

ISSN 2226-910X
E-ISSN 2310-1202

**ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Вестник ВТУИТ

Proceedings of VSEI

**PROCEEDINGS OF THE VORONEZH STATE UNIVERSITY
OF ENGINEERING TECHNOLOGIES**

2025

№

4

16+

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»



**ВЕСТНИК
ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ВЕСТНИК ВГУИТ

2025, Том. 87, № 4

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. 4

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 ВИНТИ 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 Succinto 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'Аквила (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 плодородства, 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 кафедрой 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 «Луциан Блага» (Сибу, 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 университете, (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 КСЕНОФОНОВИЧ 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 государственный 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 САВВОИЧ 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'Аквила (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 10.12.2025. Подписано в печать 22.12.2025

Выход в свет: 30.12.2025

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 Succuro 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 Ph.D., 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. Gorbатов. (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

OSPA NOV, 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 Ph.D., 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 III № ФC77-56830 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 10.12.2025. Signed to print 22.12.2025

The publication: 30.12.2025

Conditional Print l. 42,41 Circulation 1500 copies.

Price - Free.

© FSBEI HE

"Voronezh State University
of Engineering
Technologies", 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Махмуд М.С., Родионов Ю.В., Никитин Д.В., Сухова А.О. Одноступенчатый водокольцевой вакуумный насос с регулируемой степенью внутреннего сжатия для эффективной дегазации и дезодорации растительных масел	13
Хатко З.Н., Магомедов Г.О., Магомедов М.Г., Алиев Д.М., Кудайнетова С.К., Колодина Е.М. Разработка пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба	20
Доня Д.В. Прогнозирование развития технологических процессов ведущего оборудования линии производства хлеба из пшеничной муки	29
Фиалков Д.М., Авдеева Н.В., Пойманов В.В., Полянский К.К., Дерканосова А.А. Разработка белкового продукта для спортивного питания	36
Белозерцев А.С., Лавров С.В. Моделирование процесса вакуумсублимационной сушки высокопористого материала в сверхвысокочастотном поле	43
Ковалева Т.С., Романюк Т.И., Антипова Л.В., Яковлева С.Ф., Коротких Е.А. Разработка рецептов коллагенсодержащих напитков на основе растительного сырья для функционального питания	55
Мишинев К.В., Остриков А.Н., Копылов М.В., Богомолов И.С. Обоснование применения хитина и хитозана для псевдокапсулирования рыбных комбикормов	63
Коновалов С.А., Рыбченко Т.В., Дерканосова А.А., Полянский К.К. Повышение экономической эффективности использования растительных компонентов при производстве молочных продуктов в современных условиях производства	70
Лавров С.В., Белозерцев А.С. Формование хлебопекарных дрожжей: исследование реологических характеристик и кинетика процесса	80
Бикбулатов П.С., Панкратьева Н.А., Чугунова О.В., Донскова Л.А. Эффективность комбинированного ферментативного гидролиза для получения высокобелкового гидролизата из гороха	86
Мухаммад Али, Антипова Л.В., Куцова А.Е. Опыт получения хондроитин сульфата из побочных продуктов переработки пресноводных рыб	93
Ассумани Идди, Антипова Л.В., Куцова А.Е. Ресурсы современных рыбохозяйственных комплексов: разнообразности и объёмы производства	101
Кулигин Д.Р., Саввина Е.А., Васечкин В.М., Чесников Л.С., Желтоухова Е.Ю. Использование искусственного интеллекта в бережливом производстве для пивоваренной отрасли	112
Чернов М.М., Баланов П.Е., Смотраева И.В. Использование комбинированной закваски из микроорганизмов <i>Aspergillus oryzae</i> и <i>Saccharomyces cerevisiae</i> для получения соевого соуса методом естественного брожения	118
Манжесов В.И., Айрапетян А.А., Чурикова С.Ю., Ковалева Т.С. Разработка и обоснование рецептуры вареной колбасы функциональной направленности с комплексом растительных ингредиентов	125
Жаркова И.М., Иванчиков Д.С. Исследование накопления органических кислот в хлебопекарных пшеничных заквасках типа I и в опарах длительного брожения	131
Толкачева А.А., Пряхина Н.А., Зверева О.В., Богданова Е.В., Кузнецова Ю.П., Сыромятников М.Ю., Корнеева О.С. Исследование влияния свободных и инкапсулированных клеток пробиотического штамма <i>Weizmannia coagulans</i> на свойства пробиотического кисломолочного продукта и оценка их выживаемости в имитированных условиях ЖКТ	139
Чернопольская Н.Л., Коновалов С.А., Полянский К.К., Скрябина О.В., Подольникова Ю.А., Рябова Д.С. Определение биологически активных веществ в зерне пшеницы и чечевицы	149
Могунова М.Н., Деркачева Н.П., Новикова Л.А., Недомолкина С.В., Егорова Г.Н., Клейменова Н.Л. Питание и гены: молекулярные механизмы адаптации обмена веществ к физической активности	159
Лукьяненко М.В., Донченко Л.В., Васильев А.А., Соболев И.В., Варивода А.А., Устюгова Е.Ю. Тенденции в разработке пищевых добавок и биологически активных добавок к пище	165
Никель С.А., Лавров С.В., Белозерцев А.С. Математическая модель тепло- и массопереноса при вакуумной сушке арахиса с комбинированным теплоподводом	173
Григорян А.Э., Фоменко И.А., Детинкин И.А., Кусова И.У., Мешенцева Н.Г. Получение гидролизатов соевого белка с высокой антиоксидантной активностью	181
Золотовская О.В., Коннова О.И., Мемедейкина Н.П., Свирина С.А., Максименко Ю.А. Конструкторские и технологические решения для производства антоциансодержащего экстракта черного риса	193

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Наместников Н.С., Сысоева А.Г., Полянский К.К. Методологический подход в исследованиях структурных, электрохимических и транспортных характеристик электробаромембранной очистки промышленных растворов	200
Тихомиров С.Г., Карманова О.В., Фирсова А.В., Битюков В.К., Хаустов И.А. Математическое моделирование процесса получения функционализированных статистических бутадиен-стирольных сополимеров	212
Карманова О.В., Шутилин Ю.Ф., Голякевич А.А., Меренкова Е.А. Вулканизирующие системы в рецептуре резин, эксплуатируемых при пониженных температурах	219
Иванов З.А., Федорова В.И., Васюк А.Е., Есякова О.А. Анализ качества проб воды скважины СНТ «Здоровье»	226

CONTENTS

FOOD SYSTEMS

Mohammed Ali S.M., Rodionov Y.V., Nikitin D.V., Sukhova A.O. Single-stage water ring vacuum pump with an adjustable degree of internal compression for efficient degassing and deodorization of vegetable oils	13
Khatko Z.N., Magomedov G.O., Magomedov M.G., Aliyev D.M., Kudaynetova S.K., Kolodina E.M. Development of pectin-containing yeast-free (churned) bread	20
Donya D.V. Forecasting the development of technological processes for the leading equipment of a wheat flour bread production line	29
Fialkov D.M., Avdeeva N.V., Poymanov V.V., Polyansky K.K., Derkanosova A.A. Development of a protein product for sports nutrition	36
Belozertsev A.S., Lavrov S.V. Modeling of the vacuum-sublimation drying process of a highly porous material in a microwave field	43
Kovaleva T.S., Romanyuk T.I., Antipova L.V., Yakovleva S.F., Korotkikh E.A. Development of formulas for collagen-containing drinks based on plant-based raw materials for functional nutrition	55
Mishinev K.V., Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Bogomolov I.S. Rationale for the use of chitin and chitosan for pseudo-encapsulation of fish feed	63
Konovalov S.A., Rybchenko T.V., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. Increasing the economic efficiency of using plant components in the production of dairy products in modern production conditions	70
Lavrov S.V., Belozertsev A.S. Molding of baker's yeast: study of rheological characteristics and process kinetics	80
Bikbulatov P.S., Pankratieva N.A., Chugunova O.V., Donskova L.A. Efficiency of combined enzymatic hydrolysis for producing high-protein hydrolysate from pea	86
Muhammad Ali, Antipova L.V., Kutsova A.E. Experience in obtaining chondroitin sulfate from by-products of freshwater fish processing	93
Assumani Iddy, Antipova L.V., Kutsova A.E. Ressources of modern fisheries: types and production volumes	101
Kuligin D.R., Savvina E.A., Vasechkin V.M., Chesnikov L.S., Zheltoukhova E.Y. The use of artificial intelligence in lean manufacturing for the brewing industry	112
Chernov M.M., Balanov P.E., Smotraeva I.V. Using a combined starter of <i>Aspergillus oryzae</i> and <i>Saccharomyces cerevisiae</i> microorganisms to produce soy sauce by natural fermentation	118
Manzhesov V.I., Airapetyan A.A., Churikova S.Yu., Kovaleva T.S. Development and substantiation of a recipe for functional cooked sausage with a complex of plant ingredients	125
Zharkova I.M., Ivanchikov D.S. Study of organic acid accumulation in type 1 wheat sourdoughs and long-fermentation type 0 sourdoughs	131
Tolkacheva A.A., Pryakhina N.A., Zvereva O.V., Bogdanova E.V., Kuznetsova Yu.P., Syromyatnikov M.Yu., Korneeva O.S. A study of the effect of free and encapsulated cells of the probiotic strain <i>Weizmannia</i> coagulans on the properties of a probiotic fermented milk product and an assessment of their survival under simulated gastrointestinal conditions	139
Chernopolskaya N.L., Konovalov S.A., Polyansky K.K., Skryabina O.V., Podolnikova Yu.A., Ryabkova D.S. Review of methods for determining biologically active compounds in agricultural raw materials	149
Mogunova M.N., Derkacheva N.P., Novikova L.A., Nedomolkina S.V., Egorova G.N., Kleimenova N.L. Nutrition and genes: molecular mechanisms of metabolic adaptation to physical activity	159
Lukyanenko M.V., Donchenko L.V., Vasilyev A.A., Sobol I.V., Varivoda A.A., Ustyugova E.Yu. Trends in the development of dietary supplements and biologically active food additives	165
Nikel S.A., Lavrov S.V., Belozertsev A.S. Mathematical model of heat and mass transfer during the vacuum drying of peanuts with combined heat supply	173
Grigoryan A.E., Fomenko I.A., Detinkin I.A., Kusova I.U., Meshentseva N.G. Production of soy protein hydrolysates with high antioxidant activity	181
Zolotovskaya O.V., Konnova O.I., Memedeikina N.P., Svirina S.A., Maksimenko Y.A. Construction solutions and technological solutions for the production of anthocyanin-containing extract of black rice	193

CHEMICAL TECHNOLOGY

Konovalov D.N., Lazarev S.I., Namestnikov N.S., Sysoeva A.G., Polyansky K.K. Methodological approach to the study of structural, electrochemical and transport characteristics of electrobaromembrane purification of industrial solutions	200
Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Firsova A.V., Bityukov V.K., Khaustov I.A. Mathematical modeling of obtaining functionalized statistical butadiene-styrene copolymers	212
Karmanova O.V., Shutilin Yu.F., Golyakevich A.A., Merenkova E.A. Curing systems for rubbers used at low temperatures	219
Ivanov Z.A., Fedorova V.I., Vasyuk A.E., Esyakova O.A. Quality analysis of water samples from the "Zdorovye" well	226

Пищевые системы

Food systems

DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2025-4-13-19>

Оригинальная статья/Research article

УДК 621.521

Open Access

Available online at vestnik-vsuet.ru

Одноступенчатый водокольцевой вакуумный насос с регулируемой степенью внутреннего сжатия для эффективной дегазации и дезодорации растительных масел

М.А.С. Махмуд	^{1,2}	mr.mohammedali1993@gmail.com	 0000-0002-2771-843X
Юрий В. Родионов	^{1,3}	rodionow.u.w@rambler.ru	 0000-0001-9601-9555
Дмитрий В. Никитин	¹	vacuum2008@yandex.ru	 0000-0001-5885-2300
Анна О. Сухова	¹	apill@yandex.ru	 0000-0002-7686-9314

¹ Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия² Аль-Фурат Аль-Аусат технический университет, Технический колледж Аль-мусаиб, Бабиль, Ирак³ Мичуринский государственный аграрный университет, ул. Интернациональная, 101, г. Мичуринск, 393760, Россия

Аннотация. Использование вакуума необходимо для таких процессов, как дегазация и дезодорация при переработке растительных масел. Водокольцевые вакуумные насосы (ВВН) используются для этих целей благодаря их способности работать с влажными газами. Эффективность процесса дегазации и дезодорации различных жидкостей и растительных масел зависит от режимов тепло- и массообмена в рабочем объеме вакуумного насоса, равномерности давления откачки и степени внутреннего сжатия газовой смеси. Указанные недостатки конструкции и режима работы приводят к снижению быстродействия ВВН и повышению энергозатрат в процессе удаления влаги и растворенных газов из масел. Подробный анализ этих вопросов ограничен, что сдерживает разработку таких машин, особенно в изменяющихся условиях эксплуатации. Целью данного исследования является представление новой конструкции ВВН с регулируемым нагнетательным окном для повышения общей производительности вакуумной технологии переработки масел. Исследование основано на основных принципах термодинамики, механики жидкости и газа, конструктивных характеристиках ВВН и условиях процесса вакуумирования. Созданы математические модели, иллюстрирующие взаимодействие теплофизических свойств рабочей жидкости и всасываемого газа, таких как давление, температура, расход, быстрота действия и мощность сжатия. Результаты исследования показали, что новый режим работы снижает расход энергии на сжатие на 10–15% и мощность на валу на 25%, при этом быстрота действия увеличивается на 10% по сравнению с обычной конструкцией насоса в оптимальных условиях. Разработана технологическая схема водокольцевой вакуумной насосной установки с необходимым оборудованием для эффективной переработки растительных масел. Использование вакуумного насоса с регулируемым вакуумом является эффективным методом в технологических процессах рафинации и дезодорирования растительных масел, приводящим к снижению энергозатрат, сохранению биологически активных веществ и являющимся экологически безопасным вариантом. Уровень вакуума, температура рабочей жидкости и всасываемого газа, поступающего в насос, а также конструктивные параметры имеют решающее значение в процессах удаления растворенных газов, летучих соединений, свободных жирных кислот и одорирующих веществ при производстве растительных масел. Экспериментальная проверка предложенной конструкции насоса рекомендуется в качестве дальнейшего исследования с возможным применением в различных промышленных продуктах.

Ключевые слова: одноступенчатый, водокольцевой вакуумный насос, регулируемое внутреннее сжатие, дегазация, дезодорация, растительные масла.

Single-stage water ring vacuum pump with an adjustable degree of internal compression for efficient degassing and deodorization of vegetable oils

M.A.S. Mahmood	^{1,2}	mr.mohammedali1993@gmail.com	 0000-0002-2771-843X
Yuri V. Rodionov	^{1,3}	rodionow.u.w@rambler.ru	 0000-0001-9601-9555
Dmitry V. Nikitin	¹	vacuum2008@yandex.ru	 0000-0001-5885-2300
Anna O. Sukhova	¹	apill@yandex.ru	 0000-0002-7686-9314

¹ Tambov State Technical University, Sovetskaya Street, 106, Tambov, 392000, Russia² Al-Furat Al-Awsat Technical University, Al-Mussaib Technical College, Babil, Iraq³ Michurinsk State Agrarian University, Internatsionalnaya Street, 101, Michurinsk, 393760, Russia

Для цитирования

Махмуд М.С., Родионов Ю.В., Никитин Д.В., Сухова А.О. Одноступенчатый водокольцевой вакуумный насос с регулируемой степенью внутреннего сжатия для эффективной дегазации и дезодорации растительных масел // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 13–19. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-13-19

For citation

Mohammed Ali S.M., Rodionov Y.V., Nikitin D.V., Sukhova A.O. Single-stage water ring vacuum pump with an adjustable degree of internal compression for efficient degassing and deodorization of vegetable oils. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 13–19. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-13-19

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

Abstract. The use of a vacuum is essential for processes like degassing and deodorization in the processing of vegetable oils. Water ring vacuum pumps (WRVP) are used for these purposes due to their ability to handle wet gases. The efficiency of the degassing and deodorization process for various liquids and vegetable oils is influenced by the modes of heat and mass transfer within the working volume of the vacuum pump, the uniformity of evacuation pressure, and the degree of internal compressing of the gas-water mixture. These demerits in design and regime of operation result in reduced speed of action of the WRVP and increased energy consumption during the moisture and dissolved gaseous removal process from oils. Detailed analysis of these issues is limited, which restricts the development of these machines, particularly under varying operating conditions. This research aims to present a new design of a WRVP with regulation of the discharge port to improve the overall performance of the vacuum technology for processing oils. The study was based on key principles of thermodynamics, fluid mechanics, WRVP design characteristics, and evacuation process conditions. Mathematical models were created to illustrate the interaction among the thermophysical properties of working fluid and suction gas, such as pressure, temperature, flow rate, speed of action, and power of compression. The investigation's results showed that the new operation regime reduces compression power consumption by 10-15% and shaft power by 25%, while increasing the speed of action by 10% compared to the pump's conventional design under optimal conditions. A technological scheme of a water ring vacuum pump plant with the necessary equipment was developed for the efficient processing of vegetable oils. The use of a vacuum pump with controlled vacuum is an effective method in the technological processes of refining and deodorizing vegetable oils, leading to reduced energy costs, preserving biologically active substances, and providing an environmentally friendly option. The vacuum level, working fluid, and suction gas temperatures entering the pump, along with constructive parameters, are essential in the processes of removing dissolved gases, volatile compounds, free fatty acids, and odor-causing substances during the production of vegetable oils. Experimental validation of the proposed pump design is recommended as a future study, with potential applications to various industrial products.

Keywords: single-stage, water ring vacuum pump, adjustable internal compression, degassing, deodorization, vegetable oils.

Introduction

Degassing and deodorizing are important steps in processing vegetable oils. These processes help to ensure the oils stay stable, have a long shelf life, and keep their flavor and aroma. Water ring vacuum pumps (WRVP) are commonly used in installations that require a specific vacuum level. These types of vacuum pumps are widely used in various industries to create vacuum conditions for multiple purposes. WRVP provides several functions, such as compression, creating a vacuum, and pumping working fluids. These pumps are used for several processes such as drying, evaporation, and extraction in chemical and agricultural industrial complexes [1]. The key advantages of these machines are high reliability, durability, environmental friendliness, low cost, and compliance with environmental standards [2]. These machines are available in two categories: single-stage and two-stage. Single-stage is widely used for most technological processes [3].

Application of a WRVP for agrotechnological processes, such as drying of raw materials, evaporation of liquids, degassing and processing of various food products, plays a vital role in developing the quality of products [4–7].

When using water ring vacuum pumps in the degassing and deodorize processes of vegetable oils, several problems arise. The classical WRVP is characterized by a constant degree of compression of the gas-liquid mixture. Unregulated compression leads to inefficiencies, increased energy consumption, and increased heat generation. The excessive heat and pressure reduce the WRVP life cycle and suboptimal oil quality.

Hence, the primary challenges include maintaining precise control over vacuum pressure, temperatures, and the level of compression within the pump to ensure effective operation and the production of high-quality processing oils.

Justify the application of a water ring vacuum pump with an adjustable degree of internal compression of the gas-vapor mixture for improving the energy efficiency and quality of vegetable oils.

Methods and materials

The well-known scientists are engaged in the technological processes and the associated equipment of producing vegetable oils: Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Korea E.P., and Vasilenko V.N. [8]. To investigate the mechanism of gas and liquid phase compression in the working chamber of the WRVP, the foundational works of Rodionov Yu.V. and Nikitin D.V. were used [9, 10]. The work was achieved at the FSBEI HE “Tambov State Technical University” department of “Mechanics and Engineering Graphics” in the laboratory of the research and education center of TSTU-MichGAU “Ecotechnologies”. The quality analysis of vegetable oils was carried out using the equipment of the Collective Use Center “Breeding of agricultural crops and technologies of production, storage and processing of products for functional and therapeutic purposes”.

Results and discussion

Regulation of the evacuation process, the power of compression, and reduction of action speed losses, and energy costs a key challenges in utilizing the WRVP for refining and deodorizing vegetable oils. A prototype of a new vacuum pump with a regulation of the discharge port (WRVP RDP), (Figure 1) was designed and fabricated, and tested to address the mentioned problems. The key design features include: regulation of the degree of internal compression; elimination of the “harmful space” in the dead zone of the working chamber; reducing the influence of heat generation due to compression; and stable operation under conditions of vegetable oil degassing and deodorization.

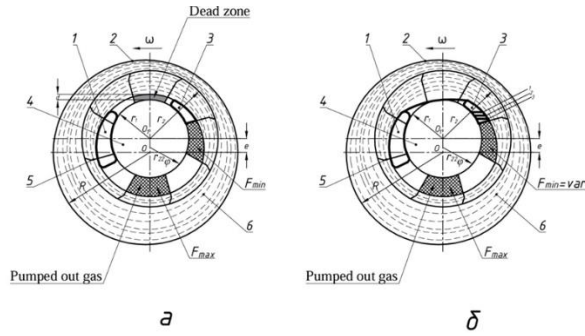


Figure 1. Design characteristics of the working cavity of a WRVP: a) traditional design; б) with automatic adjustable of the discharge port: 1 – suction port; 2 – fixed housing; 3 – discharge port; 4 – impeller; 5 – blades; 6 – working fluid

The proposed design features a vacuum pump equipped with a controlled discharge window (Figure 1b), which facilitates precise regulation of the evacuation processes and degree of compression necessary for the vegetable oil processing [11]. In this design, dynamic regulation of the discharge port size is implemented using an automatically adjustable damper. The position of the discharge port, labeled as 1, 2, and 3, varies depending on the required operational regime of the degassing and deodorization processes. The new design eliminates the loss of action speed caused by the transfer of gas phase from the discharge side to the suction side through the “dead zone”. Control devices and sensors were applied to adjust the regime of operation of WRVP in the processing of vegetable oils. The new vacuum pump maintains the vacuum pressure so that the liquid boils at a temperature below the critical value of the biologically active substances (BAS) of the vegetable oils.

The power (work) supplied to the pump to move the vapor-gas phase (mixture) and remove it from the vacuum pump during the thermodynamic process of polytropic compression is expressed as follows [9, 10]:

$$A = N_{\text{comp}} = \int_{P_s}^{P_d} V_s dp = \left(\frac{P_s}{P_d} \right)^{\frac{1}{n_{\text{ave}}}} \cdot V_d dp = \frac{n_{\text{ave}}}{n_{\text{ave}} - 1} P_s V_s \left[\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{n_{\text{ave}} - 1}{n_{\text{ave}}}} - 1 \right] \quad (1)$$

where, P_s is the suction pressure, kPa; P_d is the discharge pressure, kPa; n_{ave} is the polytropy index; V_s is the volume of the suction cavity, m^3 ; V_d is the volume of the discharge cavity, m^3 .

The polytrophe index n_{ave} is taken within the limits, $n_{\text{ave}} = 1.02 \div 1.05$, and calculated using the formula [9]:

$$n_{\text{ave}} = \frac{\log \left(\frac{P_d}{P_s} \right)}{\log \left(\frac{P_d}{P_s} \right) - \log \left(\frac{T_s}{T_{\text{mix}}} \right)} \quad (2)$$

where, T_{mix} is the temperature of the liquid-gas mixture at the outlet, K.

Power consumed during compression [4, 9]:

$$N_{\text{comp}} = P_s \cdot S \cdot \frac{n_{\text{ave}} - 1}{n_{\text{ave}}} \cdot \left[(\tau)^{\frac{n_{\text{ave}} - 1}{n_{\text{ave}}}} - 1 \right], \text{ at } P_d < P_{\text{comp}} \quad (3)$$

$$N_{\text{comp}} = P_s \cdot S \cdot \frac{n_{\text{ave}} - 1}{n_{\text{ave}}} \cdot \left[(\tau')^{\frac{n_{\text{ave}} - 1}{n_{\text{ave}}}} - 1 \right] \cdot \alpha', \text{ at } P_d > P_{\text{comp}}$$

where, S is the speed of action of WRVP, m^3/s ; α' is the coefficient that takes into account the reverse flow of the gas phase during compression in the working cell; τ is the degree of compression in the working volume of the WRVP [4]:

$$\tau = \frac{P_{\text{comp}}}{P_s} = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} \quad (4)$$

$$\tau' = \frac{P_d}{P_s} = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}$$

The dimensions of the discharge port and the minimum cell are constant for a conventional design of the WRVP. Therefore, the value $\tau = V_{\text{max}} / V_{\text{min}} = F_{\text{max}} / F_{\text{min}} = \text{const}$, and regardless of the operating regime of degassing and deodorization processes of vegetable oils, which leads to increased energy consumption and lower product quality. In the new design of the WRVP RDP, the size of the discharge port can be adjusted for a stable compression process in the working cell of the pump [11]. In this case:

$$V_{\text{min}} = \text{var}, F_{\text{min}} = \text{var}, \text{ and } \tau = V_{\text{max}} / V_{\text{min}} = F_{\text{max}} / F_{\text{min}} = \text{var} \quad \left. \begin{array}{l} \text{assuming that:} \\ p_s (\tau^{(n_{\text{ave}} - 1)/n_{\text{ave}}} - 1) \geq p_d = \text{const} \end{array} \right\}$$

The effective action speed (volume flow rate of the suction side, productive, capacity) of WRVP is one of the key indicators during the degassing and deodorization of vegetable oils, and is calculated as follows:

$$S_{\text{act}} = S_{\text{th}} \cdot \lambda_f \quad (5)$$

where, S_{act} is the actual speed of action, m^3/s ; S_{th} is the theoretical speed of action, m^3/s ; λ_f is the coefficient that refers to productivity losses that occur during the operation of the vacuum pump.

