношению к водяному пару. При этом наблюдается полимолекулярная адсорбция БЭТ, а основные характеристики этой адсорбции увеличиваются в 4 раза для катионного и в 7 раз для амфотерного типа ПАВ.

2. Обработка ПП АмПАВ и КПАВ-1 позволяется повысить сорбцию органических растворителей полиолефинов с 0,13% до 7,05% (ацетон) и с 0,57% до 2,53% (гексан).

3. Экспериментальным путем доказано, что обработка ПАВ с последующей промывкой улучшает бензостойкость полимера.

Данное исследование позволит расширить применение ПП в медицине, в текстильной и нефтеперерабатывающей промышленности.

Благодарности

Выражаю искреннюю благодарность научному руководителю доктору технических наук Михайловской Анне Павловне за ценные рекомендации, консультации и советы в ходе выполнения экспериментальной и расчетной части работы.

Литература

1 Обзор российского рынка полипропилена. Октябрь 2024. Прогноз развития до 2028 года. М.: Агентство Агроан, 2024. 75 с. URL: https://agroan.ru/wp-content/uploads/2025/01/2024.pdf (дата обращения: 30.08.2025).

2 Гарифуллина А.Р., Гарипов Р.Р., Репина Е.М. и др. Полипропилен. Его свойства и сфера применения // Аллея науки. 2020. № 12 (51). С. 145–148.

3 Кубылькина С.Ю., Беликова А.А., Чернова Е.С. и др. Применение полипропилена в современном производстве // Проблемы и перспективы развития экспериментальной науки: сборник статей по материалам III Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 48–50.

4 Малькова А.Е., Михайличенко Е.С. Виды полипропилена и их эксплуатационные свойства // Вестник науки. 2022. Т. 5. № 2 (47). С. 210–213.

5 Струсовская Н.Л., Матушкина Н.Н. Особенности сорбции и массопереноса гидрофильных веществ через гидрофобный изотактический полипропилен // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22. № 5. С. 748–759. doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10717

6 Hossain M.T., Shahid M.A., Mahmud N. et al. Research and application of polypropylene: a review // Discover Nano. 2024. V. 19. P. 2. doi: 10.1186/s11671-023-03952-z

7 Mather R.R., Wardman R.H. The chemistry of textile fibres. 3rd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2023. 512 p. doi: 10.1039/9781782626534

8 Alsabri A., Tahir F., Al-Ghamdi S.G. Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region // Materials Today: Proceedings. 2022. V. 56. P. 2245–2251. doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.574

9 Ragoobur D., Huerta-Lwanga E., Somaroo G.D. Microplastics in agricultural soils, wastewater effluents and sewage sludge in Mauritius // Science of the Total Environment. 2021. V. 798. P. 149326. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149326

10 GreenMatch. Is Polypropylene Bad For The Environment? Statistics, Trends, Facts & Quotes. 2025. URL: https://www.greenmatch.co.uk/polypropylene-environmental-impact (дата обращения: 01.08.2025).

11 Ho Truong Nam Hai, Pham Thi Phuong Le, Nguyen Thao Nguyen et al. Potential Impacts of polypropylene Microplastics on the Adsorption Process of Cr(VI) by Biochar // International Journal of Environmental Science and Development. 2024. V. 15. № 5. P. 268–276. doi: 10.18178/ijesd.2024.15.5.1495

12 He S., Sun S., Xue H. et al. Polypropylene microplastics aging under natural conditions in winter and summer and its effects on the sorption and desorption of nonylphenol // Environmental Research. 2023. V. 225. P. 115615. doi: 10.1016/j.envres.2023.115615

13 Petková M., Ujhelyiová A., Ryba J. et al. Sorption Capabilities of Polypropylene/Modified Polypropylene Fibers // Fibers. 2023. V. 11. № 12. P. 102. doi: 10.3390/fib11120102

14 Alaburdaitė R., Krylova V. Polypropylene film surface modification for improving its hydrophilicity for innovative applications // Polymer Degradation and Stability. 2023. V. 211. P. 110334. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110334

15 Лысак И.А., Лысак Г.В. Гидрофобные сорбенты на основе ультратонких полимерных волокон для улавливания нефтепродуктов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 12. С. 143–151. doi: 10.18799/24131830/2023/12/4311

16 Xia Y., Zhou J.J., Gong Y.Y. et al. Strong influence of surfactants on virgin hydrophobic microplastics adsorbing ionic organic pollutants // Environmental Pollution. 2020. V. 265. P. 115061. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115061

17 Acik G. Fabrication of polypropylene fibers possessing quaternized ammonium salt based on the combination of CuAAC click chemistry and electrospinning // Reactive and Functional Polymers. 2021. V. 168. P. 105035.

18 Агеев Е.П., Струсовская Н.Л., Матушкина Н.Н. Эффект самоочищения пленок изотактического полипропилена от неизвестных импрегнированных примесей // Коллоидный журнал. 2019. Т. 82. № 2. С. 139–145. doi: 10.1134/S0023291219020022

19 Самуйлова Е.О., Маркова Е.В., Успенская М.В. Изучение влияния бензина на механические характеристики древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 50 (74). С. 58–61.

20 Елохин И.В., Михайловская А.П., Ситникова В.Е. Влияние поверхностно-активных веществ на структуру полипропилена // Дизайн. Материалы. Технология. 2024. № 1 (73). С. 133–137. doi: 10.46418/1990-8997_2024_1(73)_133_137

References

1 Review of the Russian polypropylene market. October 2024. Development Forecast until 2028 // Agroan Agency. URL: https://agroan.ru/wp-content/uploads/2025/01/2024.pdf (accessed 30.08.2025).