The coefficient (λ_f) depends on several factors, such as the properties of the working fluid, the design of the pump, the operating conditions of the agrotechnological processes, the composition of the gas, the temperature, the stability of the liquid ring and cavitation. The following dependence determines this coefficient:

$$\lambda_f = 1 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 \quad (6)$$

The coefficients λ_1 , λ_2 , λ_3 characterize the losses of vacuum pump productivity due to gas flows through the dead zone (harmful space), gas flows in gaps and evaporation, respectively, and are calculated by methods presented in the works [9, 10].

In the traditional design of the WRVP, at the initial moment of the pumping, the process of gas over compression occurs, due to which the effect of “harmful volume” arises, reducing the value of the speed of action. The new design regulates the flow space ($\tau = \text{var}$) of the compression cell and the discharge port, thereby eliminating these losses $\lambda_1 = 0$.

Consequently, the coefficient for new WRVP RDP is calculated as:

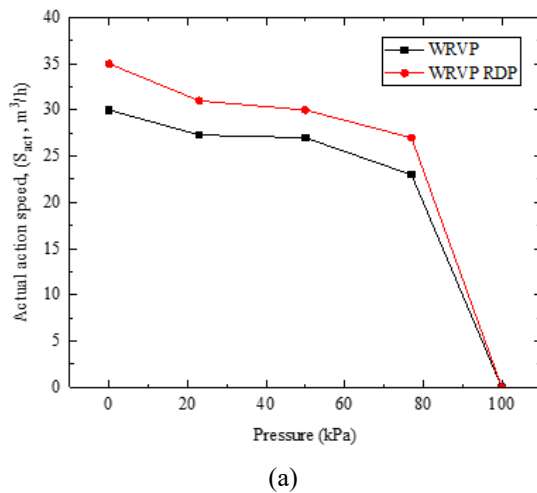
$$\lambda_f = 1 - \lambda_2 - \lambda_3 \quad (7)$$

During the operation of the WRVP in the vegetable oil production line, heat and mass transfer processes occur between the liquid and gas phases. Consequently, liquid droplets undergo evaporation into the functional volume of the working cells, thereby diminishing the operational efficiency. The following coefficient characterizes these losses in action speed:

$$\lambda_3 = \frac{V_{\text{evap}} \cdot z}{\pi \cdot (r_{22\phi}^2 - r_1^2) \cdot b \cdot \psi} \quad (8)$$

Where V_{evap} is the volume of evaporated liquid inside the working cell, m^3 .

Reduction of the speed of action (capacity of vacuum pump) caused by losses in gaps and heat and mass transfer can be eliminated by application the modification presented in patents [12, 13].



The results of the theoretical calculations (Figure 2) confirm that a WRVP RDP with an adjustable discharge window enables the optimization of internal compression for the process. This adjustment reduces the consumed compression work by 10–15% at the optimal operating regime.

The experimental results (Figure 3a, b) demonstrate that WRVP RDP reduces the power consumption on the shaft by 25% and increases the speed of action by 10% compared with the basic design. The modified configuration of the proposed vacuum pump offers an economical choice in vegetable oil deodorization and degassing.

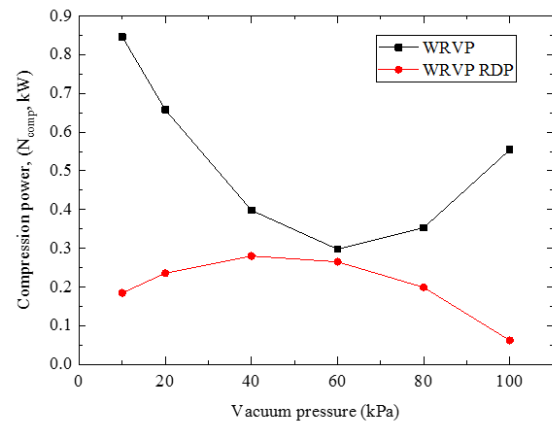


Figure 2. Theoretical dependence of the compression power vs the created vacuum

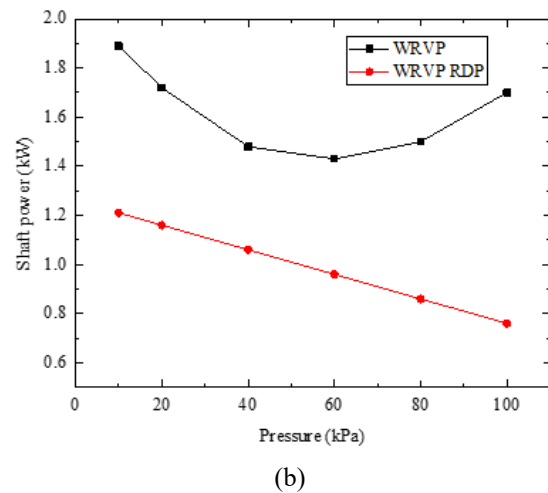


Figure 3. Experimental dependence: a) actual speed of action vs vacuum pressure; b) shaft power vs vacuum pressure

The vacuum technology is the main part of the production plant of vegetable oils. The process of removing dissolved gases, free fatty acids, odor-causing substances, decolourization, and deodorization from oils by the WRVP plant involves a series of mechanisms.

The oil is provided to the degassing/deodorization chamber, which has a special design. WRVP (1) with automatic regulation of the discharge port (8) creates of vacuum and generates an environment of low pressure within the chamber for oil thermal vacuum processing. The liquid ring

inside the pump's working cavity compresses the sucked gas while rotating in the compression zone. The boiling point of dissolved gases is lowered by the vacuum pump, which leads to evaporation at a lower temperature, and it is pulled out of the degassing chamber. Heating the oil to a given moderate temperature leads to a further reduction in viscosity and enhances the gas release process. The gaseous and liquid phases are separated as they exit the pump in the separator (5). Water as a working fluid is circulated, cooled (7), and supplied to the pump. The control valve (2) is used to adjust the appropriate amount of water needed to prevent the overload heating and normal operation of the vacuum pump. Heat exchanger apparatus (10) serves as a pre-condensation and cooler of the suction gas vapor mixture to eliminate the overload and cavitation inside the pump. Filters (11), (12) are used to protect the pump and auxiliary equipment, ensuring efficient removal of contaminants and maintaining optimal pump operation.

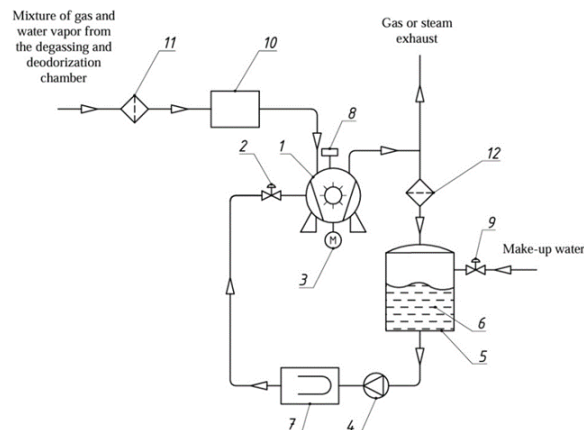


Figure 4. Technological scheme for an efficient WRVP plant for vegetable oil degassing and deodorization: 1 – WRVP; 2 – hydrodynamic control valve; 3 – electric motor; 4 – circulation pump for additional water fluid; 5 – separator of the gas-liquid phase; 6 – water; 7 – water cooler; 8 – device for automatic regulation of the discharge port; 9 – a hydrodynamic control valve for ensuring a constant level of water in the separator; 10 – pre-condenser/cooler; 11 – vacuum filter; 12 – exhaust filter of vacuum pump

Conclusions

The research findings indicated that the suggested design of a WRVP featuring an adjustable discharge port enhances the effectiveness of degassing and deodorizing vegetable oils. Changing the operating regime leads to a decrease in the power consumption on the compression and the shaft

of the vacuum pump, and increases the action speed by 15; 25 and 10% respectively, during the evacuation process. This technology preserves biologically active substances in oils, enhances environmental friendliness in production, and opens up new opportunities for various sectors within the food industry.

Литература

- 1 Mahmood M.A.S., Rodionov Yu.V., Nikitin D.V. et al. A comprehensive review of liquid ring vacuum pumps and compressors for improving global efficiency and energy saving // *AIUB Journal of Science and Engineering*. 2022. V. 21. № 1. P. 26–36.
- 2 Фролов Е.С., Минайчев В.Е., Александрова А.Т. Вакуумная техника. М.: Машиностроение, 1985. 359 с.
- 3 Махмуд М.А.С., Родионов Ю.В. Аналитическая математическая модель определения быстроты действия жидкостнокольцевых вакуумных насосов // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2024. № 2. С. 500–504.
- 4 Никитин Д.В., Родионов Ю.В., Махмуд М.А.С. и др. Жидкостнокольцевые вакуум-насосы для тепло- и массообменных процессов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2021. Т. 27. № 3. С. 428–441.
- 5 Гуськов А.А., Рыбин Г.В. Перспективные технологии переработки побочной продукции растениеводства // *Пищевые системы*. 2021. Т. 4. № 3S. С. 71–74.
- 6 Зорин А.С., Родионов Ю.В. Совершенствование сушки плодово-ягодной продукции // *Наука и образование*. 2023. Т. 6. № 3. С. 71–78.
- 7 Родионов Ю.В., Никитин Д.В., Рыбин Г.В. и др. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы комбинированного типа для энергоэффективных технологических процессов переработки растительного сырья // *Наука в центральной России*. 2023. Т. 66. № 6. С. 7–16.
- 8 Копылов М.В. Научное обеспечение комплексной технологии переработки масличного сырья с применением неизотермического прессования и двухступенчатой рафинационной очистки масел: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2025. 244 с.
- 9 Родионов Ю.В., Никитин Д.В., Рыбин Г.В. и др. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы комбинированного типа для энергоэффективных технологических процессов переработки растительного сырья // *Наука в центральной России*. 2023. Т. 66. № 6. С. 7–16. doi: 10.35887/2305-2538-2023-6-7-16
- 10 Никитин Д.В., Родионов Ю.В., Махмуд М.А.С. и др. Жидкостнокольцевые вакуум-насосы для тепло- и массообменных процессов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2021. Т. 27. № 3. С. 428–441.
- 11 Rodionov Yu.V., Selivanov Yu.T., Nikitin D.V. et al. Design of liquid-ring vacuum pump with adjustable degree of internal compression // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. V. 57. № 6. P. 20–23.
- 12 Пат. 2291987 Российская Федерация, МПК F04C19/00. Жидкостно-кольцевая машина / Ю.В. Воробьев, В.А. Максимов, В.В. Попов и др.; № 20041300046/06; заявл. 11.10.2004; опубл. 20.01.2007, Бюл. № 2.

- 13 Gharby S. Refining vegetable oils: Chemical and physical refining // *The Scientific World Journal*. 2022. V. 2022. P. 6627013.
- 14 Liu X., Yang Y., Li X. et al. Optimization of deodorization design for four different kinds of vegetable oil in industrial trial to reduce thermal deterioration of product // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2021. V. 98. № 4. P. 475–483.
- 15 Liu F., Ma L., Wang Y. et al. Effects of Supplemental Antioxidative Substances on Micronutrient Retention and Antioxidative Capacity in Rapeseed Oil During Low-Temperature Ethanol Steam Deodorization // *Foods*. 2025. V. 14. № 22. P. 3907.
- 16 Mahrous E.A., Farag M.A. Trends and applications of molecular distillation in pharmaceutical and food industries // *Separation & Purification Reviews*. 2022. V. 51. № 3. P. 300–317.
- 17 Bhatkar N.S., Pawar R.S., Jagtap P.S. Deaeration // *Mechanical Separation Processes in the Food Industry*. Woodhead Publishing, 2025. P. 215–236. doi: 10.1016/B978-0-12-819523-9.00014-7
- 18 Pech-Almeida J.L., Orozco-Álvarez C., Téllez-Medina D.I. et al. An overview on food applications of the instant controlled pressure-drop technology, an innovative high pressure-short time process // *Molecules*. 2021. V. 26. № 21. P. 6519. doi: 10.3390/molecules26216519
- 19 Liu X., Yang Y., Li X. et al. Optimization of deodorization design for four different kinds of vegetable oil in industrial trial to reduce thermal deterioration of product // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2021. V. 98. № 4. P. 475–483.
- 20 Gharby S. Refining vegetable oils: Chemical and physical refining // *The Scientific World Journal*. 2022. V. 2022. P. 6627013.
- 21 Karim N.A.A., Othman N.H., Yusoff M.M. Vegetable oil refining // *Recent advances in edible fats and oils technology: processing, health implications, economic and environmental impact* / Ed. by [укажите редактора]. Singapore: Springer Singapore, 2022. P. 101–140.
- 22 Hassanpour M. Transformer oil generation and regeneration techniques based on recent developments (A Review) // *International Journal of Petroleum Technology*. 2021. V. 8. P. 15–33.

References

- 1 Mahmood M.A.S., Rodionov Yu.V., Nikitin D.V. et al. A comprehensive review of liquid ring vacuum pumps and compressors for improving global efficiency and energy saving. *AIUB Journal of Science and Engineering*. 2022. vol. 21. no. 1. pp. 26–36.
- 2 Frolov E.S., Minajchev V.E., Aleksandrova A.T. Vacuum technology. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 359 p. (in Russian)
- 3 Mahmood M.A.S., Rodionov Yu.V. Analytical mathematical model for determining the operating speed of liquid ring vacuum pumps. *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2024. no. 2. pp. 500–504. (in Russian)
- 4 Nikitin D.V., Rodionov Yu.V., Mahmood M.A.S. et al. Liquid ring vacuum pumps for heat and mass transfer processes. *Bulletin of Tambov State Technical University*. 2021. no. 3. pp. 428–441. (in Russian)
- 5 Guskov A.A., Rybin G.V. Promising technologies for processing crop by-products. *Food Systems*. 2021. vol. 4. no. 3S. pp. 71–74. (in Russian)
- 6 Zorin A.S., Rodionov Yu.V. Improving the drying of fruit and berry products. *Science and Education*. 2023. vol. 6. no. 3. pp. 71–78. (in Russian)
- 7 Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Rybin G.V. et al. Combined-type liquid ring vacuum pumps for energy-efficient technological processes of plant raw material processing. *Science in Central Russia*. 2023. vol. 66. no. 6. pp. 7–16. (in Russian)
- 8 Kopylov M.V. Scientific support for a comprehensive technology for processing oilseeds using non-isothermal pressing and two-stage refining purification of oils: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2025. 244 p. (in Russian)
- 9 Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Rybin G.V. et al. Combined-type liquid ring vacuum pumps for energy-efficient technological processes of plant raw material processing. *Science in Central Russia*. 2023. vol. 66. no. 6. pp. 7–16. doi: 10.35887/2305-2538-2023-6-7-16 (in Russian)
- 10 Nikitin D.V., Rodionov Yu.V., Mahmood M.A.S. et al. Liquid ring vacuum pumps for heat and mass transfer processes. *Bulletin of Tambov State Technical University*. 2021. vol. 27. no. 3. pp. 428–441. (in Russian)
- 11 Rodionov Yu.V., Selivanov Yu.T., Nikitin D.V. et al. Design of liquid-ring vacuum pump with adjustable degree of internal compression. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. vol. 57. no. 6. pp. 20–23.
- 12 Vorobiev Yu.V., Maksimov V.A., Popov V.V. et al. Liquid ring machine. Patent RF, no. 2291987, 2007. (in Russian)
- 13 Gharby S. Refining vegetable oils: Chemical and physical refining. *The Scientific World Journal*. 2022. vol. 2022. p. 6627013.
- 14 Liu X., Yang Y., Li X. et al. Optimization of deodorization design for four different kinds of vegetable oil in industrial trial to reduce thermal deterioration of product. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2021. vol. 98. no. 4. pp. 475–483.
- 15 Liu F., Ma L., Wang Y. et al. Effects of Supplemental Antioxidative Substances on Micronutrient Retention and Antioxidative Capacity in Rapeseed Oil During Low-Temperature Ethanol Steam Deodorization. *Foods*. 2025. vol. 14. no. 22. p. 3907.
- 16 Mahrous E.A., Farag M.A. Trends and applications of molecular distillation in pharmaceutical and food industries. *Separation & Purification Reviews*. 2022. vol. 51. no. 3. pp. 300–317.
- 17 Bhatkar N.S., Pawar R.S., Jagtap P.S. Deaeration. *Mechanical Separation Processes in the Food Industry*. Woodhead Publishing, 2025. pp. 215–236. doi: 10.1016/B978-0-12-819523-9.00014-7
- 18 Pech-Almeida J.L., Orozco-Álvarez C., Téllez-Medina D.I. et al. An overview on food applications of the instant controlled pressure-drop technology, an innovative high pressure-short time process. *Molecules*. 2021. vol. 26. no. 21. p. 6519. doi: 10.3390/molecules26216519
- 19 Liu X., Yang Y., Li X. et al. Optimization of deodorization design for four different kinds of vegetable oil in industrial trial to reduce thermal deterioration of product. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2021. vol. 98. no. 4. pp. 475–483.
- 20 Gharby S. Refining vegetable oils: Chemical and physical refining. *The Scientific World Journal*. 2022. vol. 2022. p. 6627013.
- 21 Karim N.A.A., Othman N.H., Yusoff M.M. Vegetable oil refining. *Recent advances in edible fats and oils technology: processing, health implications, economic and environmental impact*. Ed. by [Editor's Name]. Singapore: Springer Singapore, 2022. pp. 101–140. doi: 10.1007/978-981-19-0667-2_4
- 22 Hassanpour M. Transformer oil generation and regeneration techniques based on recent developments (A Review). *International Journal of Petroleum Technology*. 2021. vol. 8. pp. 15–33.

Сведения об авторах

М.А.С. Махмуд аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет; ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, Аль-Фурат Аль-Аусат технический университет, Технический колледж Аль-мусаиб; Бабиль, Ирак, mr.mohammedali1993@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-2771-843X>

Юрий В. Родионов д.т.н., профессор, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет; ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, Мичуринский государственный аграрный университет; ул. Интернациональная, 101, г. Мичуринск, 393760, Россия, rodionow.u.w@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9601-9555>

Дмитрий В. Никитин к.т.н., доцент, кафедра агроинженерии, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, vacuum2008@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5885-2300>

Анна О. Сухова к.т.н., доцент, кафедра природопользования и защиты окружающей среды, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, apill@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7686-9314>

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

M.A.S. Mahmood postgraduate student, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University; Sovetskaya Street, 106, Tambov, 392000, Russia, Al -Furat Al-Awsat Technical University, Al-Mussaib Technical College; Babil, Iraq, mr.mohammedali1993@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-2771-843X>

Yuri V. Rodionov Dr. Sci. (Engin.), professor, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University; Sovetskaya Street, 106, Tambov, 392000, Russia, Michurinsk State Agrarian University; Internatsionalnaya Street, 101, Michurinsk, 393760, Russia, rodionow.u.w@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9601-9555>

Dmitry V. Nikitin Cand. Sci. (Engin.), associate professor, agroengineering department, Tambov State Technical University, Sovetskaya Street, 106, Tambov, 392000, Russia, vacuum2008@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5885-2300>

Anna O. Sukhova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, environmental management and protection department, Tambov State Technical University, Sovetskaya Street, 106, Tambov, 392000, Russia, apill@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7686-9314>

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 27/10/2025	После редакции 17/11/2025	Принята в печать 01/12/2025
Received 27/10/2025	Accepted in revised 17/11/2025	Accepted 01/12/2025

Разработка пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба

Зурет Н. Хатко	¹	znkhatko@mail.ru	 0000-0001-7097-1345
Газибег О. Магомедов	¹	gazibeck.magomedov@ya.ru	 0000-0002-7201-8387
Магомед Г. Магомедов	¹	mmg@inbox.ru	 0000-0003-2494-4973
Джамалудин М. Алиев	²	aliev_dzhamaludin@mail.ru	 0009-0005-8774-8787
Саида К. Кудайнетова	³	saidakudainetova@ya.ru	 0009-0006-1283-0740
Екатерина М. Колодина	⁴	goodwill_katya@mail.ru	 0009-0009-5349-1855

1 Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия

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

Аннотация. В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост потребительского спроса на продукты здорового питания, что стимулирует активные исследования в области хлебопечения. Цель работы – исследование и разработка пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба. Объектами исследования являлись образцы бездрожжевого (сбивного) хлеба, полученные на авторской установке проф. Магомедова Г.О. и др. в лаборатории кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств ФГБОУ ВО «ВГУИТ» (г. Воронеж). Исследования проводились по общепринятым в пищевой промышленности стандартным методам в лаборатории кафедры технологии пищевых продуктов и организации питания ФГБОУ ВО «МГТУ» (г. Майкоп). Установлено, что сбивание рецептурных компонентов для сбивного хлеба в комплексе с пектиновыми веществами способствует созданию стабильной структуры. Показано преимущественное влияние на органолептические показатели хлеба при использовании набухших пектинов по сравнению с сухим и контрольным образцом. Влияние состояния пектина (сухой, набухший) на пористость носит неоднозначный характер и зависит от типа используемых пектиновых веществ. Микроскопическое исследование выявило существенные различия в структуре мякиша хлеба по вариантам, которые проявляются в различном распределении плотных и рыхлых пор. Это связано с видом пектина, что подтверждает его влияние на формирование структурных свойств хлеба при одинаковых условиях приготовления. Исследование сорбционной способности хлеба показало, что использование пектиновых веществ увеличивает этот показатель от 5 (контроль – без пектина) до 65 (ВЭП+НЭП сух.) мг ионов Pb²⁺/г пектина. Комбинация пектинов повышает сорбционную способность хлеба, что подтверждает синергический эффект действия.

Ключевые слова: бездрожжевой хлеб, пектиновые вещества, комбинации пектиновых веществ, дегустационная оценка, пористость, сорбционная способность.

Development of pectin-containing yeast-free (churned) bread

Zuret N. Khatko	¹	znkhatko@mail.ru	 0000-0001-7097-1345
Gazibeg O. Magomedov	¹	gazibeck.magomedov@ya.ru	 0000-0002-7201-8387
Magomed G. Magomedov	¹	mmg@inbox.ru	 0000-0003-2494-4973
Jamaludin M. Aliyev	²	aliev_dzhamaludin@mail.ru	 0009-0005-8774-8787
Saida K. Kudainetova	³	saidakudainetova@ya.ru	 0009-0006-1283-0740
Ekaterina M. Kolodina	⁴	goodwill_katya@mail.ru	 0009-0009-5349-1855

1 Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maykop, Republic of Adygea, 385000, Russia

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

Abstract. In recent decades, there has been a steady increase in consumer demand for healthy food products, which stimulates active research in the field of baking. The purpose of the work is the research and development of pectin-containing yeast-free (churned) bread. The objects of the study were samples of yeast-free (churned) bread obtained at the author's installation by Prof. Magomedova G.O. and others. in the laboratory of the Department of Technology of bakery, confectionery, pasta and grain processing industries of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "VGUIT" (Voronezh). The research was carried out using standard methods generally accepted in the food industry in the laboratory of the Department of Food Technology and Nutrition Organization of the Moscow State Technical University (Maikop). It has been established that the churning of prescription components for whipped bread in combination with pectin substances contributes to the creation of a stable structure. The predominant effect on the organoleptic parameters of bread when using swollen pectins compared with dry and control samples is shown. The effect of the state of pectin (dry, swollen) on porosity is ambiguous and depends on the type of pectin substances used. Microscopic examination revealed significant differences in the structure of the bread crumb according to the variants, which are manifested in the different distribution of dense and loose pores. This is due to the type of pectin, which confirms its effect on the formation of the structural properties of bread under the same cooking conditions. A study of the sorption capacity of bread showed that the use of pectin substances increases this indicator from 5 (control – without pectin) to 65 (VEP+NEP dry) mg of Pb²⁺ ions/g of pectin. The combination of pectins increases the sorption capacity of bread, which confirms the synergistic effect of the action.

Keywords: yeast-free bread, pectin substances, combinations of pectin substances, tasting assessment, porosity, sorption capacity.

Для цитирования

Хатко З.Н., Магомедов Г.О., Магомедов М.Г., Алиев Д.М., Кудайнетова С.К., Колодина Е.М. Разработка пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 20–28. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-20-28

For citation

Khatko Z.N., Magomedov G.O., Magomedov M.G., Aliyev D.M., Kudaynetova S.K., Kolodina E.M. Development of pectin-containing yeast-free (churned) bread. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 20–28. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-20-28

Введение

Современные потребители все больше внимания уделяют здоровому питанию, что создает потребность в пищевых продуктах функционального или специализированного назначения, обогащенных функциональными ингредиентами, в том числе пектинами.

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост потребительского спроса на продукты здорового питания, что стимулирует активные исследования в области хлебопечения. Особое внимание уделяется разработке и совершенствованию технологий производства бездрожжевого хлеба, традиционно ассоциирующегося с плотным, слабо развитым мякишем. Однако современные представления о качестве подобной продукции кардинально изменились. Сегодня задача заключается не просто в исключении дрожжей из рецептуры, а в создании продукта с высокими органолептическими и структурно-механическими показателями, сопоставимыми с классическими дрожжевыми аналогами, либо обладающего уникальными потребительскими свойствами.

Продукты функционального и специализированного назначения можно получить не только за счет обогащения рецептур функциональными ингредиентами, но и разработкой технологий, обеспечивающих исключение из рецептуры некоторых компонентов. К таким относится бездрожжевая (сбивная) технология получения хлеба.

Исторически бездрожжевой хлеб производился с использованием химических разрыхлителей или физических методов. Однако его качество часто уступало дрожжевому хлебу.

Развитие биотехнологических подходов, основанных на применении разнообразных заквасок на основе молочнокислых бактерий и природных дрожжей, их ферментативная активность повлияла на качество хлеба. Параллельно развиваются направления, связанные с использованием ферментных препаратов, гидроколлоидов (пектиновые вещества [1] и др.) и современных физико-химических способов обработки сырья.

Сбивной способ приготовления теста позволяет получить продукт с нежной, пористой структурой без применения дрожжей, за счет механического сбивания [2].

Диспергационный метод, широко применяемый в промышленности для получения пен, основан на интенсивном перемешивании жидкости с пенообразователем. В ходе этого процесса происходит захват воздуха и его дробление на мелкие частицы. Часть работы, совершаемой при перемешивании, расходуется на увеличение свободной поверхностной энергии системы [3].

Существующие технологические приемы получения пен в общем случае классифицируются по двум группам факторов.

К первой группе относятся факторы, обусловленные самим пенообразователем – коллоидными ПАВ или высокомолекулярными соединениями. Среди последних наиболее эффективными являются полиэлектролиты, например, белки.

Вторая группа факторов определяется свойствами дисперсионной среды (жидкости). Ключевыми характеристиками здесь служат вязкость (прямо влияющая на устойчивость пены: чем она выше, тем стабильнее пена), водородный показатель (pH) и наличие низкомолекулярных электролитов. Следует отметить, что активная кислотность и электролиты, хотя формально и описывают дисперсионную среду, фактически воздействуют на пенообразователь, определяя его состояние и свойства [3].

Morreale F и др. изучили процесс обогащения безглютенового хлеба инулином [4].

Bojana Filipčev и др. изучено влияние замены гидроколлоидов (ксантановой камеди, гуаровой камеди, гидроксиметилцеллюлозы на шелуху семян подорожника) на текстуру мякиша, распределение воды и кинетику черствения безглютенового хлеба на основе смеси гречневой и рожковой муки [5].

Волков И.Е. и др. изучили возможность приготовления сбивного бездрожжевого теста при реализации метода механического рыхления, с помощью устройства, инициирующего кавитационные эффекты в толще теста путем возбуждения ультразвуковых колебаний [6].

Магомедов Г.О и др. [2] разработали технологию сбивного хлеба функционального назначения из муки цельносмолотого зерна для повышения пищевой ценности.

Известен способ (RU 2793968 C1) получения сбивных хлебобулочных изделий, который включает дозирование рецептурных компонентов, замес теста, сбивание, формование и выпечку тестовых заготовок, которые формуют под избыточным давлением воздуха 0,5 МПа из камеры сбивания в хлебопекарные силиконовые формы, установленные в камере формования. Выпекают их в печи с одновременным СВЧ-конвективным нагревом с последующим отключением СВЧ-нагрева при достижении температуры 65–70 °С в центре мякиша хлеба. Изобретение позволяет увеличить выход хлебобулочных изделий, повысить качество структуры теста и сократить продолжительность процесса выпечки хлебобулочных изделий [7].

Пектиновые вещества способны влиять на формирование реологических свойств пищевых систем, в том числе теста для получения хлеба. Отмечается положительное влияние пектиновых веществ на реологию пищевых систем, включающих муку или мучные композиты с низким содержанием глютена или безглютеновые [8]. В связи с этим, изучение влияния пектиновых веществ на реологические свойства бездрожжевого теста представляет большой интерес.

Таким образом, исследования, направленные на разработку пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба являются актуальными с научной и практической точек зрения.

Цель работы – исследование и разработка пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба.

Объекты и методы

Объектами исследования являлись образцы бездрожжевого (сбивного) хлеба: 1 – без добавления пектинов (контроль); 2 – с добавлением сухого высокоэтерифицированного пектина (ВЭП сухой); 3 – с добавлением сухого низкоэтерифицированного пектина (НЭП сухой); 4 – с добавлением комбинации сухого низко- и высокоэтерифицированных пектинов (НЭП+ВЭП сухой); 5 – с добавлением набухшего высокоэтерифицированного пектина (ВЭП набухший); 6 – с добавлением набухшего низкоэтерифицированного пектина (НЭП набухший); 7 – с добавлением комбинации набухших низко- и высокоэтерифицированных пектинов (НЭП+ВЭП набухший).

Характеристика пектиновых веществ представлена в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристика пектиновых веществ

Table 1.

Characteristics of pectin substances

Наименование Name	Торговая марка, производитель Brand, manufacturer	Степень этерификации, % Degree of esterification, %
Яблочный пектин 1 (НЭП) Apple pectin 1 (NEP)	«Айдиго», Китай	45–49
Яблочный пектин 2 (ВЭП) Apple pectin 2 (VEP)	«VALDE», Германия	>50

Образцы сбивного хлеба получены на авторской установке проф. Магомедова Г.О. и др. в лаборатории кафедры технологии хлебопечкарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств ФГБОУ ВО «ВГУИТ» (г. Воронеж).

Исследования проводились по общепринятым в пищевой промышленности стандартным методам в лаборатории кафедры технологии пищевых продуктов и организации питания ФГБОУ ВО «МГТУ» (г. Майкоп).

Замес теста производили на опытной установке ММС-50 [9].

Дегустационную оценку проводили по критериям с указанием коэффициентов весомости по ГОСТ ISO 6658–2016.

Микрофотографии получены на микроскопе медицинском «МИКМЕД-5» при увеличении 40-х.

Пористость хлеба измеряли на приборе Журавлева ПЖ-1М.

Исследование сорбционной способности (по отношению к ионам свинца) хлеба проведено трилонометрическим титрованием по методике Решетникова В.И.

Результаты и их обсуждение.

Вариант экспериментального состава пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба представлен на рисунке 1.

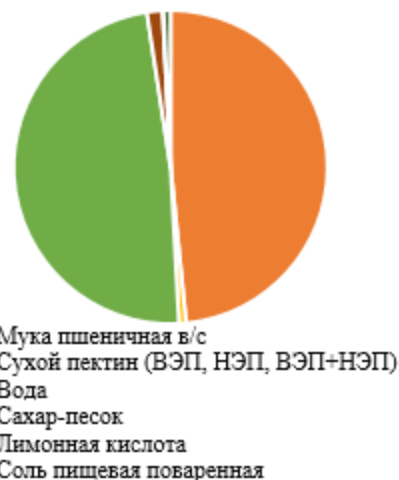


Рисунок 1. Экспериментальный состав пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба с добавлением пектинов

Figure 1. Experimental composition of pectin-containing yeast-free (whipped) bread with the addition of pectins

Способ приготовления пектиносодержащего сбивного хлеба включает замес теста из муки пшеничной в/с, пектиновых веществ, растворенных в воде сахара-песка и лимонной кислоты, соли пищевой поваренной, формование и выпечку.

Полученные образцы хлеба (общий вид, в разрезе) представлены на рисунке 2.

Как показывают данные рисунка 2, на серии фотографий представлены образцы хлеба, изготовленные с использованием различных видов и комбинаций пектинов, а также контрольный образец – без пектинов. Каждый

вариант представлен в двух видах: общий вид и в разрезе (для анализа состояния мякиша).

Результаты дегустационной оценки образцов пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба представлены в таблице 2.

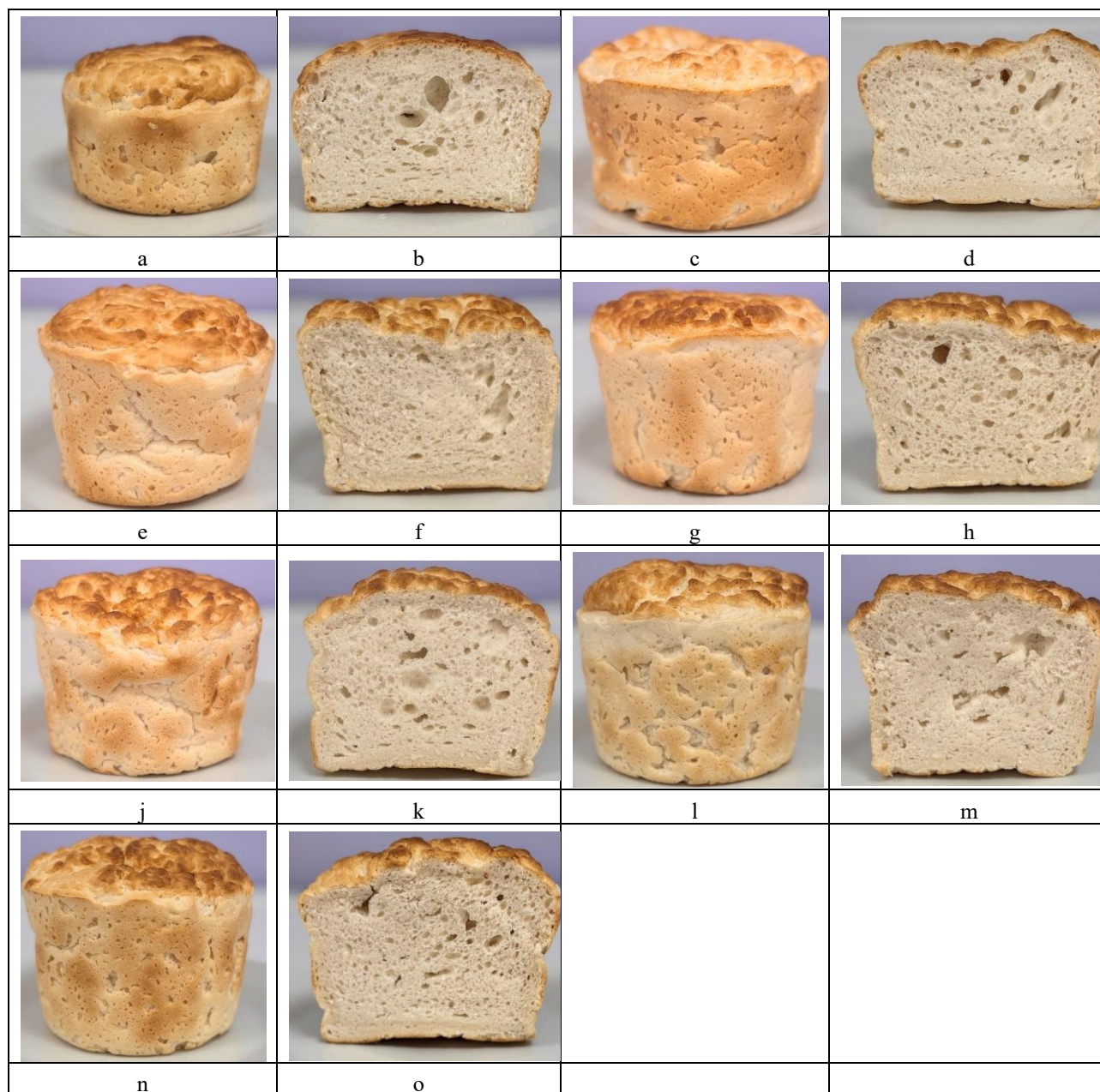


Рисунок 2. Образцы хлеба после выпечки: а – контроль; б – в разрезе; с – с ВЭП сухой; д – в разрезе; е – НЭП сухой; ф – в разрезе; г – с НЭП+ВЭП сухой; h – в разрезе; j – с ВЭП набухший; k – в разрезе; l – с НЭП набухший; m – в разрезе; n – с НЭП+ВЭП набухший, o – в разрезе

Figure 2. Bread samples after baking: a – control; b – in section; c – with VEP dry; d – in section; d – NEP dry; f – in section; g – with NEP+VEP dry; h – in section; j – with VEP swollen; k – in section; l – swollen with NEP; m – in section; n – with NEP+VEP swollen, o – in section

Таблица 2.

Результаты дегустационной оценки образцов пектиносодержащего бездрожжевого хлеба

Table 2.

The results of the tasting evaluation of samples of pectin-containing yeast-free bread

Образец Sample Отклонение (Δ) Derivation	Дегустатор Taster							Средний Балл Ave score
	1	2	3	4	5	6	7	
1 (контроль)	3,66	3,54	3,64	4,17	4,54	4,92	4,50	4,14
Δ	-0,48	-0,6	-0,5	+0,03	+0,4	+0,78	+0,36	-0,001
2	3,25	3,95	4,04	3,90	4,36	4,92	4,77	4,17
Δ	-0,92	-0,22	-0,13	-0,27	+0,19	+0,75	+0,6	0
3	3,23	4,36	4,04	4,05	4,77	4,92	4,80	4,31
Δ	-1,08	+0,05	-0,27	-0,26	+0,46	+0,61	+0,49	0
4	2,38	4,48	4,13	3,77	5,00	4,92	4,90	4,23
Δ	-1,85	+0,25	-0,1	-0,46	+0,77	+0,69	+0,67	-0,004
5	3,14	4,31	4,31	3,82	5,00	4,92	4,90	4,34
Δ	-1,2	-0,03	-0,03	-0,52	+0,66	+0,58	+0,56	0,003
6	3,90	4,31	4,21	3,90	4,67	4,92	4,82	4,39
Δ	-0,49	-0,08	-0,18	-0,49	+0,28	+0,53	+0,43	0
7	3,96	4,31	4,48	3,71	5,00	4,92	4,52	4,44
Δ	-0,48	-0,13	+0,04	-0,73	+0,56	+0,48	+0,08	-0,026

Более наглядно отражает результаты дегустационной оценки образцов лепестковая диаграмма (рисунок 3).

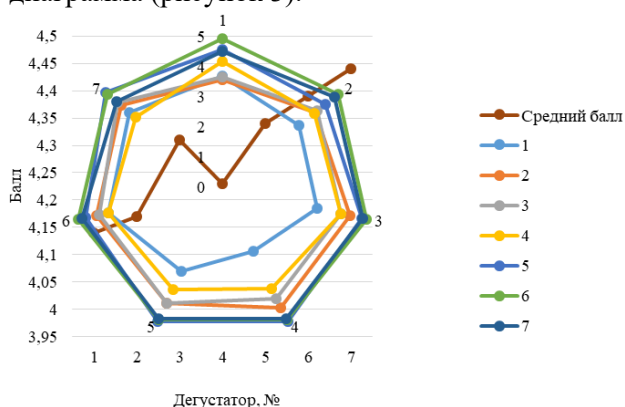


Рисунок 3. Лепестковая диаграмма дегустационной оценки образцов пектиносодержащего бездрожжевого хлеба

Figure 3. Petal diagram of the tasting evaluation of samples of pectin-containing yeast-free bread

Как показывают данные таблицы 2 и рисунка 3, образцы хлеба, в составе которого набухшие пектины самостоятельно и в комбинации, получили более высокие оценки по сравнению с вариантами, в которых сухие пектины. При этом мнения дегустаторов в наименьшей степени совпали при оценке образца 4, средний балл которого составляет 4,23, но при этом отклонения оценок самые большие: от -1,85 до +0,77; в наибольшей степени – при оценке образца 6, средний балл – 4,39, а диапазон отклонений относительно невелик (от -0,49 до +0,53).

Самый высокий средний балл имеет образец 7 (4,44), самый низкий – образец 1 (контроль) (4,14).

Определена пористость образцов пектиносодержащего бездрожжевого хлеба (рисунок 4).

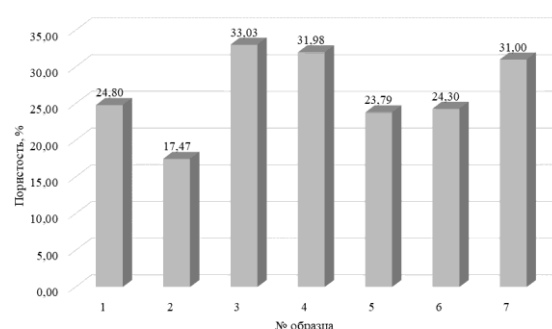


Рисунок 4. Пористость образцов пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба

Figure 4. Porosity of samples of pectin-containing yeast-free (churned) bread

Как показывают данные рисунка 4, разные виды пектинов и их комбинации по-разному влияют на пористость хлеба по вариантам. Нет однозначной картины влияния пектиновых веществ в зависимости от состояния «сухой» или «набухший». Так, значения пористости ниже контроля в вариантах – с ВЭП сухой и НЭП набухший. Большая активность набухшего пектина в сравнении с сухим проявляется только с ВЭП (2 и 5 варианты), в других – активнее сухие пектины (3 и 4 варианты).

ВЭП сухой (17,47 %) резко снижает пористость почти на 30 % по сравнению с контролем. Пористость ВЭП набухшего (23,79 %) практически идентична по сравнению с контролем (24,80 %). НЭП сухой (33,03 %) напротив, значительно увеличивает пористость (на 33 %), а набухание нивелирует его положительный эффект, т. к. высокий показатель (33,03 %) падает до уровня контроля (24,30 %).

Показатель пористости комбинации ВЭП+НЭП сухой (31,98 %) близок к результату НЭП и значительно выше контроля, что

демонстрирует доминирующее влияние НЭП в смеси на формирование пористости, при этом добавление ВЭП не оказывает негативного эффекта, а лишь немного снижает пористость по сравнению с НЭП. Набухшая комбинация сохраняет высокую эффективность (31,00 %),

хотя показатель и немного снижается по сравнению с сухой смесью (31,98 %).

Микрофотографии мякишей пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба представлены на рисунке 5.

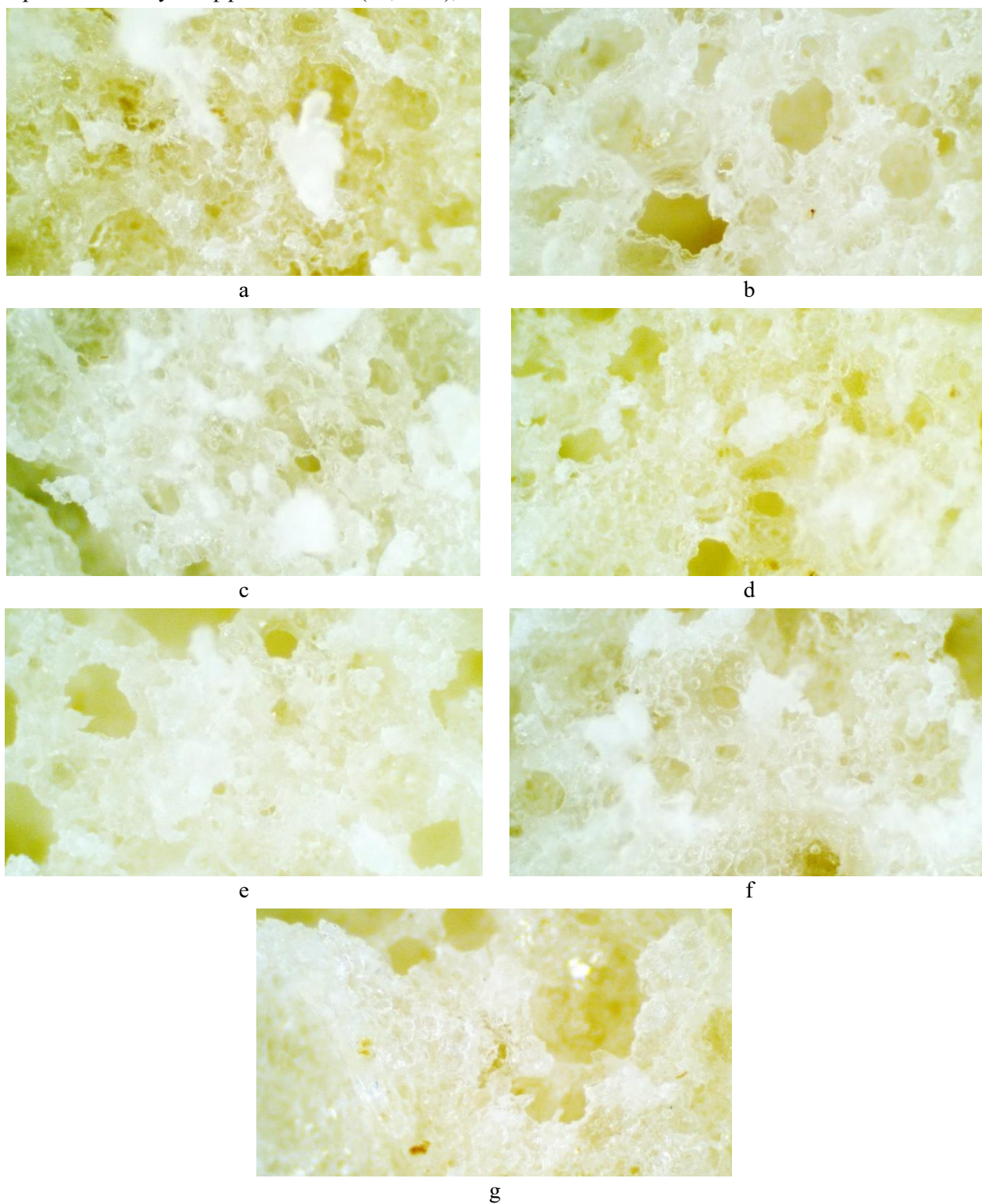


Рисунок 5. Микрофотографии мякишей пектиносодержащего бездрожжевого (сбивного) хлеба: а – контроль; б – с ВЭП сухой; с – с НЭП сухой; d – с НЭП+ВЭП сухой; e – с ВЭП набухший; f – с НЭП набухший; g – с НЭП+ВЭП набухший

Figure 5. Micrographs of the crumb of pectin-containing yeast-free (churned) bread: a – control; b – with dry VEP; c – with dry NEP; d – with dry NEP+VEP; e – with swollen VEP; f – with swollen NEP; g – with + NEPVEP is swollen

Как показывают данные рисунка 5, структура мякиша существенно различается между образцами, демонстрируя распределение плотных и рыхлых пор у каждого из них. Данные различия в гетерогенности пористости связаны с варьированием вида пектинов, который при прочих равных технологических параметрах определяет индивидуальные структурные свойства конечного продукта.

Сорбционная способность образцов пектинового бездрожжевого (сбивного) хлеба представлена в таблице 3.

Таблица 3.
Сорбционная способность образцов пектинового бездрожжевого (сбивного) хлеба

Table 3.
Sorption capacity of samples of pectin-containing yeast-free (churned) bread

Образец Sample	Количество ZnSO ₄ , мл (ср. знач.) Amount of ZnSO ₄ , ml (average value)	Сорбционная способность, мг ионов Pb ²⁺ /г пектина Sorption capacity, mg Pb ²⁺ ions/g pectin
Вода Water	16,0	–
контроль control	16,1	5
2	17,0	35
3	17,5	50
4	18,0	65
5	17,0	35
6	16,5	15
7	17,5	50

Как показывают данные таблицы 3, хлеб с НЭП сухой проявляет большую сорбционную способность (50), чем с ВЭП сухой (35). При использовании комбинации этих пектинов их сорбционная способность увеличивается (65), что подтверждает синергический эффект действия.

Для хлеба с ВЭП набухший значение сорбционной способности такое же, как и в сухом (35), для НЭП набухший значение ниже (15), а с комбинациями этих пектинов значение увеличивается (50), однако, оно равно значению НЭП без комбинации (50) и ниже, чем с комбинацией сухих (65).

Значения сорбционной способности хлеба по вариантам по убыванию можно расположить в ряд следующим образом:

ВЭП+НЭП сух. (65) > НЭП сух. (50),
ВЭП+ НЭП наб. > ВЭП сух., ВЭП наб. (35) >
НЭП наб. (15) > Контроль (5).

Заключение

1. Установлено, что сбивание рецептурных компонентов для сбивного хлеба в комплексе с пектиновыми веществами способствует созданию стабильной структуры.

2. Показано преимущественное влияние на органолептические показатели хлеба при использовании набухших пектинов по сравнению с сухими и контрольным образцом. Влияние состояния пектина (сухой, набухший) на пористость носит неоднозначный характер и зависит от типа используемых пектиновых веществ.

3. Микроскопическое исследование выявило существенные различия в структуре мякиша хлеба по вариантам, которые проявляются в различном распределении плотных и рыхлых пор. Это связано с видом пектина, что подтверждает его влияние на формирование структурных свойств хлеба при одинаковых условиях приготовления.

4. Исследование сорбционной способности хлеба показало, что использование пектиновых веществ увеличивает этот показатель от 5 (контроль – без пектина) до 65 (ВЭП+НЭП сух.) мг ионов Pb²⁺/г пектина. Комбинация пектинов повышает сорбционную способность хлеба, что подтверждает синергический эффект действия.