2 Carifulluna A.R., Garipov R.R., Repina E.M., Bamburkina V.A. Polypropylene. It is properties and scope of application // Alley of science. 2020. no. 12. pp.145–148. (in Russian).

3 Kubylkina S. Yu., Belikova A.A., Chernova E.S., Tarasova I.M. Application of Polypropylene in modern production // Problems and prospects of experimental science development. 2019. pp.48–50. (in Russian).

4 Malkova A.E., Mikhailichenko E.S. Types of Polypropylene and their performance properties // Science Herald. 2022. no. 5. pp. 210–213. (in Russian).

5 Strusovskaya N.L., Matushkina N.N. Features of sorption and mass transfer of hydrophilic substances through hydrophobic Isotactic Polypropylene. Sorption and Chromatographic Processes. 2022. vol. 22. no. 5. pp. 748–759. doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10717 (in Russian)

6 Hossain M.T., Shahid M.A., Mahmud N., Habib A., Rana M.M. et al. Research and application of polypropylene: a review. Discover Nano. 2024. vol. 19. no. 1. p. 2. doi: 10.1186/s11671-023-03952-z

7 Mather R.R., Wardman R.H. The chemistry of textile fibres. 3rd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2023. 512 p. doi: 10.1039/9781782626534

8 Alsabri A., Tahir F., Al-Ghamdi S.G. Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. Materials Today: Proceedings. 2022. vol. 56. pp. 2245–2251. doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.574

9 Ragoobur D., Huerta-Lwanga E., Somaroo G.D. Microplastics in agricultural soils, wastewater effluents and sewage sludge in Mauritius. Science of the Total Environment. 2021. vol. 798. p. 149326. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149326

10 Is Polypropylene Bad For The Environment? Statistics, Trends, Facts & Quotes // GreenMatch. URL: https://www.greenmatch.co.uk/polypropylene-environmental-impact (accessed: 01.08.2025).

11 Ho Truong Nam Hai, Pham Thi Phuong Le, Nguyen Thao Nguyen et al. Potential Impacts of polypropylene Microplastics on the Adsorption Process of Cr(VI) by Biochar. International Journal of Environmental Science and Development. 2024. vol. 15. no. 5. pp. 268–276. doi: 10.18178/ijesd.2024.15.5.1495

12 He S., Sun S., Xue H. et al. Polypropylene microplastics aging under natural conditions in winter and summer and its effects on the sorption and desorption of nonylphenol. Environmental Research. 2023. vol. 225. p. 115615. doi: 10.1016/j.envres.2023.115615

13 Petková M., Ujhelyiová A., Ryba J. et al. Sorption Capabilities of Polypropylene/Modified Polypropylene Fibers. Fibers. 2023. vol. 11. no. 12. p. 102. doi: 10.3390/fib11120102

14 Alaburdaitė R., Krylova V. Polypropylene film surface modification for improving its hydrophilicity for innovative applications. Polymer Degradation and Stability. 2023. vol. 211. p. 110334. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110334

15 Lysak I.A., Lysak G.V. Hydrophobic sorbents based on ultrathin polymer fibers for capturing petroleum products. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023. vol. 334. no. 12. pp. 143–151. doi: 10.18799/24131830/2023/12/4311 (in Russian)

16 Xia Y., Zhou J.J., Gong Y.Y. et al. Strong influence of surfactants on virgin hydrophobic microplastics adsorbing ionic organic pollutants. Environmental Pollution. 2020. vol. 265. p. 115061. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115061

17 Acik G. Fabrication of polypropylene fibers possessing quaternized ammonium salt based on the combination of CuAAC click chemistry and electrospinning. Reactive and Functional Polymers. 2021. vol. 168. p. 105035. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2021.105035

18 Ageev E.P., Strusovskaya N.L., Matushkina N.N. The effect of self-cleaning of isotactic polypropylene films from unknown impregnated impurities. Colloid Journal. 2019. vol. 82. no. 2. pp. 139–145. doi: 10.1134/S0023291219020022 (in Russian)

19 Samuylova E.O., Markova E.V., Uspenskaya M.V. Study of the effect of gasoline on the mechanical characteristics of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride. Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University). 2019. no. 50 (74). pp. 58–61. (in Russian)

20 Elokhin I.V., Mikhailovskaya A.P., Sitnikova V.E. Effect of surfactants on the structure of polypropylene. Design. Materials. Technology. 2024. no. 1 (73). pp. 133–137. doi: 10.46418/1990-8997_2024_1(73)_133_137 (in Russian)

Сведения об авторах

Иван В. Елохин аспирант, ассистент, кафедра химических технологий им. проф. А. А. Хархарова, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, 18, г. Санкт-Петербург, 191186, Россия, ivaneloxin@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4934-4096

Information about authors

Ivan V. Elokhin graduate student, assistant, chemical engineering named after professor a. a. kharkharov department, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Bolshaya Morskaya,18 Saint Petersburg, 191186, Russia, ivaneloxin@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4934-4096

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 01/08/2025	**После редакции** 18/08/2025	**Принята в печать** 09/09/2025
Received 01/08/2025	**Accepted in revised** 18/08/2025	**Accepted** 09/09/2025