Благодарности

Исследование выполнялось за счет средств государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023122100005-9-2.9.1 «Высокоэффективные технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, обеспечивающие экспортный потенциал: новые конкурентоспособные пищевые продукты, новые медицинские и косметические средства, инновационные технологии, пролонгирование сроков хранения продуктов». Авторы выражают особую благодарность ФГБОУ ВО «ВГУИТ» (г. Воронеж) за проведение лабораторных исследований.

Литература

- 1 Хатко З.Н., Баранов А.В., Куижева С.К. и др. Исследование влияния видов пектиновых веществ и их комбинаций на антиоксидантную активность и комплексообразующую способность для применения в пищевых системах // Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 168–177.
- 2 Магомедов Г.О., Хвостов А.А., Журавлев А.А. и др. Формирование структуры мякиша сбивного бездрожжевого хлеба при интенсивной СВЧ-конвективной выпечке // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 3. С. 426–438.
- 3 Хвостов А.А., Магомедов Г.О., Журавлев А.А. и др. Математическая модель процесса СВЧ и конвективной выпечки хлеба из сбивного теста // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 93–103.
- 4 Mohammadi F., Azizi M.H., Mohebbi M. et al. Inulin enriched wheat bread: Interaction of polymerization degree and fermentation type // Journal of Food Measurement and Characterization. 2021. V. 15. № 6. P. 5408–5417.
- 5 Filipčev B., Pojić M., Šimurina O. et al. Psyllium as an improver in gluten-free breads: Effect on volume, crumb texture, moisture binding and staling kinetics // LWT – Food Science and Technology. 2021. V. 151. P. 112131.

- 6 Волков И.Е., Романчиков С.А. Совершенствование технологии приготовления сбивного теста // Повышение качества и безопасности пищевых продуктов: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Махачкала, 09–10 ноября 2022 года). Махачкала: ООО «Издательство АЛЕФ», 2022. С. 123–126.
- 7 Пат. 2621997 Российская Федерация, МПК А21D 13/02. Способ производства сбивного хлеба из муки цельнозернового зерна тритикале / Г.О. Магомедов, Н.П. Зацепилина, Е.Э. Дзантиева и др.; заявитель ФГБОУ ВО «ВГУИТ». № 2016110823; заявл. 24.03.2016; опубл. 08.06.2017, Бюл. № 16.
- 8 Куижева С.К., Хатко З.Н., Колодина Е.М. Пектиносодержащие мучные кондитерские изделия с пониженным содержанием глютена. Майкоп: Изд-во «Магарин Олег Григорьевич», 2022. 124 с. ISBN 978-5-91692-946-1.
- 9 Хекилаева З.С., Гуриева А.Х. Применение яблочного пектина в рецептурах хлеба // Инновационные научные исследования. 2023. № 11. С. 45–55. doi: 10.5281/zenodo.8052760
- 10 Беляев А.Г. Исследование органолептических и физико-химических показателей хлеба, полученного с использованием солодовой и хмелевой заквасок, активизированных пектиновыми веществами // Новые концептуальные подходы к решению глобальной проблемы обеспечения продовольственной безопасности в современных условиях: сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции (Курск, 2020 г.). Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 78–83.
- 11 Rehberg L., Conway L. The Bread Machine Magic Book of Helpful Hints: Dozens of Problem-Solving Hints and Troubleshooting Techniques for Getting the Most Out of Your Bread Machine. New York: St. Martin's Griffin, 2024. 304 p.
- 12 Parapouli M., Vasileiadis A., Afendra A.S. et al. *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications // AIMS Microbiology. 2020. V. 6. № 1. P. 1–31.
- 13 Ковалева А.Е., Закина М.А., Пьяникова Е.А. и др. Сравнительный анализ хмелевых заквасок для цельнозернового хлеба // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 4. С. 39–45.
- 14 Korniienko I.M., Mykoliv I.Y., Garkava K.H. et al. Spline model optimization of the biotechnological process of obtaining sourdough for bakery needs using functional components // Journal of Chemistry and Technologies. 2024. V. 32. № 4. P. 1073–1097.
- 15 Shevchenko A. Artichoke powder and buckwheat bran in diabetic bakery products // Bioenhancement and Fortification of Foods for a Healthy Diet / Ed. by [укажите редактора]. Boca Raton: CRC Press, 2022. P. 115–134.
- 16 Korniienko I.M., Kuznietsova O.O., Garkava K.H. Formation of individual human health: modern biotechnological trends in the use of probiotic microorganisms in functional sourdough bakery products. Riga: Publishing House "Baltija Publishing", 2023.
- 17 Shevchenko A., Fursik O., Drobot V. et al. The use of wastes from the flour mills and vegetable processing for the enrichment of food products // Bioconversion of Wastes to Value-added Products. Boca Raton: CRC Press, 2023. P. 1–35.
- 18 Zakina M.A., Kovaleva A.E., Pyanikova E.A. The development of a rye-wheat bread recipe using apple iodine pectin extract // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. V. 82. № 4. P. 202–206.
- 19 Smirnova T.B., Temereva I.V., Tolstoguzova T.T. The use of whole-ground amaranth flour in the production of bread // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1052. № 1. P. 012027.
- 20 Akkozha I.S., Iztayev A., Yakiyayeva M.A. et al. Accelerated technology for bread preparation using activated water // Slovak Journal of Food Sciences. 2023. V. 17. P. 484–502. doi: 10.5219/1881

References

- 1 Khatko Z.N., Baranov A.V., Kuizheva S.K. et al. Study of the influence of types of pectic substances and their combinations on antioxidant activity and complexing ability for application in food systems. Polzunovsky Bulletin. 2025. no. 1. pp. 168–177. (in Russian)
- 2 Magomedov G.O., Khvostov A.A., Zhuravlev A.A. et al. Formation of crumb structure of whipped yeast-free bread during intensive microwave-convective baking. Technique and Technology of Food Production. 2022. vol. 52. no. 3. pp. 426–438. (in Russian)
- 3 Khvostov A.A., Magomedov G.O., Zhuravlev A.A. et al. Mathematical model of the process of microwave and convective baking of bread from whipped dough. Technique and Technology of Food Production. 2024. vol. 54. no. 1. pp. 93–103. (in Russian)
- 4 Mohammadi F., Azizi M.H., Mohebbi M. et al. Inulin enriched wheat bread: Interaction of polymerization degree and fermentation type. Journal of Food Measurement and Characterization. 2021. vol. 15. no. 6. pp. 5408–5417.
- 5 Filipčev B., Pojić M., Šimurina O. et al. Psyllium as an improver in gluten-free breads: Effect on volume, crumb texture, moisture binding and staling kinetics. LWT – Food Science and Technology. 2021. vol. 151. p. 112131. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112131
- 6 Volkov I.E., Romanchikov S.A. Improvement of whipped dough preparation technology. Improving the quality and safety of food products: materials of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation (Makhachkala, November 9–10, 2022). Makhachkala: ALEF Publishing House LLC, 2022. pp. 123–126. (in Russian)
- 7 Magomedov G.O., Zatsopilina N.P., Dzantseva E.E. et al. Method for producing whipped bread from whole-ground triticale flour. Patent RF, no. 2621997, 2017. (in Russian)
- 8 Kuizheva S.K., Khatko Z.N., Kolodina E.M. Pectin-containing flour confectionery products with reduced gluten content. Maykop: Publishing House "Magarin Oleg Grigoryevich", 2022. 124 p. ISBN 978-5-91692-946-1 (in Russian)
- 9 Khekielava Z.S., Guriyeva A.Kh. Application of apple pectin in bread recipes. Innovative Scientific Research. 2023. no. 11. pp. 45–55. doi: 10.5281/zenodo.8052760 (in Russian)
- 10 Belyaev A.G. Study of organoleptic and physicochemical parameters of bread obtained using malt and hop sourdoughs activated with pectic substances. New conceptual approaches to solving the global problem of ensuring food security in modern conditions: collection of scientific articles of the VII International Scientific and Practical Conference (Kursk, 2020). Kursk: South-West State University, 2020. pp. 78–83. (in Russian)
- 11 Rehberg L., Conway L. The Bread Machine Magic Book of Helpful Hints: Dozens of Problem-Solving Hints and Troubleshooting Techniques for Getting the Most Out of Your Bread Machine. New York: St. Martin's Griffin, 2024. 304 p.

- 12 Parapouli M., Vasileiadis A., Afendra A.S. et al. Saccharomyces cerevisiae and its industrial applications. *AIMS Microbiology*. 2020. vol. 6. no. 1. pp. 1–31. doi: 10.3934/microbiol.2020001
- 13 Kovaleva A.E., Zakina M.A., Pyanikova E.A. et al. Comparative analysis of hop sourdoughs for whole grain bread. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022. vol. 84. no. 4. pp. 39–45. (in Russian)
- 14 Korniienko I.M., Mykoliv I.Y., Garkava K.H. et al. Spline model optimization of the biotechnological process of obtaining sourdough for bakery needs using functional components. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. vol. 32. no. 4. pp. 1073–1097.
- 15 Shevchenko A. Artichoke powder and buckwheat bran in diabetic bakery products. *Bioenhancement and Fortification of Foods for a Healthy Diet*. Ed. by [Editor's Name]. Boca Raton: CRC Press, 2022. pp. 115–134.
- 16 Korniienko I.M., Kuznietsova O.O., Garkava K.H. Formation of individual human health: modern biotechnological trends in the use of probiotic microorganisms in functional sourdough bakery products. [Book Title]. Ed. by [Editor's Name]. Riga: Publishing House "Baltija Publishing", 2023. pp. [Page Range].
- 17 Shevchenko A., Fursik O., Drobot V. et al. The use of wastes from the flour mills and vegetable processing for the enrichment of food products. *Bioconversion of Wastes to Value-added Products*. Ed. by [Editor's Name]. Boca Raton: CRC Press, 2023. pp. 1–35.
- 18 Zakina M.A., Kovaleva A.E., Pyanikova E.A. The development of a rye-wheat bread recipe using apple iodine pectin extract. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 202–206.
- 19 Smirnova T.B., Temereva I.V., Tolstoguzova T.T. The use of whole-ground amaranth flour in the production of bread. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. vol. 1052. no. 1. p. 012027. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012027
- 20 Akkozha I.S., Iztayev A., Yakiyayeva M.A. et al. Accelerated technology for bread preparation using activated water. *Slovak Journal of Food Sciences*. 2023. vol. 17. pp. 484–502. doi: 10.5219/1881

Сведения об авторах

Зурет Н. Хатко д.т.н., зав. кафедрой, кафедра технологии пищевых продуктов и организации питания, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия, znkhatko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7097-1345>

Газибег О. Магомедов д.т.н., зав. кафедрой, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, gazibek.magomedov@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7201-8387>

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>

Джамалудин М. Алиев магистрант, кафедра технологии пищевых продуктов и организации питания, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия, aliev_dzhamaludin@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-8774-8787>

Саида К. Кудайнетьова аспирант, кафедра технологии пищевых продуктов и организации питания, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия, saidakudainetova@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0006-1283-0740>

Екатерина М. Колодина преподаватель, кафедра технологии пищевых продуктов и организации питания, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия, goodwill_katya@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-5349-1855>

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

Zuret N. Khatko Dr. Sci. (Engin.), head of dep, food technology and catering department, Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maikop, Republic of Adygea, 385000, Russia, znkhatko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7097-1345>

Gazibeg O. Magomedov Dr. Sci. (Engin.), head of dep, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, gazibek.magomedov@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7201-8387>

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>

Jamaludin M. Aliyev master student, food technology and catering department, Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maikop, Republic of Adygea, 385000, Russia, aliev_dzhamaludin@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-8774-8787>

Saida K. Kudainetova graduate student, food technology and catering department, Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maikop, Republic of Adygea, 385000, Russia, saidakudainetova@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0006-1283-0740>

Ekaterina M. Kolodina lecturer, food technology and catering department, Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maikop, Republic of Adygea, 385000, Russia, goodwill_katya@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-5349-1855>

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 27/10/2025	После редакции 24/11/2025	Принята в печать 01/12/2025
Received 27/10/2025	Accepted in revised 24/11/2025	Accepted 01/12/2025

Прогнозирование развития технологических процессов ведущего оборудования линии производства хлеба из пшеничной муки

Денис В. Доня¹ doniadv@rambler.ru  0000-0002-5818-0804

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Тимирязевская ул., 49, г. Москва, 127434, Россия

Аннотация. Хлебопекарная промышленность является одной из самых исторически значимых, история которой насчитывает уже многие сотни лет. При этом она является и самой противоречивой, в которой наряду с автоматизацией и роботизацией, до сих пор существует много ручного труда, который отрицательным образом на всю отрасль в целом. И чтобы повысить конкурентоспособность данной отрасли производства следует провести модернизацию некоторых технологических этапов производства и всего технологического процесса, для чего требуется внедрять автоматизацию и роботизацию как на отдельных этапах производства, так и на протяжении всего технологического процесса. Помимо этого, стоит внедрять научно обоснованные, ресурсосберегающие и экологические технологии. Проведено научно-техническое прогнозирование, ставящее целью анализ целесообразности модернизации конструкции тестомесильной машины. Была сформирована модель «черного ящика» стадии замеса теста. Для более наглядного структурирования и оценки значимости рассматриваемых параметров был применен метод экспертного оценивания, результаты представлены в виде таблицы рангов. Исследование характеристик, оказывающих влияние на операцию замеса теста, было выполнено с применением четырех различных параметров, среди которых были входные и выходные, разделенные на управляющие, управляемые, возмущаемые и наблюдаемые, а сам технологический процесс замеса теста выполнялся в тестомесильной машине. Наиболее значимыми факторами в процессе замеса теста являются: влажность и температура теста, частота вращения месильного органа тестомесильной машины, объем воды для замеса. Помимо этого, модернизация оборудования тестомесильной машины представляется довольно перспективным направлением для повышения эффективности технологического процесса замеса теста.

Ключевые слова: АПК, тесто, «черный ящик», тестомесильная машина, прогнозирование.

Forecasting the development of technological processes for the leading equipment of a wheat flour bread production line

Denis V. Donya¹ doniadv@rambler.ru  0000-0002-5818-0804

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya St., 49, 127434, Moscow, Russia

Abstract. The bakery industry is one of the most historically significant, with a history dating back many hundreds of years. At the same time, it is also the most controversial, in which, along with automation and robotics, there is still a lot of manual labor, which negatively affects the entire industry. And in order to increase the competitiveness of this industry, it is necessary to modernize some technological stages of production and the entire technological process, which requires the introduction of automation and robotics both at individual stages of production and throughout the entire technological process. In addition, it is worth introducing science-based, resource-saving and environmental technologies. Scientific and technical forecasting has been carried out, which aims to analyze the feasibility of modernizing the design of the kneading machine. A "black box" model of the dough kneading stage was formed. For a more visual structuring and assessment of the significance of the parameters under consideration, the expert assessment method was applied, the results are presented in the form of a table of ranks. The study of the characteristics influencing the dough kneading operation was performed using four different parameters, among which were input and output parameters divided into control, controlled, perturbed and observed, and the technological process of dough kneading was performed in a dough mixing machine. The most significant factors in the process of kneading dough are: the humidity and temperature of the dough, the speed of rotation of the kneading body of the kneading machine, the volume of water for kneading. In addition, the modernization of the equipment of the kneading machine seems to be a rather promising direction for improving the efficiency of the dough kneading process.

Keywords: agroindustrial complex, dough, "black box", dough mixing machine, forecasting.

Введение

Пищевая промышленность – стратегическая отрасль государства. В частности, хлебопекарное производство является важнейшей экономической отраслью, относящейся к одному из ведущих сегментов АПК. Согласно данным Росстата за 2023 год на территории Российской Федерации функционируют около

1000 хлебокомбинатов. Каждое из них представляет сложный комплекс связанных между собой машин и аппаратов, которые собраны в производственные линии [1].

Одно из возможных направлений развития предприятий хлебопекарной промышленности лежит в плоскости увеличения мощностей предприятий. Однако выполнение данного

Для цитирования

Доня Д.В. Прогнозирование развития технологических процессов ведущего оборудования линии производства хлеба из пшеничной муки // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 29–35. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-29-35

For citation

Donya D.V. Forecasting the development of technological processes for the leading equipment of a wheat flour bread production line. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 29–35. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-29-35

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

направления развития невозможно без проведения реконструкции существующих предприятий, внедрения ресурсосберегающего оборудования, повышения уровня автоматизации и цифровизации, что приведет к снижению ручного труда, а также внедрение новых, безопасных и экологических упаковочных материалов. В данной сфере имеется множество проблем, требующих пристального внимания и их решения, основной из которых является увеличение эффективности производства [2].

Хлебопекарная промышленность является одной из самых исторически значимых, история которой насчитывает уже многие сотни лет. При этом она является и самой противоречивой, в которой наряду с автоматизацией и роботизацией, до сих пор существует много ручного труда, который отрицательным образом на всю отрасль в целом [3, 5]. И чтобы повысить конкурентоспособность данной отрасли производства следует провести модернизацию некоторых технологических этапов производства и всего технологического процесса, для чего требуется внедрять автоматизацию и роботизацию как на отдельных этапах производства, так и на протяжении всего технологического процесса. Помимо этого, стоит внедрять научно обоснованные, ресурсосберегающие и экологичные технологии [4, 7, 8].

Также можно выделить такие направления развития хлебопекарного производства в нашей стране, как внедрение инновационных технологий в машинно-аппаратурном обеспечении, совершенствование рецептур и параметров производства хлебобулочных изделий, модернизация в маркетинговой и логистической отраслях, повышение экономической эффективности путем использования различных систем управления персоналом [4].

В настоящий момент методы выявления слабых мест технологических линий основываются на прогрессивных научных методах исследований, к которым можно отнести метод системно-структурного анализа. Данный метод позволяет проводить адаптацию технологии к автоматизированному производству и формально-логическому решению некоторых технологических задач [5].

Для хлебопекарных предприятий малых мощностей характерно использование агрегатов периодического цикла действия, позволяющие оперативно реагировать на изменения процесса.

Ведущим оборудованием в системе являются аппараты для темперирования, машины для дозировки и смешивания компонентов, агрегаты для брожения опары и теста, тестоделители и формовочные машины.

Безопасность и качество готового хлеба непосредственно зависит от состояния каждой составляющей технологического процесса.

Совершенствование технической базы хлебопекарной отрасли приводит к уменьшению финансовых затрат, что крайне важно для предприятий в наше время [7, 8].

Способ визуализации системы в виде операторной модели позволяет рассмотреть технологию от самого общего, абстрактного ее видения до более точного, детального.

Технологическая линия производства пшеничного хлеба отличается сложностью устройства и функционирования с большим количеством элементов, которые тесно взаимодействуют друг с другом. Для полного системного анализа используется подход деления сложного процесса на подсистемы, другими словами, составляется операторная модель. Она состоит из подсистем и процессоров.

По результатам системного анализа технологической линии производства пшеничного хлеба получена операторная модель, содержащая в себе следующие элементы [7, 9, 13]:

1 – подсистема хранения готовой продукции (операторы: I – хранение на склад, II – укладка хлеба на лотки, III – контроль показателей качества готовой продукции);

2 – подсистема получения продукции с заданными показателями качества (операторы: I – охлаждение готовой продукции, II – выпечка тестовых полуфабрикатов);

3 – подсистема получения тестовых заготовок с заданными свойствами (операторы: I – формование теста с последующей расстойкой тестовых заготовок, II – замес теста с заданными физико-химическими свойствами, III – изготовление опары);

4 – подсистемы подготовительной обработки сырья (операторы: I – фильтрация питьевой воды для опары; II – просеивание муки от примесей; III – изготовление солевого раствора заданной концентрации; IV – изготовление сахарного раствора заданной концентрации; V – получение жидких дрожжей; VI – подготовка воды для основного производства).

Материалы и методы

Модель «черный ящик» – это система, которая оставляет видимыми для эксперта только входные и выходные данные, а устройство и внутренний функционал остается неизвестным [14].

Трудностью в составлении модели «черный ящик» является большое количество так называемых входов и выходов из него. Это обусловлено тем, что взаимодействие любой так называемой «живой» системы с окружающими его объектами происходит по бесчисленному количеству способов. Однако, при составлении модели

какой-либо системы требуется отбирать из бесконечного числа связей какое-то определенное их количество, которое и будет участвовать в данной модели как входные и выходные связи. В качестве критерия отбора таких связей будет являться назначение самой модели и существенность каждой из этих связей по отношению к самой цели. Таким образом проводится исключение наименее важных связей, а более важные применяются для рассмотрения в составляемой модели.

В модели «черный ящик» для технологического процесса выделяют такие группы факторов,

как входные и выходные, которые в свою очередь делятся на: управляющие, возмущающие, наблюдаемые и управляемые [17].

Для технологической операции – замес пшеничного теста характерны следующие факторы [18]. Данных факторов выявлено 15, которые представлены на рисунке 1. На данном рисунке представлена модель «черного ящика», применимого для процесса замеса теста, выполняемого в тестомесильной машине и характеризуемого заданными технологическими параметрами.

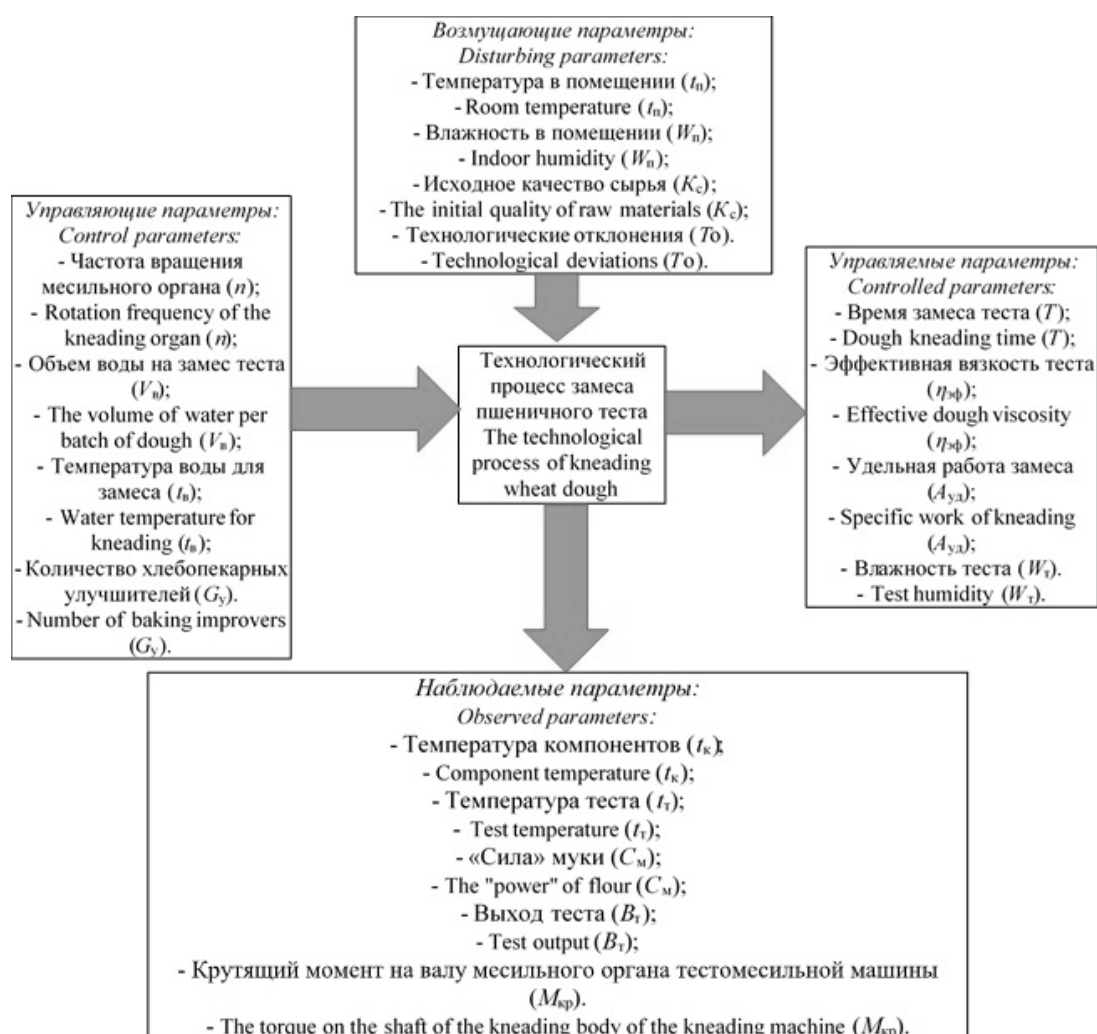


Рисунок 1. Модель «черный ящик» технологического процесса замеса пшеничного теста

Figure 1. The "black box" model of the technological process of kneading wheat dough

Результаты

Для того чтобы определить значимость отдельных факторов процесса было проведено априорное ранжирование методом экспертной оценки. В основе данного метода определения экспертных оценок лежит процесс определения степеней влияния входных и выходных факторов на исследуемый технологический процесс.

Все это выражается в определенной, заранее выбранной системе оценок, которая подразумевает что наиболее высшей оценке будет приравнен наименьший ранг [16, 19].

Априорное ранжирование проводилось 5 экспертами по 15 факторам, которые можно разделить на входные и на выходные факторы.

Эти две группы факторов, в свою очередь делятся на более мелкие подгруппы. Так, входные факторы делятся на возмущающие и управляющие факторы, а выходные делятся на управляемые и наблюдаемые факторы. Ниже представлены выбранные факторы в зависимости от их групповой принадлежности.

Входные факторы:

– возмущающие факторы:

X1 – температура в помещении; X2 – влажность в помещении; X3 – исходное качество сырья;

– управляющие факторы:

X4 – частота вращения месильного органа тестомесильной машины; X5 – объем воды на замес теста; X6 – температура воды для замеса теста; X7 – количество хлебопекарных улучшителей.

Выходные факторы:

– управляемые факторы:

X8 – время замеса теста в тестомесильной машине; X9 – эффективная вязкость теста; X10 – удельная работа замеса в тестомесильной машине; XII – влажность теста.

– наблюдаемые факторы:

X12 – температура добавляемых компонентов; X13 – температура теста; X14 – «сила» теста; X15 – крутящий момент на валу месильного органа тестомесильной машины.

Таблица 1.

Результаты экспертного опроса

Table 1.

Expert survey results

Фактор Factor	Эксперт Expert					Сумма рангов S_i The sum of the S_i ranks	Отклонение $S_i - L$ Deviation $S_i - L$	Квадрат отклонений ($S_i - L$) ² The square of the deviations ($S_i - L$) ²	Среднее значение сумм рангов a_i The average value of the rank sums a_i	Ранг Rank
	1	2	3	4	5					
X1	13	11	10	11	10	55	15,0	225,0	11,0	10
X2	10	12	13	10	11	56	16,0	256,0	11,2	11
X3	15	14	15	13	15	72	32,0	1024,0	14,4	15
X4	6	7	6	5	7	31	9,0	81,0	6,2	7
X5	8	8	7	7	8	38	20,	4,0	7,6	8
X6	7	5	9	4	4	29	11,0	121,0	5,8	5
X7	2	3	1	2	3	11	29,0	841,0	2,2	2
X8	1	1	2	1	1	6	34,0	1156,0	1,2	1
X9	11	15	12	12	12	62	22,0	484,0	12,4	13
X10	14	13	14	15	14	70	30,0	900,0	14,0	14
XII	4	2	3	3	8	14	26,0	676,0	2,8	3
X12	5	6	5	8	6	30	10,0	100,0	6,0	6
X13	3	4	4	6	5	22	18,0	324,0	4,4	4
X14	9	9	8	9	9	44	4,0	16,0	8,8	9
X15	12	10	11	14	13	60	20,0	400,0	12,0	12
Сумма Amount								6608,0		

Обсуждение

По результатам экспертных оценок была получена база данных. На основе которой рассчитан коэффициент конкордации W для оценки степени согласованности мнений приглашенных экспертов.

$$W = \frac{12S}{M^2(N^3 - N)}, \quad (1)$$

где S – сумма квадратов отклонений; N – количество экспертов, M – количество факторов.

$$W = 2 \cdot 660815^2 = 2,9.$$

При определении коэффициента конкордации было получено следующее значение $W = 2,9$.

В связи с тем, что число участвовавших в исследовании экспертов было меньше минимально требуемого для чистоты исследования, т. е. $N < 7$, то возникает потребность проверки полученного коэффициента конкордации на значимость с использованием критерия Фишера [18]. В результате расчетов было получено значение критерия равное 4,31 ($F_r = 4,31$), на основании чего можно сделать вывод о том, что условия проведения исследования удовлетворительные и не вызывает сомнений в единстве мнений участвовавших в процессе экспертов, а также интерпретация их мнений проведена правильно.

Для наглядного отображения ранжирования мнений экспертов представлена гистограмма на рисунке 2.

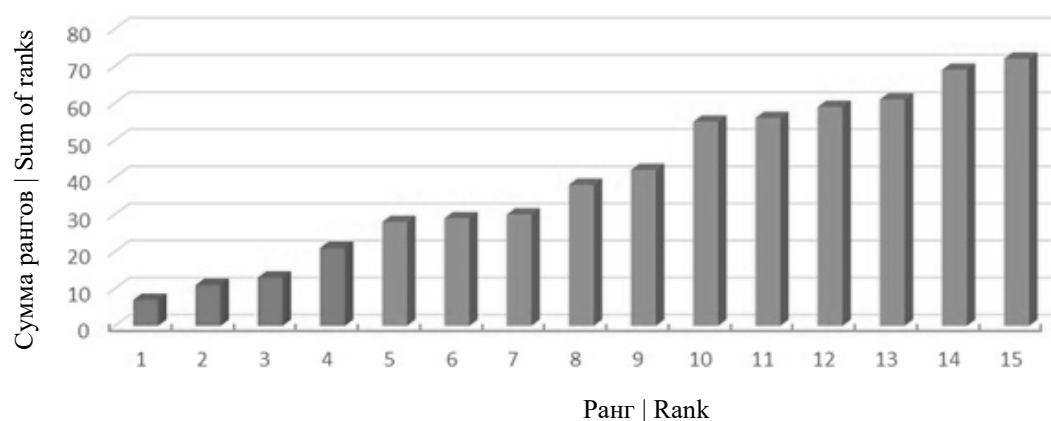


Рисунок 2. Диаграмма рангов

Figure 2. Rank diagram

Для более удобной интерпретации представленных на гистограмме результатов для каждой суммы рангов был присвоен порядковый номер таким образом, чтобы эта нумерация осуществлялась по возрастанию значимости. В результате получим следующее, чем выше сумма ранга, тем более существенное влияние оказывает данный фактор на технологический процесс замеса теста. Анализ представленной на рисунке 2 гистограммы рангов показывает, что все рассмотренные факторы можно условно разделить на четыре группы, положив за основу разделения фактор влияния на технологический процесс замеса теста. В первую группу, как оказывающие несущественное влияние, можно отнести факторы с 1 по 4; во вторую группу можно отнести факторы 5–9; в третью – с 10 по 13 и в четвертую – с 14 по 15.

Закключение

Было проведено научно-техническое прогнозирование, с целью анализа целесообразности модернизации конструкции тестомесильной

машины. При этом была сформирована модель «черного ящика» стадии замеса теста. Исследование факторов, оказывающих влияние на операцию замеса теста, было выполнено с применением четырех различных параметров, среди которых были выделены как входные, так и выходные параметры, разделенные на управляющие, управляемые, возмущаемые и наблюдаемые, а сам технологический процесс замеса теста выполнялся в тестомесительной машине

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в технологическом процессе производства хлеба из пшеничной муки наиболее значимыми факторами в процессе замеса теста являются: влажность и температура теста, частота вращения месильного органа тестомесильной машины, объем воды для замеса. Помимо этого, модернизация оборудования тестомесильной машины представляется довольно перспективным направлением для повышения эффективности технологического процесса замеса теста.

Литература

- 1 Бакирова Р.Р., Сагадеева Э.Ф., Скорнякова В.О. Внешние риски предпринимательской деятельности хлебопекарной промышленности // Региональные проблемы преобразования экономики. 2022. № 1. С. 52–59.
- 2 Горький А.С. Система оценки и прогнозирования перспектив развития региональных промышленных систем с учетом инновационно-технологического фактора // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2023. № 3. С. 165–180. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-otsenki-i-prognozirovaniya-perspektiv-razvitiya-regionalnyh-promyshlennyh-sistem-s-uchetom-innovatsionno-tehnologicheskogo>
- 3 Базров Б.М. Обеспечение технологичности конструкций изделий // Научные технологии в машиностроении. 2020. Т. 8. № 110. С. 18–22. doi: 10.30987/2223-4608-2020-8-18-22
- 4 Лешкевич Т.Г. Метафоры цифровой эры и black box problem // Философия науки и техники. 2022. Т. 27. № 1. С. 34–48. doi: 10.21146/2413-9084-2022-27-1-34-48
- 5 Bochkaryov P.Yu., Korolev R.D., Bokova L.G. Comprehensive Assessment of the Manufacturability of Products // Advanced Engineering Research. 2023. V. 23. № 2. P. 155–168. doi: 10.23947/2687-1653-2023-23-2-155-168
- 6 Чернецов А.Н. Методы технологического прогнозирования // Вестник науки. 2019. Т. 1. № 6 (15). С. 10–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-tehnologicheskogo-prognozirovaniya>
- 7 Овинников В.А. Роль инноваций и инновационных технологий в модернизации российских промышленных предприятий // Экономика и управление инновациями. 2021. № 4. С. 72–79.

8 Неверов Е.Н., Иванов С.А., Петрова О.В. и др. Исследование процесса применения диоксида углерода при таблетировании инстантированных продуктов и сухих смесей растительных компонентов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2024. № 7 (208). С. 229–242.

9 Горбачёв А.С., Дроговоз П.А. Прогнозирование как инструмент опережающего развития технологических компетенций в промышленности // Корпоративная экономика. 2020. № 12. С. 45–52. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognostirovanie-kak-instrument-operezhayushchego-razvitiya-tehnologicheskikh-kompetentsiy-v-promyshlennosti>

10 Качанова Л.С., Бондаренко А.М., Барышников А.В. Экономико-технологические аспекты рециклинга органических отходов в обеспечении финансовой устойчивости предприятий аграрного сектора // Стратегическое планирование и прогнозирование в АПК как инструмент достижения целей национального развития России, 2021. С. 83–87.

11 Серяков Г.Н. Методологические аспекты организации строительства в условиях инновационного развития экономики // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей II Международной научной конференции (Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.) / Под ред. Л.М. Парфеновой. Новополоцк: Полоцкий государственный университет, 2020. С. 445–452.

12 Wagner L.P., Reinhold L.M., Kilthau M., Fay A. A systematic review of modeling approaches for flexible energy resources // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. V. 184. P. 113541. doi: 10.1016/j.rser.2023.113541

13 Melgaard S.P., Jørgensen R.B., Li H. et al. Fault detection and diagnosis encyclopedia for building systems: a systematic review // Energies. 2022. V. 15. № 12. P. 4366.

14 Habash R. Sustainability and health in intelligent buildings. Cambridge: Woodhead Publishing, 2022. 350 p. doi: 10.1016/B978-0-323-98826-1.00006-5

15 Hassija V., Chamola V., Mahapatra A. et al. Interpreting Black-Box Models: A Review on Explainable Artificial Intelligence // Cognitive Computation. 2024. V. 16. P. 45–74. doi: 10.1007/s12559-023-10179-8

16 Мелешкина Е.П., Коломиец С.Н., Жильцова Н.С. и др. Современная оценка хлебопекарных свойств российской пшеницы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 1. С. 155–162. doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-155-162

17 Mickiewicz B., Britchenko I. Main trends and development forecast of bread and bakery products market // VUZF Review. 2022. V. 7. № 3. P. 113–123.

18 Lutska N., Kostiuk T., Hrabovska T. et al. Monitoring and Forecasting Quality Indicators of Predough Production in the Bakery Industry // 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): Proceedings. Kharkiv: IEEE, 2024. P. 1–6.

19 Aghababaei A., Taheri-Garavand A., Shahbazi F. et al. Artificial Intelligence in Agro-Food Systems: From Farm to Fork // Foods. 2025. V. 14. № 3. P. 411.

20 Ojo O., Adeleke O., Igbokwe U. et al. Development of dough kneading machine for small and medium-sized enterprises // Journal of Applied Research in Technology & Engineering. 2024. V. 5. № 1. P. 23–31.

References

1 Bakirova R.R., Sagadeeva E.F., Skornyakova V.O. External risks of entrepreneurial activity of the bakery industry. Regional Problems of Economic Transformation. 2022. no. 1. pp. 52–59. (in Russian)

2 Gorky A.S. A system for assessing and forecasting the prospects for the development of regional industrial systems, taking into account the innovation and technological factor. Bulletin of the Samara University. Economics and Management. 2023. no. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-otsenki-i-prognostirovaniya-perspektiv-razvitiya-regionalnyh-promyshlennyh-sistem-s-uchetom-innovatsionno-tehnologicheskogo> (in Russian)

3 Bazrov B.M. Ensuring the manufacturability of product designs. High-tech Technologies in Mechanical Engineering. 2020. vol. 8. no. 110. pp. 18–22. doi: 10.30987/2223-4608-2020-8-18-22 (in Russian)

4 Leshkevich T.G. Metaphors of the digital age and the black box problem. Philosophy of Science and Technology. 2022. no. 1. pp. 34–48. doi: 10.21146/2413-9084-2022-27-1-34-48 (in Russian)

5 Bochkaryov P.Yu., Korolev R.D., Bokova L.G. Comprehensive Assessment of the Manufacturability of Products. Advanced Engineering Research. 2023. vol. 23. no. 2. pp. 155–168. doi: 10.23947/2687-1653-2023-23-2-155-168

6 Chernetsov A.N. Methods of technological forecasting. Science Herald. 2019. vol. 1. no. 6 (15). pp. 10–18. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-tehnologicheskogo-prognostirovaniya> (in Russian)

7 Ovinnikov V.A. The role of innovations and innovative technologies in the modernization of Russian industrial enterprises. Economics and Management of Innovations. 2021. no. 4. pp. 72–79. (in Russian)

8 Neverov E.N., Ivanov S.A., Petrova O.V. et al. Study of the process of using carbon dioxide in the tableting of instant products and dry mixtures of plant components. Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2024. no. 7 (208). pp. 229–242. (in Russian)

9 Gorbachev A.S., Drogovoz P.A. Forecasting as a tool for advanced development of technological competencies in industry. Corporate Economics. 2020. no. 12. pp. 45–52. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognostirovanie-kak-instrument-operezhayushchego-razvitiya-tehnologicheskikh-kompetentsiy-v-promyshlennosti> (in Russian)

10 Качанова Л.С., Бондаренко А.М., Барышников А.В. Economic and technological aspects of recycling organic waste in ensuring the financial sustainability of agricultural sector enterprises. Strategic planning and forecasting in the agro-industrial complex as a tool for achieving the goals of Russia's national development, 2021. pp. 83–87. (in Russian)

11 Seryakov G.N. Methodological aspects of organizing construction in the conditions of innovative economic development. Architectural and Construction Complex: Problems, Prospects, Innovations: electronic collection of articles of the II International Scientific Conference (Novopolotsk, November 28–29, 2019). Ed. by L.M. Parfenova. Novopolotsk: Polotsk State University, 2020. pp. 445–452. (in Russian)

- 12 Wagner L.P., Reinbold L.M., Kilthau M., Fay A. A systematic review of modeling approaches for flexible energy resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. vol. 184. p. 113541. doi: 10.1016/j.rser.2023.113541
- 13 Melgaard S.P., Jørgensen R.B., Li H. et al. Fault detection and diagnosis encyclopedia for building systems: a systematic review. *Energies*. 2022. vol. 15. no. 12. p. 4366. doi: 10.3390/en15124366
- 14 Habash R. Sustainability and health in intelligent buildings. Cambridge: Woodhead Publishing, 2022. 350 p. doi: 10.1016/B978-0-323-98826-1.00006-5
- 15 Hassija V., Chamola V., Mahapatra A. et al. Interpreting Black-Box Models: A Review on Explainable Artificial Intelligence. *Cognitive Computation*. 2024. vol. 16. pp. 45–74. doi: 10.1007/s12559-023-10179-8
- 16 Meleshkina E.P., Kolomiets S.N., Zhiltsova N.S. et al. Modern assessment of baking properties of Russian wheat. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 155–162. doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-155-162 (in Russian)
- 17 Mickiewicz B., Britchenko I. Main trends and development forecast of bread and bakery products market. *VUZF Review*. 2022. vol. 7. no. 3. pp. 113–123. doi: 10.38188/2534-9228.22.3.09
- 18 Lutska N., Kostyuk T., Hrabovska T. et al. Monitoring and Forecasting Quality Indicators of Predough Production in the Bakery Industry. 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): Proceedings. Kharkiv: IEEE, 2024. pp. 1–6. doi: 10.1109/KhPIWeek63049.2024.10696117
- 19 Aghababaei A., Taheri-Garavand A., Shahbazi F. et al. Artificial Intelligence in Agro-Food Systems: From Farm to Fork. *Foods*. 2025. vol. 14. no. 3. p. 411. doi: 10.3390/foods14030411
- 20 Ojo O., Adeleke O., Igboke U. et al. Development of dough kneading machine for small and medium-sized enterprises. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*. 2024. vol. 5. no. 1. pp. 23–31. doi: 10.4995/jarte.2024.21271

Сведения об авторах

Денис В. Доня к.т.н., доцент, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Тимирязевская ул., 49, г. Москва, 127434, Россия, doniadv@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5818-0804>

Вклад авторов

Денис В. Доня написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Denis V. Donya Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technology of storage and processing of livestock products department, Russian State Agrarian University - Moscow, Timiryazevskay St., 49, Moscow, 127434, Russia, doniadv@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5818-0804>

Contribution

Denis V. Donya wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 31/05/2025	После редакции 18/06/2025	Принята в печать 20/07/2025
Received 31/05/2025	Accepted in revised 18/06/2025	Accepted 20/07/2025

Разработка белкового продукта для спортивного питания

Дмитрий М. Фиалков	1	dm.fialkov@omgau.org	 0000-0002-4834-6161
Наталья В. Авдеева	2	nv.avdeeva18z03@omgau.org	
Владимир В. Пойманов	3	v-poymanov@yandex.ru	 0000-0001-7274-3557
Константин К. Полянский	3,4	mto.vrn@mail.ru	 0000-0002-8817-1466
Анна А. Дерканосова	3	aa-derk@ya.ru	 0000-0002-9726-9262

1 Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Институтская площадь 1, г. Омск, 644008, Россия

2 ООО «КР-Тех», ул. Цесиса 11, г. Воскресенск, 140209, 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, ул. Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030 Россия

Аннотация. Наблюдается значительный рост интереса к здоровому образу жизни и правильному питанию, растет спрос на продукты, способствующие улучшению физической формы и восстановлению после нагрузок. Творожные продукты, в свою очередь, являются важной частью рациона многих спортсменов благодаря высокому содержанию белка, кальция и других необходимых микроэлементов. Молочные продукты, наиболее полно отвечающие принципам сбалансированного питания, целесообразно сочетать с растительными продуктами. Масло облепихи, получаемое из плодов этого растения, обладает множеством полезных свойств, включая противовоспалительное, антиоксидантное и восстанавливающее действие. Эти характеристики делают его идеальным компонентом для обогащения продуктов спортивного питания, так как они могут способствовать улучшению здоровья, повышению выносливости и ускорению восстановления после физических нагрузок. Одним из требований к новым продуктам является их легкая адаптация к условиям действующих предприятий, возможность использования существующего оборудования, отсутствие в их технологии специфических не свойственных устоявшемуся производству операций. Цель работы заключается в разработке рецептуры и технологии белкового продукта спортивного питания. Объектами исследования были молоко обезжиренное, глубокомороженная концентрированная заквасочная культура GESKA-STAR G 700.7, закваска сухая из лиофилизированной пробиотической культуры AiBi серии B 6.10, биологически активная добавка к пище «Облепиховое масло Алтай «Элитное» 180 мг%» от бренда Vitateka, качественные показатели промежуточных и готовых продуктов. При проведении работы использовались стандартные методы исследований, предусмотренные нормативными документами. Результатом работы служит экспериментальное обоснование оптимальной рецептуры продукта. Установлено, что наиболее рационально получать продукт посредством смешивания обезжиренного творога с другими компонентами при температуре 65 °С. В результате работы получен продукт с достаточным сроком хранения, предназначенный для спортсменов, подвергающихся высоким силовым нагрузкам.

Ключевые слова: спортивное питание, обезжиренный творог, облепиховое масло, рецептура, физико-химические показатели, срок хранения, пищевая ценность.

Development of a protein product for sports nutrition

Dmitriy M. Fialkov	1	dm.fialkov@omgau.org	 0000-0002-4834-6161
Natalia V. Avdeeva	2	nv.avdeeva18z03@omgau.org	
Vladimir V. Poymanov	3	v-poymanov@yandex.ru	 0000-0001-7274-3557
Konstantin K. Polyansky	3,4	mto.vrn@mail.ru	 0000-0002-8817-1466
Anna A. Derkanosova	3	aa-derk@ya.ru	 0000-0002-9726-9262

1 Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Sq., 1, Omsk, 644008, Russia

2 KR-Tech LLC, Cesisa St., 11, Voskresensk, 140209, 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 St., 67A, Voronezh, 394030, Russia

Abstract. There is a significant increase in interest in a healthy lifestyle and proper nutrition, and there is a growing demand for products that help improve physical fitness and recovery from stress. Cottage cheese products, in turn, are an important part of the diet of many athletes due to the high content of protein, calcium and other essential trace elements. Dairy products, which most fully comply with the principles of a balanced diet, should be combined with vegetable products. Sea buckthorn oil, obtained from the fruits of this plant, has many beneficial properties, including anti-inflammatory, antioxidant and regenerating effects. These characteristics make it an ideal product for fortifying sports nutrition products, as they can help improve health, increase endurance, and accelerate recovery from physical exertion. One of the requirements for new products is their easy adaptation to the conditions of existing enterprises, the ability to use existing equipment, and the absence of specific operations in their technology that are not typical of established production. The purpose of the work was to develop the formulation and technology of a protein sports nutrition product. The objects of the study were skimmed milk, deep-frozen concentrated starter culture GESKA-STAR G 700.7, dry starter culture from freeze-dried probiotic culture AiBi series B 6.10, biologically active food additive Sea Buckthorn oil Altai Elite 180 mg% from the Vitateka brand, qualitative indicators of intermediate and finished products. During the work, standard research methods and research methods provided for in regulatory documents were used. The result of the work is an experimental substantiation of the optimal formulation of the product. It has been found that it is most rational to obtain the product by mixing low-fat cottage cheese with other components at a temperature of 65 °C. As a result of the work, a product with a sufficient shelf life was obtained, intended for athletes subjected to high power loads.

Keywords: sports nutrition, low-fat cottage cheese, sea buckthorn oil, formulation, physico-chemical parameters, shelf life, nutritional value.

Для цитирования

Фиалков Д.М., Авдеева Н.В., Пойманов В.В., Полянский К.К., Дерканосова А.А. Разработка белкового продукта для спортивного питания // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 36–42. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-36-42

For citation

Fialkov D.M., Avdeeva N.V., Poymanov V.V., Polyansky K.K., Derkanosova A.A. Development of a protein product for sports nutrition. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 36–42. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-36-42

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

Введение

В настоящий момент наблюдается значительный рост интереса к здоровому образу жизни и правильному питанию, что, в свою очередь, приводит к увеличению спроса на продукты, способствующие улучшению физической формы и восстановлению после нагрузок. Спортивное питание, как важный сегмент данной области, требует особого внимания к составу и качеству продуктов, которые употребляют спортсмены и активные люди. продукты, которые не просто утоляют голод, но и поддерживают организм в период интенсивных нагрузок и способствуют восстановлению.

Согласно ГОСТ 34006–2016 «Продукция пищевая специализированная. Продукция пищевая для питания спортсменов. Термины и определения», спортивное питание – это: специализированная пищевая продукция заданного химического состава, повышенной пищевой ценности и (или) направленной эффективности, которая оказывает специфическое влияние на повышение адаптивных возможностей человека к физическим и нервно-эмоциональным нагрузкам.

Спортивное питание должно содержать ориентировочно белки от 15 до 50 г на 100 г продукта; жиры 0,5–9 г (в зависимости от типа: обезжиренный, классический, жирный); углеводы 2–15 г (может быть выше в углеводно-белковых смесях). Энергетическая ценность продукта должна составлять 80–250 ккал на 100 г [9].

С этой точки зрения молочные продукты, наиболее полно отвечающие принципам сбалансированного питания, целесообразно сочетать с растительными продуктами. Это позволяет получать неограниченный ассортимент продуктов, сбалансированных по содержанию белка и минеральных веществ, содержащих в необходимом количестве незаменимые аминокислоты, полиненасыщенные жирные кислоты, пищевые волокна, витамины и антиоксиданты. Очевидно, что питание, предназначенное для спортсменов, должно содержать в своем составе пробиотические микроорганизмы, то есть те, которые являются неотъемлемой составляющей кишечника здорового человека [1–3]. К настоящему времени разработано и внедрено в производство значительное количество различных заквасок для кисломолочных продуктов, как правило, на основе лактобактерий и бифидобактерий. Творожные продукты, в свою очередь, являются важной частью рациона многих спортсменов благодаря высокому содержанию белка, кальция и других необходимых микроэлементов. В этом контексте разработка новых, функциональных продуктов, таких как творожный продукт с добавлением масла облепихи, становится особенно актуальной. Облепиха, как растение, известна своими уникальными питательными

свойствами и высоким содержанием витаминов, минералов и антиоксидантов. Масло облепихи, получаемое из плодов этого растения, обладает множеством полезных свойств, включая противовоспалительное, антиоксидантное и восстанавливающее действие [7]. Эти характеристики делают его идеальным компонентом для обогащения продуктов спортивного питания, так как они могут способствовать улучшению здоровья, повышению выносливости и ускорению восстановления после физических нагрузок. Масло облепихи представляет собой один из наиболее значительных источников полезных биоактивных веществ. Выделяемое из ягод облепихи, оно содержит уникальный набор полиненасыщенных жирных кислот, таких как омега-3, омега-6, омега-7 и омега-9, что обуславливает его высокую биологическую ценность. В дополнение к жирным кислотам облепиховое масло богато каротиноидами, токоферолами, витаминами и другими биоактивными веществами, которые оказывают целебное воздействие. Это сочетание веществ не только повышает иммунные функции, но и обладает выраженной кардиопротекторной активностью, способствуя улучшению состояния сердечно-сосудистой системы [7, 8].

Одним из требований к таким продуктам является их легкая адаптация к условиям действующих предприятий, возможность использования существующего оборудования, отсутствие в их технологии специфических не свойственных устоявшемуся производству операций. Это позволит кроме всего прочего расширить ассортимент продукции, повысить спрос на продукцию и конкурентоспособность предприятия в целом

Цель работы – разработка рецептуры и технологии белкового продукта спортивного питания для производства на предприятиях молочной отрасли.

Материалы и методы

Исследования выполнялись на кафедре «Продуктов питания и пищевой биотехнологии» ФБГОУ ВО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина» и на ООО «КР-Тех».

Для реализации цели исследования использовались следующие объекты:

– молоко, принимаемое в соответствии с требованиями ГОСТ 31449–2013 «Молоко коровье сырое. Технические условия» [4];

– обезжиренное молоко по ГОСТ 31658–2012 «Молоко обезжиренное – сырье. Технические условия» [5];

– глюкозамороженная концентрированная заквасочная культура GESKA-STAR G 700.7 по ГОСТ 34372–2017 «Закваски бактериальные для производства молочной продукции» [6];

– закваска сухая из лиофилизированной пробиотической культуры AiBi серии В 6.10 по ГОСТ 34372–2017 «Закваски бактериальные для производства молочной продукции»;

– масло сливочное в соответствии с требованиями ГОСТ 32261 «Масло сливочное. Технические условия».

– биологически активная добавка к пище «Облепиховое масло Алтай «Элитное» 180 мг%» от бренда Vitateka (производитель ООО «Грин Сайд», Россия).

Кроме молока сырого, химический состав которого контролировался в соответствии с техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 033/2013, в процессе экспериментальных исследований изучались качественные показатели промежуточных и готовых продуктов.

При проведении работы использовались стандартные методы исследований, предусмотренные нормативными документами методы исследований. Определение молочнокислых микроорганизмов проводили по ГОСТ 33951–2016, количество бифидобактерий по ГОСТ 29981–2013

Повторность экспериментов трёх-пятикратная.

Результаты и обсуждение

В соответствии с требованиями продукт должен иметь высокие органолептические показатели (внешний вид и консистенция, вкус), энергетическая ценность продукта должна быть не менее 80 ккал и обеспечиваться за счет углеводов, молочных и растительных белков.

Продукт должен содержать живую микрофлору в количестве не менее 10^6 КОЕ в 1 г продукта.

На основе анализа условий предприятия, сложившейся организации производственных процессов наиболее целесообразным признана выработка продукта внесением рецептурных компонентов в вырабатываемый на предприятии мягкий обезжиренный творог, обогащенный бифидобактериями. Такая схема предопределена наличием на предприятии вакуумного смесителя типа СКВ с функциями механизированной выгрузки, подогрева и миксера. Согласно представлениям о здоровом и эффективном спортивном питании, комбинация мягкого творога, сахара, сливочного масла и масла облепихи создаёт продукт, оптимально подходящий для спортсменов [7].

Мягкий творог служит основой, богатой белком, сахар дополняет энергией, сливочное масло повышает её запас и обогащает витаминами, а масло облепихи укрепляет защитные механизмы организма и предотвращает негативные последствия тренировочных перегрузок.

Для ферментации молочной смеси была выбрана комбинация из заквасок, состав и свойства которых представлены в таблице 1.

После нагревания ингредиентов до температуры выше 67°C творог приобретал песочность, то есть происходила денатурация белков. Испарение лишней влаги способствовало необходимой влажности готового продукта.

Состав экспериментальных вариантов рецептур приведен в таблице 2.

Таблица 1.

Состав и свойства закваски, используемой для ферментации молочной смеси

Table 1.

Composition and properties of the starter culture used for fermentation of the milk mixture

Вид закваски Type of sourdough	Вид микрофлоры Type of microflora	Оптимальная температура, $^\circ\text{C}$ Optimum temperature, $^\circ\text{C}$	Предельная титруемая кислотность, $^\circ\text{T}$ Maximum titratable acidity, $^\circ\text{T}$
Концентрированная глубокозамороженная заквасочная культура Concentrated deep-frozen starter culture CESKA-STAR «G 700.7»	<i>Lactococcus lactis subsp. lactis</i> ; <i>Lactococcus lactis subsp. cremoris</i> ,	28–34	130
Лиофилизированная концентрированная пробиотическая культура AiBi серии 6.10 Lyophilized concentrated probiotic culture AiBi series 6.10	<i>Bifidobacterium sp.</i>	30–37	130

Таблица 2.

Рецептуры экспериментальных вариантов исследований

Table 2.

Formulations of experimental research options

Ингредиент, кг Ingredient, kg	Образец Sample			
	1	2	3	4
Творог нежирный Low-fat cottage cheese	0,75	0,7	0,8	0,79
Масло сливочное Butter	0,1	0,15	0,1	0,13
Сахар Sugar	0,1	0,1	0,05	0,06
Масло облепиховое Sea buckthorn oil	0,05	0,05	0,05	0,06
Итого Total	1	1	1	1

Смешивания ингредиентов эмульгирование жиров, растворение сахара, гомогенизация смеси проводились в вакуумном смесителе типа СКВ (рисунок 1).



Рисунок 1. Вакуумный смеситель СКВ
Figure 1. Vacuum mixer SKV

Данный аппарат позволяет совмещать приготовление смеси с ее термообработкой. Обработку образцов проводили при температурах 65; 67; 70 и 72 °С в течение 5; 15; 30 и 45 мин. Образцы продукта с температурой выше 65 °С приобретали песчанистость, происходило излишнее испарение влаги, что способствовало сухости готового продукта. Обработка образцов в течение 5 и 15 мин признана недостаточной. В образцах наблюдался «непромес», неравномерное распределение жировых компонентов. Учитывая вышеизложенное, в дальнейшем обработку продукта вели при 65 °С в течение 30 мин. В экспериментальных образцах определяли органолептические и физико – химические показатели. Полученные данные представлены в таблице 3.

Образец № 4 оказался наиболее предпочтительным благодаря нескольким ключевым характеристикам, выгодно отличающим его от остальных образцов. Он имел мажущуюся, воздушную и однородную консистенцию. Эта структура обеспечивает приятный вкус и легкость употребления. Воздушность делает продукт более легким и мягким, облегчая его прием, особенно

после интенсивных тренировок, когда важна комфортность потребления пищи. Вкус характеризуется выраженностью кисломолочных нот и ярко выраженным вкусом растительного компонента (масла облепихи). Приятный аромат стимулирует аппетит и положительно влияет на восприятие продукта потребителем. Цвет, ассоциируется с качеством и свежестью натурального продукта, подчеркивая полезность изделия.

Таблица 3.
Органолептические показатели
экспериментальных образцов

Table 3. Organoleptic properties of experimental samples	
Образец Sample	Описание Description
1	Вкус и запах кисломолочные, с привкусом масла облепихового Цвет коричнево-оранжевый, равномерный по всей массе. Консистенция однородная с мелкими крупинками белка. Присутствует небольшое количество жидкости.
2	Консистенция мягкая, однородная по всей массе, частично присутствуют твёрдые крупинки белка Вкус и запах кисломолочные, выраженный привкус облепихового масла. Цвет коричнево – оранжевый с крупинками, обусловленный цветом растительного наполнителя.
3	Консистенция мягкая, нежная, однородная по всей массе. Вкус и запах кисломолочные, с умеренно выраженным привкусом растительного компонента. Цвет коричнево-оранжевый, обусловленный цветом растительного наполнителя.
4	Консистенция мажущаяся, воздушная, однородная по всей массе. Вкус и запах кисломолочные, выраженный вкус растительного компонента. Цвет коричнево-оранжевый, обусловленный цветом растительного наполнителя.

Немаловажную роль в обеспечении качества пищевых изделий играет также стабильность характеристик продукта в течение всего периода его хранения.

Таблица 4.
Микробиологические показатели белкового продукта для спортивного питания в процессе хранения
Table 4.

Показатель Indicator	Значение показателя Indicator value					
	Продолжительность хранения, сут Storage period, days					
	0	4	8	12	16	18
Количество молочнокислых микроорганизмов, КОЕ/см³, не менее Number of lactic acid microorganisms, CFU/cm³, not less than	6,7×10 ⁸	4,3×10 ⁸	3,1×10 ⁸	2,5×10 ⁷	1,8×10 ⁷	1,0×10 ⁶
Бифидобактерии, КОЕ/см³, не менее Bifidobacteria, CFU/cm³, not less than	3,4×10 ⁸	3,2×10 ⁸	2,0×10 ⁸	1,2×10 ⁷	1,0×10 ⁷	1,0×10 ⁶
Дрожжи, КОЕ/см³ Yeast, CFU/cm³	менее 15	менее 15	15	30	30	35
Плесени, КОЕ/см³ Mold, CFU/cm³	менее 15	менее 15	20	40	40	40

В таблице представлено изменение кислотности продукта в процессе хранения.

Таблица 5.
Изменение титруемой кислотности готового продукта в процессе хранения

Table 5.
Change in titratable acidity of the finished product during storage

Продолжительность хранения, сут. Shelf life, days	Титруемая кислотность, °Т Titratable acidity, °Т
0	80,0 ± 0,5
4	93,3 ± 0,5
8	102,0 ± 0,5
12	111,0 ± 0,5
16	125,0 ± 0,5
18	148,0 ± 0,5

В течение всего срока хранения продукт имел мажущуюся, воздушную консистенцию, однородную по всей массе.

Вкус и запах кисломолочные, выраженный вкус растительного компонента. Цвет коричнево-оранжевый, обусловленный цветом растительного наполнителя. На 18 сутки во вкусе продукта отмечалась излишняя кислота.

Учитывая коэффициент резерва и данные по микробиологическому, физико-химическому и органолептическому контролю творожного продукта для спортивного питания был установлен гарантированный срок годности – 14–16 суток.

Энергетическая ценность – одна из наиболее главных характеристик продуктов питания, определяющая их пищевую ценность. Полученный продукт содержит 16,6% жира, 13,5% белка и 8,2% углеводов. Энергетическая ценность продукта составляет 976,7 кДж.

Заключение

В работе показана целесообразность получения продуктов для спортивного питания на основе обезжиренного творога и облепихового масла. Разработана рецептура продукта. Установлено, что наиболее рационально получать продукт посредством смешивания обезжиренного творога с другими компонентами при температуре 65 °С. В результате работы получен продукт с достаточным сроком хранения, предназначенный для спортсменов, подвергающихся высоким силовым нагрузкам [10].

Литература

- 1 Хазагаева С.Н., Замбалова Н.А., Качанина Л.М. и др. Бифидогенные свойства облепихового масла // Дальневосточный аграрный вестник. 2023. № 2. С. 95–102. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bifidogennyye-svoystva-oblepihovogo-masla> (дата обращения: 05.04.2025).
- 2 Фиалков Д.М., Шовк А.А. Молочные продукты функционального назначения и перспективы их использования в спортивном питании // Состояние и перспективы развития наилучших доступных технологий специализированных продуктов питания: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Омск, 30 мая 2019 г.). Омск: ФГБОУ ВО ОмГАУ, 2019. С. 173–174.
- 3 Гордынец С.М., Иванова А.В., Петров К.Д. и др. Продукция функционального и специализированного назначения: обзор инноваций // Наука и инновации. 2024. № 10. С. 19–24.
- 4 Ларионов Г.А., Ефимов А.В., Жуков А.А. Определение микробиологической безопасности молока и молочных продуктов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2022. № 5 (182). С. 142–147.
- 5 Радаева И.А., Семенова О.Г., Новикова Т.В. и др. Формирование технологических свойств сухого молока // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2020. Т. 23. № 3. С. 280–290.
- 6 Уткина О.С., Виссарионова Е.Ю. Технология производства и оценка качества кефира, обогащенного пропионовокислыми бактериями // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 3. С. 38–44.
- 7 Фомичёва Т.И. Облепиховое масло: использование в качестве биологически активной добавки, оценка содержания полезных компонентов // Научная сессия ГУАП: Гуманитарные науки: сборник статей. СПб.: ГУАП, 2021. С. 199–201.
- 8 Разумовская Е.С. Обзор и перспективы развития рынка продуктов функционального назначения на территории Алтайского края // Вектор экономики. 2021. № 2. С. 26–34.
- 9 Hecht C., Miller T., Johnson R. et al. Nutritional recommendations for the young athlete // Journal of the Pediatric Orthopaedic Society of North America. 2023. V. 5. № 1. P. 599.
- 10 Polko G.M., Idrisov S.U., Aminev F.G. Sports nutrition // Scientific achievements of the third millennium: collection of Scientific Papers based on the results of an XXVI international scientific conference. Las Vegas, 2025. V. 15. P. 31–33.
- 11 Витушкина М.А. Заквасочные культуры для молочной промышленности // Вестник науки. 2021. Т. 4. № 1 (34). С. 207–211.
- 12 Carey C.C., Doyle L., Lucey A. Nutritional priorities, practices and preferences of athletes and active individuals in the context of new product development in the sports nutrition sector // Frontiers in Sports and Active Living. 2023. V. 5. P. 1088979.
- 13 López-Martínez M.I., Miguel M., Garcés-Rimón M. Protein and sport: Alternative sources and strategies for bioactive and sustainable sports nutrition // Frontiers in Nutrition. 2022. V. 9. P. 926043.
- 14 Melnikova E.I., Bogdanova E.V. The development of the sports nutrition drink formula with low allergenic capacity // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 848. № 1. P. 012025.

- 15 Arenas-Jal M., Suñé-Negre J.M., García-Montoya E. et al. Trends in the food and sports nutrition industry: A review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. V. 60. № 14. P. 2405–2421.
- 16 Martínez-Sanz J.M., Norte A., Ortiz-Moncada R. et al. Development of a sport food exchange list for dietetic practice in sport nutrition // *Nutrients*. 2020. V. 12. № 8. P. 2403.
- 17 Zharykbasov Y., Kizatova M., Tultabayeva T. et al. Development and study of the nutritional value and storage stability of a soft cottage cheese product enriched with collagen and antioxidant-rich plant extracts // *Slovak Journal of Food Sciences*. 2024. V. 18. P. 1–15.
- 18 Idangodage I.P., De Siva A.B., Herath H.M. et al. Development and physico-chemical evaluation of an isotonic Nas Narang (Citrus madurensis) sports drink // *Journal of Advanced Food Science and Technology*. 2023. V. 6. P. 75–85.
- 19 Sadeghi T., Marvizeh M.M., Ebrahimi F. et al. Assessment of Nutritional and Antioxidant Activity of Sport Drink Enriched with *Spirulina platensis* // *Journal of Chemical Health Risks*. 2023. V. 13. № 3. P. 451–460. doi: 10.22034/jchr.2022.1953680.1516
- 20 Abdel-Salam F.F., Ibrahim R.M., Ali M.I. Formulation and evaluation of high energy-protein bars as a nutritional supplement for sports athletics // *American Journal of Food Technology*. 2022. V. 10. № 1. P. 53–65. doi: 10.12691/ajfst-10-1-8

References

- 1 Khazagaeva S.N., Zambalova N.A., Kachanina L.M., Khamagaeva I.S. Bifidogenic properties of sea buckthorn oil. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2023. no. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/bifidogennye-svoystva-oblepihovogo-masla> (in Russian)
- 2 Fialkov D.M., Shovk A.A. Functional dairy products and prospects for their use in sports nutrition. State and prospects for the development of the best available technologies for specialized food products: proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation (Omsk, May 30, 2019). Omsk: Omsk State Agrarian University, 2019. pp. 173–174. (in Russian)
- 3 Gordynets S.M., Ivanova A.V., Petrov K.D. et al. Products of functional and specialized purpose: a review of innovations. *Science and Innovations*. 2024. no. 10. pp. 19–24. (in Russian)
- 4 Larionov G.A., Efimov A.V., Zhukov A.A. Determination of microbiological safety of milk and dairy products. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2022. no. 5 (182). pp. 142–147. (in Russian)
- 5 Radaeva I.A., Semenova O.G., Novikova T.V. et al. Formation of technological properties of milk powder. *Bulletin of Murmansk State Technical University*. 2020. vol. 23. no. 3. pp. 280–290. (in Russian)
- 6 Utkina O.S., Vissarionova E.Yu. Production technology and quality assessment of kefir enriched with propionic acid bacteria. *Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2020. no. 3. pp. 38–44. (in Russian)
- 7 Fomicheva T.I. Sea buckthorn oil: use as a biologically active additive, assessment of the content of useful components. *Scientific session of GUAP: Humanitarian sciences: collection of articles*. St. Petersburg: GUAP, 2021. pp. 199–201. (in Russian)
- 8 Razumovskaya E.S. Review and prospects for the development of the functional food market in the Altai Territory. *Vector of Economics*. 2021. no. 2. pp. 26–34. (in Russian)
- 9 Hecht C., Miller T., Johnson R. et al. Nutritional recommendations for the young athlete. *Journal of the Pediatric Orthopaedic Society of North America*. 2023. vol. 5. no. 1. p. 599.
- 10 Polko G.M., Idrisov S.U., Aminev F.G. Sports nutrition. Scientific achievements of the third millennium: collection of Scientific Papers based on the results of an XXVI international scientific conference. Las Vegas, 2025. vol. 15. pp. 31–33.
- 11 Vitushkina M.A. Starter cultures for the dairy industry. *Science Herald*. 2021. vol. 4. no. 1 (34). pp. 207–211. (in Russian)
- 12 Carey C.C., Doyle L., Lucey A. Nutritional priorities, practices and preferences of athletes and active individuals in the context of new product development in the sports nutrition sector. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2023. vol. 5. p. 1088979. doi: 10.3389/fspor.2023.1088979
- 13 López-Martínez M.I., Miguel M., Garcés-Rimón M. Protein and sport: Alternative sources and strategies for bioactive and sustainable sports nutrition. *Frontiers in Nutrition*. 2022. vol. 9. p. 926043. doi: 10.3389/fnut.2022.926043
- 14 Melnikova E.I., Bogdanova E.V. The development of the sports nutrition drink formula with low allergenic capacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. vol. 848. no. 1. p. 012025. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012025
- 15 Arenas-Jal M., Suñé-Negre J.M., García-Montoya E. et al. Trends in the food and sports nutrition industry: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. vol. 60. no. 14. pp. 2405–2421. doi: 10.1080/10408398.2019.1643286
- 16 Martínez-Sanz J.M., Norte A., Ortiz-Moncada R. et al. Development of a sport food exchange list for dietetic practice in sport nutrition. *Nutrients*. 2020. vol. 12. no. 8. p. 2403. doi: 10.3390/nu12082403
- 17 Zharykbasov Y., Kizatova M., Tultabayeva T. et al. Development and study of the nutritional value and storage stability of a soft cottage cheese product enriched with collagen and antioxidant-rich plant extracts. *Slovak Journal of Food Sciences*. 2024. vol. 18. pp. 1–15. doi: 10.5219/1872
- 18 Idangodage I.P., De Siva A.B., Herath H.M. et al. Development and physico-chemical evaluation of an isotonic Nas Narang (Citrus madurensis) sports drink. *Journal of Advanced Food Science and Technology*. 2023. vol. 6. pp. 75–85. doi: 10.37913/jafst/6.1.2023.75
- 19 Sadeghi T., Marvizeh M.M., Ebrahimi F. et al. Assessment of Nutritional and Antioxidant Activity of Sport Drink Enriched with *Spirulina platensis*. *Journal of Chemical Health Risks*. 2023. vol. 13. no. 3. pp. 451–460. doi: 10.22034/jchr.2022.1953680.1516
- 20 Abdel-Salam F.F., Ibrahim R.M., Ali M.I. Formulation and evaluation of high energy-protein bars as a nutritional supplement for sports athletics. *American Journal of Food Technology*. 2022. vol. 10. no. 1. pp. 53–65. doi: 10.12691/ajfst-10-1-8

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>

Наталья В. Авдеева инженер-технолог, ООО «КР-Тех», ул.Цесиса, 11, г. Воскресенск, 140209, Россия, nv.avdeeva18z03@omgau.org

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, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030 Россия; профессор консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, mto.vrn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

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>

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

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>

Natalia V. Avdeeva engineer, KR-Tech LLC, Cesisa St., 11, Voskresensk, 140209, Russia, nv.avdeeva18z03@omgau.org

Vladimir V. Poymanov Cand. Sci. (Engin), 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>

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; consultant professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, mto.vrn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

Anna A. Derkanosova Dr. Sci.(Engin.), professor, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9726-9262>

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 10/11/2025	После редакции 25/11/2025	Принята в печать 03/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 25/11/2025	Accepted 03/12/2025

Моделирование процесса вакуум-сублимационной сушки высокопористого материала в сверхвысокочастотном поле

Александр С. Белозерцев¹ alex_bel77@mail.ru  0000-0001-9043-9452

Сергей В. Лавров¹ ya-serglavrov@ya.ru  0000-0002-7031-7738

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

Аннотация. В работе представлена комплексная математическая модель тепло- и массообмена для процесса вакуум-сублимационной сушки высокопористого материала в сверхвысокочастотном (СВЧ) поле. Модель разработана с целью адекватного описания интенсивных и нестационарных процессов, характерных для данного способа сушки. В разделе материалов и методов обоснован учет ключевых особенностей процесса: объемного характера сушки и СВЧ-нагрева, изменяющейся пористой структуры материала, наличия трех форм влаги, а также необходимости анализа полей температуры, влагосодержания и давления. Процесс представлен как совокупность взаимосвязанных элементарных процессов. Основным результатом является система дифференциальных уравнений в цилиндрических координатах, описывающая внутренний тепло- и массообмен с учетом теплопроводности, парообразования, фазовых переходов и СВЧ-нагрева. Система дополнена граничными условиями. Для практических расчетов предложены упрощения, например, пренебрежение переносом жидкости после завершения вспучивания. Конкретизированы подмодели для описания сопутствующих процессов. Предложена эвристическая модель вспучивания, связывающая коэффициент расширения материала с минимальной температурой, и выведены формулы для определения переменного радиуса жгута, объемной концентрации сухого вещества и пористости. Разработана модель фазовых переходов (кристаллизация/плавление) на основе локальных условий и введено слагаемое в уравнение теплопроводности. Для моделирования СВЧ-нагрева предложена формула с учетом селективности поглощения энергии разными компонентами материала. Введен способ аналитической оценки коэффициента диэлектрических потерь через объемные доли компонентов. Главным выводом исследования является создание целостного математического аппарата, позволяющего моделировать сложный процесс сушки с учетом взаимного влияния теплофизических, структурных и электродинамических факторов. Модель обеспечивает возможность анализа распределения ключевых параметров (температуры, влажности, давления) в объеме материала на всех стадиях процесса, что является основой для оптимизации технологических режимов.

Ключевые слова: вакуум-сублимационная сушка, математическое моделирование, высокопористый материал, СВЧ-нагрев, тепло- и массообмен, фазовые переходы, пористость.

Modeling of the vacuum-sublimation drying process of a highly porous material in a microwave field

Aleksandr S. Belozertsev¹ alex_bel77@mail.ru  0000-0001-9043-9452

Sergey V. Lavrov¹ ya-serglavrov@ya.ru  0000-0002-7031-7738

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

Abstract. The paper presents a comprehensive mathematical model of heat and mass transfer for the process of vacuum-sublimation drying of a highly porous material in a super-high frequency (microwave) field. The model is developed to adequately describe the intensive and non-stationary processes characteristic of this drying method. The materials and methods section justifies the consideration of key process features: the volumetric nature of drying and microwave heating, the changing porous structure of the material, the presence of three forms of moisture, and the necessity to analyze temperature, moisture content, and pressure fields. The process is presented as a combination of interrelated elementary processes. The main result is a system of differential equations in cylindrical coordinates, describing internal heat and mass transfer, accounting for thermal conductivity, vaporization, phase transitions, and microwave heating. The system is supplemented with boundary conditions. For practical calculations, simplifications are proposed, e.g., neglecting liquid transport after the completion of material swelling. Sub-models for describing accompanying processes are specified. A heuristic model of material swelling is proposed, linking the expansion coefficient to the minimum temperature, and formulas are derived for determining the variable radius of the material strand, the volumetric concentration of dry matter, and porosity. A model of phase transitions (crystallization/melting) based on local conditions is developed, and a corresponding term is introduced into the heat conduction equation. For modeling microwave heating, formula is proposed, accounting for the selective absorption of energy by different material components. A method for the analytical estimation of the dielectric loss coefficient through the volume fractions of components is introduced. The main conclusion of the study is the creation of a holistic mathematical framework that allows for modeling the complex drying process, considering the mutual influence of thermophysical, structural, and electrodynamic factors. The model enables the analysis of the distribution of key parameters (temperature, humidity, pressure) within the material volume at all process stages, forming a basis for optimizing technological regimes.

Keywords: vacuum-sublimation drying, mathematical modeling, highly porous material, microwave heating, heat and mass transfer, phase transitions, porosity.

Для цитирования

Белозерцев А.С., Лавров С.В. Моделирование процесса вакуум-сублимационной сушки высокопористого материала в сверхвысокочастотном поле // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 43–54. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-43-54

For citation

Belozertsev A.S., Lavrov S.V. Modeling of the vacuum-sublimation drying process of a highly porous material in a microwave field. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 43–54. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-43-54

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

Введение

Существенно интенсифицировать процесс вакуум-сублимационного обезвоживания позволяет использование энергии электрических токов сверхвысокой частоты (СВЧ). Характер СВЧ нагрева, как известно, способствует резкой интенсификации процессов тепло- и массообмена, так как прогрев материала происходит по всему объему, при этом градиенты температуры и влажности совпадают по направлению. Однако, если процесс обезвоживания развивается по принципу постепенного углубления зоны сублимации, то при рассматриваемом способе энергоподвода вполне возможен перегрев внутренних слоев сушимого материала.

Материалы и методы

Проанализировав описанный процесс сушки с точки зрения его моделирования, выделим ряд наиболее важных, на наш взгляд, аспектов.

1. Зона парового затвора и вакуумированный объем камеры характеризуются принципиально разными условиями внешнего (по отношению к объекту сушки) тепло- и массообмена.

2. Одной из главных особенностей процесса является наличие у объекта сушки развитой пористой структуры, многократно увеличивающей поверхность парообразования. В связи с этим обезвоживание материала не происходит по «классическому» принципу углубления зоны сублимации, а носит ярко выраженный объемный характер: зоной сублимации в данном случае является сразу весь объем материала, а поверхностью сублимации – вся его пористая структура.

3. В процессах вспучивания (при «пористом замораживании») и обезвоживания материала изменяются его геометрические размеры и пористая структура. При моделировании следует учесть не только переменность соответствующих характеристик (ширина жгута, пористость и др.), но и установить закон их изменения.

4. В процессе сушки материала содержащаяся в нем влага переходит из жидкой фазы в твердую (при испарительном замораживании) и, возможно, обратно (в случае перегрева замороженного материала в поле СВЧ). Находясь в прямой зависимости от парообразования и СВЧ нагрева, процессы кристаллизации и плавления в высокопористом материале также носят сложный объемный характер, что требует при моделировании разработки специального способа их описания.

5. Главными особенностями СВЧ нагрева являются его объемный характер и селективность поглощения электромагнитной энергии различными составляющими влагосодержащих

материалов (сухой скелет материала, жидкость, лед, пар и прочее). Естественно, что по мере изменения в процессе сушки размеров, структуры, температуры и влажности материала, а также агрегатного состояния содержащейся влаги, диэлектрические свойства материала могут существенно меняться.

6. Сложный объемный характер процессов испарения и сублимации обуславливает необходимость анализа поля влагосодержания для всего объема материала. Кроме того, должна быть учтена неоднородность содержащейся в материале влаги. При температурах и давлениях, создаваемых в процессе сублимационной сушки, в материале содержится три вида (формы) влаги – свободная вымороженная, свободная невымороженная и связанная. При этом удаление влаги из материала происходит в указанной последовательности. Неоднородность влаги оказывает существенное влияние на все тепло-массообменные процессы, происходящие в ходе сушки – СВЧ нагрев, парообразование, кристаллизацию-плавление и прочее.

7. Рассматриваемый процесс сушки характеризуется интенсивным тепло- и массообменом. При вводе материала в сублимационную камеру, а также при СВЧ нагреве во всем объеме материала происходит бурное образование пара. Возникающее при этом избыточное давление не успевает мгновенно релаксироваться через пористую структуру материала, вследствие чего внутри последнего появляется значительный градиент давления, оказывающий, в свою очередь, существенное влияние на тепло- и массообменные процессы.

Из выше сказанного следует, что для адекватного описания внутреннего тепло- и массообмена необходим анализ полей всех трех основных потенциалов переноса в капиллярно-пористых телах – температуры, влагосодержания и давления.

8. В ходе анализируемого процесса внутри материала и вне его происходит стремительное изменение температуры, влажности и давления. Таким образом, теплофизические и термодинамические характеристики, зависящие от этих величин, не могут быть приняты постоянными.

9. Для установившегося режима работы сушилки рассматриваемый процесс можно считать квазистационарным. Поступательный и равномерный характер перемещения материала вдоль сублимационной камеры позволяет сделать замену $\tau = z/v$, где z – расстояние, пройденное материалом вдоль камеры; v – скорость перемещения материала. При этом все интересующие нас частные производные по времени изменяются по схеме $\partial/\partial\tau = v\partial/\partial z$.

10. Принимая во внимание, что в ходе сушки имеют место процессы кристаллизации-плавления и СВЧ нагрева, а также объемный характер этих процессов, добавим в уравнение теплопроводности слагаемые $Q_{кр}$ и $Q_{свч}$, обозначающие удельную мощность внутренних источников теплоты, связанных соответственно с кристаллизацией-плавлением и СВЧ нагревом.

11. Учитывая стремительность изменения температуры материала в процессе сушки, добавим в уравнение фильтрационного переноса пары слагаемых, отражающий изменение давления внутри материала при перепаде температур.

12. Приняв во внимание геометрическую форму объекта сушки, будем проводить рассмотрение в цилиндрической системе координат, совместив координатную ось с продольной осью жгута материала. Будем полагать, что анализируемый процесс обладает свойством полной осевой симметрии.

Проведенный анализ показывает, что исследуемый процесс сушки может быть расчленен на различные «элементарные» процессы – перенос теплоты и массы, парообразование (испарение и сублимация), вспучивание с образованием пористой структуры, кристаллизация и плавление, СВЧ нагрев. Этим обстоятельством мы воспользовались как при разработке модели процесса, так и при ее изложении в данной работе, синтезировав общую модель из нескольких подмоделей, каждая из которых описывает тот или иной «элементарный» процесс.

Результаты

Общая формулировка модели тепло- и массообмена. С учетом сделанных замечаний опишем происходящие внутри материала тепло- и массообменные процессы следующей системой уравнений:

$$c\gamma v \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) - r_c j_m K_S + Q_{кр} + Q_{свч}; \quad (1)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(a_{m2} r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(a_{m2} \delta_2 r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{\gamma r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{p2} r \frac{\partial p}{\partial r} \right) - \frac{j_m K_S}{\gamma}; \quad (2)$$

$$c_p \gamma v \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{p1} r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \Pi b_T v \frac{\partial t}{\partial z} + j_m K_S \quad (3)$$

при $0 < r < R$, $0 < z \leq H$,

где r , z – цилиндрические координаты: r – внутренний радиус жгута, м; z – текущая длина жгута, отсчитываемая от точки выхода материала из экструдера, м; R – радиус жгута, м; H – общая длина жгута (высота сублимационной камеры), м; v – скорость движения материала, м/с; t – температура, К; u – удельное влагосодержание, кг влаги/кг сух. вещ.; p – давление водных паров в материале, Па; c – приведенная удельная теплоемкость материала, Дж/(кг сух. вещ.·К); γ – плотность сухого скелета материала (объемная концентрация сухого вещества), кг сух. вещ./м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); r_c – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; $Q_{кр}$ – удельная мощность внутреннего источника теплоты, связанного с процессами кристаллизации и плавления, Вт/м³; $Q_{свч}$ – удельная мощность внутреннего источника теплоты, связанного с СВЧ нагревом, Вт/м³; a_{m2} – коэффициент диффузии жидкости, м²/с; δ_2 – относительный коэффициент термодиффузии жидкости, кг влаги/(кг сух. вещ.·К); λ_{p1} , λ_{p2} – коэффициенты молярного переноса пара и жидкости, кг влаги/(м·с·Па); j_m – локальная интенсивность внутреннего парообразования, кг/(м²·с); K_S – степень развития внутренней поверхности парообразования, м²/м³; c_p – удельная массоемкость материала по отношению к влажному воздуху при его молярном переносе, кг влаги/(кг сух. вещ.·Па); Π – пористость материала; b_T – коэффициент, характеризующий интенсивность расширения пара в порах от нагревания, кг/(м³·К) (для идеального газа $\Pi b_T = c_p \gamma p / t$).

В данной системе уравнение (1) описывает внутренний теплообмен, движущими силами которого в общем случае являются теплопроводность, парообразование, кристаллизация (или плавление) и СВЧ нагрев. Уравнение (2) описывает внутренний массообмен, происходящий за счет молярно-диффузионного переноса жидкости и парообразования. Уравнением (3) определяется изменение общего давления внутри материала при фильтрационном переносе пара, изменении температуры материала и увеличении количества пара за счет испарения или сублимации.

При составлении этих уравнений мы пренебрегли тепло- и влажопроводностью вдоль оси z , исходя из следующих соображений. Во-первых, передача тепла теплопроводностью и молярно-диффузионный перенос влаги вдоль жгута материала осуществляются гораздо медленнее,

чем в поперечном направлении, в силу очевидной анизотропии жгута: поры, образующиеся в процессе испарительного замораживания струями вырывающегося на поверхность пара, располагаются преимущественно в поперечном направлении, что затрудняет продольный перенос тепла и массы. Во-вторых, скорость тепло- и влагопроводности значительно меньше скорости движения материала, т. е. передача состояния вдоль оси z определяется, главным образом, механическим перемещением материала.

Для однозначности решения системы дифференциальных уравнений (1)–(3) дополним ее граничными условиями

$$t|_{z=0} = t_0; \quad u|_{z=0} = u_0; \quad p|_{z=0} = p_0; \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; \quad \left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; \quad \left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; \quad (5)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=R} + \alpha(t|_{r=R} - t_c) + r_c q_{m2} = 0; \quad (6)$$

$$a_{m2} \gamma \left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=R} + a_{m2} \delta_2 \gamma \left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=R} + \lambda_{p2} \left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)_{r=R} + q_{m2} = 0; \quad (7)$$

$$\lambda_{p1} \left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)_{r=R} + \alpha_p(p|_{r=R} - p_c) = 0, \quad (8)$$

где t_0 , u_0 , p_0 – распределение температуры, влагосодержания и давления при выходе материала из экструдера (для простоты эти величины можно считать постоянными); t_c , p_c – температура и давление влажного воздуха среды у поверхности материала (эти величины переменны по z , имея, в частности, разные значения для зоны парового затвора и вакуумированного объема сублимационной камеры); α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); α_p – коэффициент массообмена при наличии избыточного давления в материале, кг/(м²·с·Па); q_{m2} – интенсивность испарения жидкости на внешней поверхности материала, кг/(м²·с).

Здесь условия (4) определяют начальное распределение температуры, влагосодержания и давления в выходящем из экструдера материале; уравнения (5) выражают условие осевой симметрии полей t , u и p ; уравнения (6), (7) и (8) выражают условия баланса соответственно теплоты, жидкости и пара на поверхности материала.

В уравнении теплового баланса (6) второе слагаемое соответствует конвективному теплообмену материала с окружающей средой.

Поскольку в условиях глубокого вакуума теплообмен конвекцией незначителен (коэффициент α близок к нулю), то данное слагаемое можно учитывать только для зоны парового затвора, опустив его при рассмотрении вакуумированного объема сублимационной камеры.

Совершенно ясно, что анализ переноса жидкости внутри материала имеет смысл проводить лишь для начального периода испарительного замораживания, в дальнейшем этим переносом по ряду причин можно пренебречь, что позволяет заметно упростить модель тепло- и массообмена. Действительно, если пренебречь миграцией жидкости внутри материала, то система (1)–(3) переписывается следующим образом:

$$c\gamma v \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) -$$

$$-r_c j_m K_s + Q_{kp} + Q_{свч}; \quad (9)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{j_m K_s}{\gamma}; \quad (10)$$

$$c_p \gamma v \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{p1} r \frac{\partial p}{\partial r} \right) +$$

$$+ P b_T v \frac{\partial t}{\partial z} + j_m K_s \quad (11)$$

при $0 < r < R$, $z^* < z \leq H$,

где z^* – точка на оси z , начиная с которой перенос жидкости не анализируется (эту точку определим позже).

При этом условия однозначности (4)–(8) примут вид

$$t|_{z=z^*} = t|_{z=z^*-0}; \quad u|_{z=z^*} = u|_{z=z^*-0}; \quad (12)$$

$$p|_{z=z^*} = p|_{z=z^*-0};$$

$$\left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=0} = 0;$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=0} = 0; \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)_{r=0} = 0;$$

$$\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=R} + \alpha(t|_{r=R} - t_c) = 0; \quad (14)$$

$$\lambda_{p1} \left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)_{r=R} + \alpha_p(p|_{r=R} - p_c) = 0. \quad (15)$$

Уравнения (12)–(15) являются важным частным случаем задачи (1)–(8), поскольку описывают внутренний и внешний теплообмен для весьма протяженного участка жгута материала. Однако в дальнейшем для удобства мы будем рассматривать модель тепло- и массообмена в общей формулировке (1)–(8), имеющей силу для любого участка жгута.

Определим для уравнений (1)–(3) степень развития внутренней поверхности парообразования K_S , локальную интенсивность j_m образования пара (испарения или сублимации) на внутренней поверхности высокопористого материала. При практических расчетах для вычисления j_m можно воспользоваться формулами, определяющими интенсивность образования пара на внешней поверхности материала.

В данном случае степень развития поверхности парообразования (или коэффициент) представляет собой отношение совокупной поверхности пор к объему материала:

$$KS = S_{\Pi} / V \quad (16)$$

Здесь задача состоит в том, чтобы вычислить совокупную площадь S_{Π} поверхности всех пор в объеме V . Для этого всю пористую структуру материала в объеме V условно представим в виде одной поры, имеющей идеальную цилиндрическую форму, а также объем V_{Π} и площадь боковой поверхности S_{Π} , равные соответствующим значениям (V_{Π} и S_{Π}) для совокупности всех реальных пор. Такую пору будем называть эквивалентной. Обозначим ее радиус, диаметр и длину соответственно через r_3 , d_3 и L_3 . В таком случае

$$S_{\Pi} = S_3 = 2\pi r_3 L_3. \quad (17)$$

Здесь в качестве $d_3 = 2r_3$ можно взять средний диаметр реальных пор (характерный размер пор). Для определения длины эквивалентной поры L_3 вычислим совокупный объем реальных пор V_{Π} . Согласно определению пористости материала Π (пористость материала есть отношение объема пор к общему объему материала, т. е. в нашем случае $\Pi = V_{\Pi} / V$), имеем

$$V_{\Pi} = \Pi V \text{ или } V_{\Pi} = V_3 = \pi r_3^2 L_3.$$

Сопоставив последние выражения, получаем $L_3 = \Pi V / \pi r_3^2$. Тогда соотношение (17) принимает вид

$$S_{\Pi} = \frac{2\Pi}{r_3} V = \frac{4\Pi}{d_3} V.$$

Вспомнив теперь, что $K_S = S_{\Pi} / V$, получаем приближенную формулу для определения степени развития внутренней поверхности парообразования в высокопористом материале:

$$K_S = \frac{4\Pi}{d_3}. \quad (18)$$

В общем случае величины Π , d_3 и, следовательно, коэффициент K_S являются переменными по пространству и времени.

В соответствии с тем, что при давлениях выше и ниже тройной точки механизм внешнего массообмена принципиально различается, интенсивность парообразования j_m определим отдельно для зоны парового затвора и вакуумированного объема сублимационной камеры.

Для зоны парового затвора, модифицировав известную формулу, положим

$$j_m = \alpha_{mp0} (p_m - p) \frac{B_0}{B}, \quad (19)$$

где α_{mp0} – коэффициент влагообмена при нормальном давлении B_0 ($B_0 = 101,3$ кПа), отнесенный к разности парциальных давлений, кг/(м²·с·Па); p_m – давление пара жидкости (или льда) в рассматриваемой точке материала, Па; B , p – общее (барометрическое) давление и давление пара в пористой среде материала (около рассматриваемой точки), Па. В процессе сушки давление неконденсирующихся газов внутри материала близко к нулю, поэтому можно считать, что $B = p$.

Для вакуумированного объема сублимационной камеры примем:

$$j_m = \alpha_m (p_m - p_d), \quad (20)$$

где α_m – коэффициент массообмена при вакуум-сублимационной сушке, зависящий от давления p и ряда других факторов, кг/(м²·с·Па); p_d – давление насыщенного пара при температуре десублимации, Па.

Известно, что в процессе сушки при удалении основной влаги давление пара жидкости (или льда) в материале p_m приблизительно равно давлению насыщенного пара свободной жидкости (или чистого льда) p_n при температуре материала t и не зависит от его влагосодержания, т. е. $p_m = p_n = f(t)$. В период досушки давление пара p_m меньше давления насыщенного пара p_n и является функцией температуры и влагосодержания материала: $p_m = f(t, u)$. Эта зависимость такова, что при фиксированной температуре t с уменьшением влагосодержания u давление p_m снижается, и, следовательно, снижается интенсивность парообразования. Все это учитывалось при практической реализации рассматриваемой модели.

Для начального периода испарительного замораживания, когда имеет место и анализируется направленный перенос жидкости внутри материала, необходимо определить интенсивность q_{m2} испарения жидкости на наружной поверхности жгута. Поскольку, по предположению, образование пара на внешней и внутренней поверхности высокопористого материала происходит по одному закону, то q_{m2} определяется так же, как и j_m . Для краткости запишем $q_{m2} = j_m|_{r=R}$.

Для случая, когда перенос жидкости пренебрежимо мал и не рассматривается, считаем $q_{m2} = 0$.

Общность модели тепло- и массообмена (1)–(8) заключается не только в том, что она включает в себя как частный случай задачу (9)–(15), но и в некоторой ее формальности. В этой модели принципиально учтены, но не описаны содержательно такие «элементарные» процессы, как, например, вспучивание материала и образование пористой структуры, кристаллизация жидкости и плавление льда, нагрев материала в поле СВЧ.

Объем и пористость материала в процессе сушки. В нашем случае процесс испарительного замораживания сопровождается вспучиванием материала и образованием у него развитой пористой структуры. Таким образом, при «пористом замораживании» увеличивается объем материала и его пористость, изменяется объемная концентрация сухого вещества. Все это следует учесть при моделировании рассматриваемого процесса сушки.

Увеличение объема материала за счет вспучивания принято характеризовать т. н. коэффициентом взрыва $k_{взр}$ — отношением объема материала после вспучивания к первоначальному объему. Чтобы описать процесс вспучивания в его развитии, введем в рассмотрение переменную величину k_v , которую назовем коэффициентом расширения материала и определим как отношение объема материала в рассматриваемый момент времени к первоначальному объему. Очевидно, что в процессе вспучивания коэффициент k_v изменяется от 1 до $k_{взр}$. Задача состоит в том, чтобы установить закон этого изменения.

Между тем, процесс вспучивания при испарительном замораживании довольно сложен, и определение k_v путем составления подробного математического описания данного процесса не только затруднительно, но и неоправданно усложнило бы общую модель процесса сушки введением ряда дополнительных трудноопределяемых параметров. Поскольку наша главная

задача — описание тепло- и массообмена, то нас вполне устроит предлагаемая далее эвристическая модель вспучивания, основанная на упрощенных представлениях об этом процессе и не использующая никаких дополнительных параметров.

Будем считать, что расширение материала, обусловленное интенсивным испарением влаги, начинается с момента попадания материала в сублимационную камеру (его выхода из экструдера) и заканчивается с началом кристаллизации содержащейся влаги. Так как вспучивание экструдата происходит за счет бурного образования пара, то примем допущение, что скорость расширения экструдированного материала прямо пропорциональна интенсивности парообразования. С другой стороны, в основном интенсивностью парообразования определяется и изменение температуры материала при его испарительном охлаждении. В соответствии с этим будем полагать, что в ходе «пористого замораживания» скорость расширения материала пропорциональна скорости его охлаждения.

В практическом отношении сказанное означает, что для периода вспучивания коэффициент расширения k_v линейно зависит от минимальной по объему материала температуры $t_{\min}$, изменяясь от 1 до $k_{взр}$ при изменении $t_{\min}$ от начальной температуры материала t_0 до температуры кристаллизации $t_{кр}$:

$$k_v = 1 + (k_{взр} - 1) \frac{t_{\min} - t_0}{t_{кр} - t_0}, \quad \text{где } t_{\min} = \min_{0 \leq r \leq R} t.$$

Когда $t_{\min}$ достигает значения $t_{кр}$, начинается кристаллизация влаги, и расширение материала, согласно предположению, прекращается, т. е. коэффициент k_v становится постоянным ($k_v = k_{взр}$). Значение z , при котором это происходит, обозначим через $z_{кр}$. Тогда общий вид коэффициента k_v следующий:

$$k_v = \begin{cases} 1 + (k_{взр} - 1) \frac{t_{\min} - t_0}{t_{кр} - t_0} & \text{при } z < z_{кр}, \\ k_{взр} & \text{при } z \geq z_{кр}. \end{cases} \quad (21)$$

Заметим, что, поскольку при $z = z_{кр}$ завершается формирование пористой структуры материала и содержащаяся в нем влага начинает замерзать, то, начиная с этой точки, внутренним переносом жидкости можно пренебречь. Поэтому введенную в рассмотрение в предыдущем пункте точку z^* определим так: $z^* = z_{кр}$.

Определяя изменение линейных размеров объекта сушки, будем предполагать, что при вспучивании расширение жгута материала происходит только в поперечном направлении.

В этом случае коэффициент расширения k_V характеризует увеличение в процессе вспучивания площади поперечного сечения жгута $S_{\text{сеч}}$ по отношению к площади первоначального сечения (при выходе из экструдера) $S_{\text{сеч},0}$: $k_V = S_{\text{сеч}} / S_{\text{сеч},0}$. Следовательно, $S_{\text{сеч}} = k_V S_{\text{сеч},0}$ или $\pi R^2 = k_V \pi R_0^2$, где R_0 , R – начальный и текущий радиусы жгута. Из последнего соотношения получаем формулу для определения переменного по z радиуса жгута R :

$$R = R_0 \sqrt{k_V}. \quad (22)$$

При определении изменения в процессе вспучивания объемной концентрации сухого вещества γ и пористости Π примем допущение, что расширение материала происходит равномерно по всему его объему.

Объемная концентрация сухого вещества γ обратно пропорциональна объему материала, поэтому закон ее изменения при расширении материала очевиден:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{k_V}, \quad (23)$$

где γ_0 – начальная объемная концентрация сухого вещества, кг сух. вещ./м³.

Определим теперь изменяющуюся в процессе сушки объемную пористость материала Π . При этом под пористой структурой будем понимать совокупность всех «пустот» внутри материала, заполненных лишь парогазовой смесью. Рассмотрим некоторый элементарный объем материала V , расширяющийся в процессе вспучивания. Совокупный объем V_{Π} всех пор в V складывается из первоначального объема «пустот» $V_{\Pi,0}$, объема «пустот» $V_{\Pi,\text{вспуч}}$, образующихся в процессе вспучивания, и объема «пустот» $V_{\Pi,\text{обезв}}$, образующихся в процессе обезвоживания (при удалении влаги освобождается занимаемое ей пространство):

$$V_{\Pi} = V_{\Pi,0} + V_{\Pi,\text{вспуч}} + V_{\Pi,\text{обезв}}.$$

Составляющие $V_{\Pi,0}$, $V_{\Pi,\text{вспуч}}$ и $V_{\Pi,\text{обезв}}$ вычислить несложно:

$$V_{\Pi,0} = \Pi_0 V_0;$$

$$V_{\Pi,\text{вспуч}} = V - V_0 = k_V V_0 - V_0 = (k_V - 1) V_0;$$

$$V_{\Pi,\text{обезв}} = \frac{m_c(u_0 - u)}{\rho_v} = \frac{\gamma V(u_0 - u)}{\rho_v},$$

где Π_0 – исходная пористость материала; V_0 – начальное значение V ; m_c – масса сухого вещества в объеме V ; u_0 , u – начальное и текущее влагосодержание; ρ_v – плотность удаляемой влаги (в жидкой или твердой фазе).

Таким образом, для пористости Π элементарного объема материала V имеем

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V} = \frac{V_{\Pi,0} + V_{\Pi,\text{вспуч}} + V_{\Pi,\text{обезв}}}{V} =$$

$$= \frac{1}{V} \left(\Pi_0 V_0 + (k_V - 1) V_0 + \frac{\gamma V(u_0 - u)}{\rho_v} \right)$$

или, окончательно,

$$\Pi = \frac{\Pi_0}{k_V} + \frac{k_V - 1}{k_V} + \frac{\gamma(u_0 - u)}{\rho_v}. \quad (24)$$

Нетрудно видеть, что объемная пористость материала Π , определенная таким образом, не только зависит от времени пребывания материала в сублимационной камере, но и переменна по радиусу жгута.

Удельное массосодержание льда в процессе сушки. С учетом отмечавшейся выше ничтожной малости массы содержащегося в материале пара по сравнению с массой жидкости или массой льда, влагосодержание материала u в общем случае можно представить в виде

$$u = u_2 + u_3, \quad (25)$$

где u_2 , u_3 – удельное массосодержание соответственно жидкой и твердой фазы, кг/кг сух. вещ.

Особенности моделируемого процесса сушки – сложный объемный характер кристаллизации и плавления, неполное замерзание влаги, селективность СВЧ нагрева и другое, – обуславливают необходимость отдельного анализа фаз, допущение о локальной однородности влаги в данном случае неприемлемо. Поэтому, помимо общего влагосодержания u , будем анализировать удельное массосодержание льда u_3 [массосодержание жидкости u_2 при этом тривиально определяется из выражения (25)].

Выходящий из экструдера материал не содержит твердую фазу, поэтому для u_3 начальное (или, в условиях квазистационарности, – граничное) условие имеет вид

$$u_3|_{z=0} = 0. \quad (26)$$

В дальнейшем, по мере перемещения материала вдоль сублимационной камеры, изменение локального массосодержания льда в нем происходит за счет фазовых превращений лед – жидкость (кристаллизация или плавление) и лед – пар (сублимация или десублимация). В соответствии с этим запишем

$$\frac{\partial u_3}{\partial z} = \left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)_{\text{лж}} + \left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)_{\text{лп}}. \quad (27)$$

Здесь первое слагаемое выражает изменение локального массосодержания льда u_3 за счет фазовых превращений лед – жидкость, а второе – изменение u_3 за счет фазовых превращений лед – пар.

Определение величины $(\partial u_3 / \partial z)_{\text{лж}}$ требует разработки специальной модели кристаллизации и плавления, учитывающей особенность протекания этих процессов внутри высокопористого материала, которая заключается в следующем. Движущими силами кристаллизации и плавления в рассматриваемом случае являются соответственно процессы испарения и СВЧ нагрева. Данные процессы носят объемный характер, то есть происходят сразу во всем объеме материала. В соответствии с этим процессы кристаллизации и плавления не развиваются по «классическому» принципу распространения фронта кристаллизации или плавления, представляющего собой четкую границу между влажным и замороженным материалом, а происходят одновременно в некотором объеме материала. Более того, зоны кристаллизации и плавления в общем случае могут чередоваться по радиусу жгута. Таким образом, главным принципом разрабатываемой подмодели должен стать учет локальных условий кристаллизации и плавления (в первую очередь – температуры и массосодержания разных фаз).

Будем предполагать, что процессы кристаллизации и плавления происходят при постоянной температуре $t_{\text{кр}}$. Необходимыми условиями протекания кристаллизации или плавления в некоторой рассматриваемой точке материала будем считать, во-первых, равенство температуры в этой точке температуре $t_{\text{кр}}$: $t = t_{\text{кр}}$ и, во-вторых, наличие здесь потенциально замораживаемой жидкости: $u_3 < u - u_{\text{нз}}$ (для кристаллизации) или льда: $u_3 > 0$ (для плавления). Здесь $u_{\text{нз}} = \text{const}$ – удельное массосодержание незамораживаемой влаги, кг/кг.

Процессы кристаллизации и плавления протекают соответственно с выделением и поглощением теплоты. В уравнении теплопроводности (1) это учитывается с помощью слагаемого (внутреннего источника теплоты) $Q_{\text{кр}}$, которое с учетом наших обозначений определяется следующим образом:

$$Q_{\text{кр}} = r_{\text{кр}} \gamma v \left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)_{\text{лж}}, \quad (28)$$

где $r_{\text{кр}}$ – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг.

Тогда уравнение теплопроводности принимает вид

$$c \gamma v \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) - r_c j_m K_S + r_{\text{кр}} \gamma v \left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)_{\text{лж}} + Q_{\text{СВЧ}}. \quad (29)$$

Если в рассматриваемой точке материала происходит кристаллизация или плавление, то, по крайней мере, в течение бесконечно малого промежутка времени температура в этой точке, по предположению, постоянна ($t = t_{\text{кр}}$). Следовательно, учитывая квазистационарность процесса: $\partial t / \partial z = 0$.

Подставляя это условие в (29), получаем уравнение теплового баланса в точке кристаллизации или плавления:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) - r_c j_m K_S + r_{\text{кр}} \gamma v \left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)_{\text{лж}} + Q_{\text{СВЧ}} = 0,$$

откуда

$$\left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)_{\text{лж}} = - \frac{1}{r_{\text{кр}} \gamma v} \times \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) - r_c j_m K_S + Q_{\text{СВЧ}} \right]. \quad (30)$$

Формулой (30) можно пользоваться для определения величины $\left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)_{\text{лж}}$ только

в том случае, когда в рассматриваемой точке материала выполняются оговоренные выше необходимые условия кристаллизации или плавления. Чтобы определить данную величину в общем виде, обозначим правую часть соотношения (29) через F :

$$F = - \frac{1}{r_{\text{кр}} \gamma v} \times \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) - r_c j_m K_S + Q_{\text{СВЧ}} \right]. \quad (31)$$

Тогда, исходя из очевидных физических соображений, общее определение искомой величины можно сформулировать следующим образом:

$$\left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)_{\text{лж}} = \begin{cases} F & \text{при } F > 0, \\ t = t_{\text{кр}}, \\ u_3 < u - u_{\text{нз}} & \text{(кристаллизация);} \\ F & \text{при } F < 0, \\ t = t_{\text{кр}}, u_3 > 0 & \text{(плавление);} \\ 0 & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (32)$$

Таким образом, если в рассматриваемой точке материала $u_3 > 0$, то в этой точке изменение массосодержания льда за счет фазовых

превращения лед – пар количественно совпадает с изменением общего влагосодержания за счет парообразования:

$$\left(\frac{\partial u_3}{\partial z}\right)_{\text{лп}} = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{\text{ф}}.$$

При $u_3 = 0$ сублимация льда, естественно, не происходит; случай десублимации рассматривать не будем, поэтому

$$\left(\frac{\partial u_3}{\partial z}\right)_{\text{лп}} = 0.$$

Таким образом, общий вид второго слагаемого соотношения (27):

$$\left(\frac{\partial u_3}{\partial z}\right)_{\text{лп}} = \begin{cases} -\frac{j_m K_s}{\gamma} & \text{при } u_3 > 0; \\ 0 & \text{при } u_3 = 0. \end{cases} \quad (33)$$

Заметим, что, в соответствии с выражением (33), удельная теплота парообразования r_c может быть представлена в виде

$$r_c = \begin{cases} r_{\text{суб}} & \text{при } u_3 > 0; \\ r_{\text{исп}} & \text{при } u_3 = 0, \end{cases} \quad)$$

где $r_{\text{исп}}$, $r_{\text{суб}}$ – удельная теплота соответственно испарения и сублимации, Дж/кг.

Итак, мы определили формулой (28) слагаемое $Q_{\text{кр}}$ уравнения теплопроводности (1) и разработали математическую модель (26), (27), (32), (33), позволяющую определить локальное массосодержание твердой фазы u_3 с учетом его изменения в процессе сушки за счет кристаллизации жидкости, плавления и сублимации льда.

Моделирование СВЧ нагрева. Энергия сверхвысокочастотного электромагнитного поля, проникая в толщу материала, трансформируется в теплоту во всем объеме этого материала. СВЧ нагрев, таким образом, в принципе подобен введению в материал внутреннего источника тепла, поэтому в нашем случае он учитывается в уравнении теплопроводности (1) с помощью специального слагаемого $Q_{\text{СВЧ}}$.

Для зоны воздействия СВЧ поля:

$$Q_{\text{СВЧ}} = 0,556 \cdot 10^{-10} \varepsilon'' \nu E^2, \quad (34)$$

где $\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta$ – коэффициент диэлектрических потерь; ε' – диэлектрическая проницаемость; δ – угол диэлектрических потерь; ν – частота электромагнитных колебаний, Гц; E – напряженность электрического поля, В/м.

Вне зоны действия СВЧ поля $Q_{\text{СВЧ}} = 0$.

Обозначим через z_1 и z_2 соответственно начало и конец зоны воздействия на материал поля СВЧ. Тогда общее определение удельной мощности $Q_{\text{СВЧ}}$ внутреннего источника теплоты, связанного с СВЧ нагревом, выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{СВЧ}} = \begin{cases} 0,556 \cdot 10^{-10} \varepsilon'' \nu E^2 & \text{при } z_1 \leq z \leq z_2; \\ 0 & \text{при } z < z_1 \\ & \text{или } z > z_2. \end{cases} \quad (35)$$

Так как в рассматриваемом процессе сушки характерный размер материала (радиус жгута R) сравнительно мал и, кроме того, материал обладает высокой пористостью, то с высокой степенью достоверности можно считать, что напряженность СВЧ поля E постоянна по объему сушеного материала, т. е. электромагнитные волны не затухают при прохождении от поверхности жгута к его центру.

Вместе с тем, при моделировании СВЧ нагрева обязательно следует учесть селективность поглощения электромагнитной энергии различными составляющими влагосодержащих материалов – сухой основой, жидкой и твердой фазой влаги, паром и т. д. Так, коэффициент диэлектрических потерь воды весьма велик и значительно превышает соответствующие значения для сухой составляющей большинства материалов. При этом замороженная влага почти не поглощает энергию СВЧ поля, а коэффициент диэлектрических потерь пара практически равен нулю. Поскольку в процессе сушки концентрация разных составляющих материала (в первую очередь – жидкой и твердой фазы влаги) изменяется, то в нашем случае значение общего коэффициента диэлектрических потерь материала ε'' может на целые порядки различаться по радиусу и, особенно, по длине жгута. Поэтому значение ε'' должно определяться с учетом соответствующих условий (температуры, состава материала и прочего) в каждой конкретной точке объекта сушки. Лишь так при моделировании можно учесть не только объемный, но и адресный характер СВЧ нагрева.

Проблема здесь состоит в том, что экспериментальное определение сложной зависимости коэффициента ε'' от состава, структуры, температуры материала и прочих факторов довольно трудоемко и не может гарантировать получения достаточно точных результатов. В связи с этим предложим способ упрощенной аналитической оценки зависимости ε'' от состава и структуры материала.

Будем условно считать, что сушимый материал состоит из четырех компонентов – сухого вещества, воды, льда и пара, заполняющего поры («пустоты»). В соответствии с этим общий коэффициент ε'' представим в виде суммы коэффициентов диэлектрических потерь каждого из компонентов, умноженных на некоторые весовые коэффициенты:

$$\varepsilon'' = \sigma_c \varepsilon_c'' + \sigma_b \varepsilon_b'' + \sigma_l \varepsilon_l'' + \sigma_n \varepsilon_n'', \quad (36)$$

где $\varepsilon_c'', \varepsilon_b'', \varepsilon_l'', \varepsilon_n''$ – коэффициенты диэлектрических потерь соответственно для сухого вещества, воды, льда и пара; $\sigma_c, \sigma_b, \sigma_l, \sigma_n$ – весовые коэффициенты. Все весовые коэффициенты неотрицательны, их сумма равна единице.

Так как удельная мощность СВЧ нагрева $Q_{\text{свч}}$ рассчитывается по объему материала, то каждый из весовых коэффициентов целесообразно определить как отношение объема соответствующего компонента к общему объему материала. Это позволит также учесть высокую пористость материала, которая снижает его способность поглощать энергию поля СВЧ.

Рассмотрим внутри материала некоторый элементарный объем V . Обозначим через V_c, V_b, V_l и V_n соответственно объем сухого вещества, жидкости, льда и заполненных паром пор в объеме V . Имеем

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{V_c}{V} = \frac{m_c}{\rho_c V} = \frac{\gamma}{\rho_c}; \\ \sigma_b &= \frac{V_b}{V} = \frac{m_b}{\rho_b V} = \frac{m_b u_2}{\rho_b V} = \frac{\gamma}{\rho_b} (u - u_3); \\ \sigma_l &= \frac{V_l}{V} = \frac{m_l}{\rho_l V} = \frac{m_l u_3}{\rho_l V} = \frac{\gamma}{\rho_l} u_3; \\ \sigma_n &= \frac{V_n}{V} = P, \end{aligned}$$

где m_c, m_b, m_l – масса сухого вещества, жидкости и льда в объеме V , кг; ρ_c, ρ_b, ρ_l – плотность сухого вещества, жидкости (воды) и льда, кг/м³.

С учетом того, что пар практически не поглощает электромагнитную энергию ($\varepsilon_n'' = 0$), окончательно получаем

$$\varepsilon'' = \frac{\gamma}{\rho_c} \varepsilon_c'' + \frac{\gamma}{\rho_b} (u - u_3) \varepsilon_b'' + \frac{\gamma}{\rho_l} u_3 \varepsilon_l''. \quad (37)$$

Диэлектрические характеристики воды и льда с их зависимостью от температуры хорошо изучены. Формула (37) позволяет также учесть зависимость коэффициента диэлектрических потерь материала от объемной концентрации сухого вещества и локального массосодержания жидкости и льда.

Заключение

В представленной статье разработана комплексная математическая модель, описывающая процесс вакуум-сублимационной сушки высокопористого материала с использованием сверхвысокочастотного (СВЧ) нагрева. Модель основана на системе дифференциальных уравнений в частных производных, учитывающих взаимосвязанные процессы теплопроводности, массопереноса, парообразования, фазовых переходов и объемного энергоподвода.

Ключевым достижением работы является синтез общей модели из ряда специализированных подмоделей, каждая из которых детально описывает отдельный аспект процесса: тепло- и массообмен, изменение структуры, фазовые переходы, СВЧ-нагрев.

Основным теоретическим выводом является демонстрация принципиальной возможности адекватного математического описания столь сложного технологического процесса, характеризующегося интенсивным нестационарным тепло- и массообменом, значительными изменениями структуры материала и одновременным протеканием разнонаправленных физических явлений. Предложенный подход, основанный на разделении процесса на элементарные составляющие, показал свою эффективность для построения целостной модели.

Практическая значимость модели заключается в том, что она создает теоретическую основу для:

- проведения виртуальных экспериментов и анализа влияния различных технологических параметров (скорости движения материала, мощности СВЧ-поля, условий в камере) на ход сушки;
- оптимизации режимов работы сушильной установки с целью интенсификации процесса, снижения энергозатрат и предотвращения перегрева продукта;
- определения рациональных конструктивных параметров оборудования.

Таким образом, представленная работа вносит существенный вклад в теорию сушки капиллярно-пористых материалов в энергетических полях и предоставляет ценный инструментальный для инженерных расчетов и проектирования современных вакуум-сублимационных установок с СВЧ-дополнительным нагревом. Дальнейшим развитием исследования может стать численная реализация модели, ее верификация экспериментальными данными и уточнение эмпирических коэффициентов для конкретных видов материалов.

Литература

- 1 Ziyad A.M. Comparative Analysis of Drying Methods for Blueberries: Effects on Physiochemical Attributes: dissertation. East Lansing: Michigan State University, 2025. 180 p.
- 2 Charmongkolpradit S., Singhpo T., Poojeera S. Production process of Tiliacora triandra (Diels) flakes via vacuum-assisted freeze-drying technique // Discover Applied Sciences. 2025. V. 7. № 8. P. 908.
- 3 Ning Y., Wang H., Li J. et al. Anisotropic electromagnetic absorption of the aligned Ti3C2Tx MXene/RGO nanocomposite foam // Composites Science and Technology. 2022. V. 227. P. 109609.
- 4 Sikiru Y., Paliwal J., Erkinbaev C. Three-dimensional characterization of potatoes under different drying methods: Quality optimization for hybrid drying approach // Foods. 2024. V. 13. № 22. P. 3633.
- 5 Jang J.W., Kim S.H., Lee Y.K. et al. Scaffold characteristics, fabrication methods, and biomaterials for the bone tissue engineering // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2023. V. 24. № 3. P. 511–529.
- 6 Kopeć A., Krzysztoforski J., Bieñkowska K. et al. Modification of the vacuum-steam thawing method of meat by using the initial stage of sublimation dehydration // Scientific Reports. 2022. V. 12. № 1. P. 7900.
- 7 Kong B., Lee I., Kang T. Performance Evaluation of Novel Thawing Systems for Potatoes: Vacuum Sublimation-Rehydration and Magnetic Field-Assisted Techniques // Food and Bioprocess Technology. 2025. V. 18. P. 1–11.
- 8 Mokhova E., Gordienko M., Menshutina N. Investigation of the effect of infrared and ultrasonic exposure on the kinetics of vacuum freeze-drying of polymeric materials. Part 1: Development of device and process control system // Drying Technology. 2024. V. 42. № 4. P. 748–761.
- 9 Chen S., Wang L., Zhang Y. et al. Optimization of a novel vacuum sublimation–rehydration thawing process // Journal of Food Science. 2023. V. 88. № 1. P. 259–272.
- 10 Rakhmatulina A., Altybay A., Satybaldy S. Numerical Simulation of Conjugate Heat and Mass Transfer During Vacuum Freeze-drying of Mare Milk: Validation and Energy-optimisation Study // Engineered Science. 2025. V. 37. P. 1807.
- 11 Казарцев Д.А. Разработка общих видов математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 3 (89). С. 17–22. doi: 10.20914/2310-1202-2021-3-17-22
- 12 Калашников Г.В., Литвинов Е.В., Назаретян Д.В. Моделирование теплообмена с переменным энергоподводом процесса контактной сушки производства картофельных хлопьев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 4 (90). С. 25–30. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-25-30
- 13 Рахматулина А.Б., Иванов С.С., Петрова О.А. и др. Разработка системы регулирования температурного режима вакуумно-сублимационной сушки на основе идентификации параметров объекта // Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. 2024. Т. 149. № 4. С. 363–380.
- 14 Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Повышение энергоэффективности сушильной установки за счет применения термоэлектрических модулей // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18. № 2. С. 68–77.
- 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.
- 16 Gangawane K.M. Computational Techniques on Freeze Drying // Advanced Computational Approaches for Drying in Food Processing. Boca Raton: CRC Press, 2024. P. 213–235.
- 17 Parniakov O., Wiktor A., Lebovka N. et al. Insect processing for food and feed: A review of drying methods // Drying Technology. 2022. V. 40. № 8. P. 1500–1513.
- 18 Chen S., Li H., Zhang W. et al. Experimental study on the effect of heating plate (heat source) temperature on a new vacuum sublimation-rehydration thawing // International Journal of Refrigeration. 2022. V. 136. P. 27–35.
- 19 Özkan Karabacak A., Demir H., Yılmaz E. et al. A review of emerging technologies on the rehydration behavior of foodstuffs // Journal of Food Process Engineering. 2025. V. 48. № 2. P. e70031.
- 20 Ratti C. Freeze drying for food powder production // Handbook of Food Powders: Processes and Properties / Ed. by B. Bhandari, N. Bansal, M. Zhang, P. Schuck. 2nd ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2024. P. 37–56.

References

- 1 Ziyad A.M. Comparative Analysis of Drying Methods for Blueberries: Effects on Physiochemical Attributes: dissertation. East Lansing: Michigan State University, 2025. 180 p.
- 2 Charmongkolpradit S., Singhpo T., Poojeera S. Production process of Tiliacora triandra (Diels) flakes via vacuum-assisted freeze-drying technique. Discover Applied Sciences. 2025. vol. 7. no. 8. p. 908.
- 3 Ning Y., Wang H., Li J. et al. Anisotropic electromagnetic absorption of the aligned Ti3C2Tx MXene/RGO nanocomposite foam. Composites Science and Technology. 2022. vol. 227. p. 109609.
- 4 Sikiru Y., Paliwal J., Erkinbaev C. Three-dimensional characterization of potatoes under different drying methods: Quality optimization for hybrid drying approach. Foods. 2024. vol. 13. no. 22. p. 3633.
- 5 Jang J.W., Kim S.H., Lee Y.K. et al. Scaffold characteristics, fabrication methods, and biomaterials for the bone tissue engineering. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2023. vol. 24. no. 3. pp. 511–529.
- 6 Kopeć A., Krzysztoforski J., Bieñkowska K. et al. Modification of the vacuum-steam thawing method of meat by using the initial stage of sublimation dehydration. Scientific Reports. 2022. vol. 12. no. 1. p. 7900.
- 7 Kong B., Lee I., Kang T. Performance Evaluation of Novel Thawing Systems for Potatoes: Vacuum Sublimation-Rehydration and Magnetic Field-Assisted Techniques. Food and Bioprocess Technology. 2025. vol. 18. pp. 1–11.
- 8 Mokhova E., Gordienko M., Menshutina N. Investigation of the effect of infrared and ultrasonic exposure on the kinetics of vacuum freeze-drying of polymeric materials. Part 1: Development of device and process control system. Drying Technology. 2024. vol. 42. no. 4. pp. 748–761.

- 9 Chen S., Wang L., Zhang Y. et al. Optimization of a novel vacuum sublimation–rehydration thawing process. *Journal of Food Science*. 2023. vol. 88. no. 1. pp. 259–272.
- 10 Rakhmatulina A., Altybay A., Satybaldy S. Numerical Simulation of Conjugate Heat and Mass Transfer During Vacuum Freeze-drying of Mare Milk: Validation and Energy-optimisation Study. *Engineered Science*. 2025. vol. 37. p. 1807.
- 11 Kazartsev D.A. Development of general types of mathematical models for drying food products with microwave energy input based on the laws of chemical kinetics of heterogeneous processes. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021. vol. 83. no. 3 (89). pp. 17–22. doi: 10.20914/2310-1202-2021-3-17-22 (in Russian)
- 12 Kalashnikov G.V., Litvinov E.V., Nazaretyan D.V. Modeling of heat transfer with variable energy input of the contact drying process for the production of potato flakes. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021. vol. 83. no. 4 (90). pp. 25–30. doi: 10.20914/2310-1202-2021-4-25-30 (in Russian)
- 13 Rakhmatullina A.B., Ivanov S.S., Petrova O.A. et al. Development of a temperature control system for vacuum freeze-drying based on object parameter identification. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Series: Technical Sciences and Technologies*. 2024. vol. 149. no. 4. pp. 363–380. (in Russian)
- 14 Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Increasing the energy efficiency of a drying plant through the use of thermoelectric modules. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. vol. 18. no. 2. pp. 68–77. (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.
- 16 Gangawane K.M. Computational Techniques on Freeze Drying. *Advanced Computational Approaches for Drying in Food Processing*. Boca Raton: CRC Press, 2024. pp. 213–235.
- 17 Parniakov O., Wiktor A., Lebovka N. et al. Insect processing for food and feed: A review of drying methods. *Drying Technology*. 2022. vol. 40. no. 8. pp. 1500–1513.
- 18 Chen S., Li H., Zhang W. et al. Experimental study on the effect of heating plate (heat source) temperature on a new vacuum sublimation-rehydration thawing. *International Journal of Refrigeration*. 2022. vol. 136. pp. 27–35.
- 19 Özkan Karabacak A., Demir H., Yılmaz E. et al. A review of emerging technologies on the rehydration behavior of foodstuffs. *Journal of Food Process Engineering*. 2025. vol. 48. no. 2. p. e70031.
- 20 Ratti C. Freeze drying for food powder production. *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*. Ed. by B. Bhandari, N. Bansal, M. Zhang, P. Schuck. 2nd ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2024. pp. 37–56.

Сведения об авторах

Александр С. Белозерцев к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alex_bel77@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9043-9452>

Сергей В. Лавров к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ya-serglavrov@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7031-7738>

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

Aleksandr S. Belozertsev Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alex_bel77@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9043-9452>

Sergey V. Lavrov Cand. Sci. (Engin.) Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, , Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ya-serglavrov@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7031-7738>

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 10/11/2025	После редакции 24/11/2025	Принята в печать 04/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 24/11/2025	Accepted 04/12/2025

Разработка рецептур коллагенсодержащих напитков на основе растительного сырья для функционального питания

Татьяна С. Ковалева	¹	tanyakova2501@gmail.com	 0000-0002-3531-3811
Татьяна И. Романюк	¹	tafursova@ya.ru	 0000-0001-8813-9901
Людмила В. Антипова	¹	antipova.l54@ya.ru	 0000-0002-1416-0297
Светлана Ф. Яковлева	¹	svetlana.yakovleva.68@mail.ru	 0000-0003-3686-9966
Елена А. Коротких	¹	dobruly@bk.ru	 0000-0002-5951-7085
Софья С. Дядищева	¹	miss.diadischewa@ya.ru	 0009-0002-7765-040X

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

Аннотация. В настоящее время в России формируется активный спрос на функциональные напитки. Они способствуют восполнению дефицита витаминов, минералов и других полезных веществ, благодаря которым повышается устойчивость к различным заболеваниям. Цель работы – обоснование компонентного состава и рецептуры напитков функционального назначения на основе растворимого коллагена. Были разработаны рецептуры безалкогольных коллагенсодержащих напитков функционального назначения «Малиновый», «Облепиховый», «Калинка», «Крыжовниковый», «Боярынька», «Апельсинка», «Солодушка», «Витаминный», оказывающих благотворное влияние на физиологические процессы в организме. Разработанные напитки позволяют расширить ассортимент напитков функционального назначения с использованием рыбного сырья, получить продукты с высокими органолептическими показателями, сохраняющимися длительное время, высокой пищевой, биологической ценностью. Были проведены исследования и опыты с коллагенсодержащими напитками. Такие напитки способны удовлетворять полностью или частично определенным требованиям: обладать антидотным свойством; ускорять или замедлять метаболизм; ускорять выведение вредных веществ из организма; повышать общую устойчивость организма; воздействовать с помощью отдельных пищевых веществ на состояние наиболее поражаемых органов; компенсировать повышенные затраты пищевых и биологически активных веществ, связанных с учетом рациона питания. Результаты анализа напитков в течение срока хранения подтверждают стабильность показателей испытываемых образцов, что позволило выявить срок хранения напитков 6 месяцев при условиях хранения: температура $12 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха $70 \pm 5\%$.

Ключевые слова: белок, коллаген, функциональные напитки, желудочно-кишечный тракт.

Development of formulas for collagen-containing drinks based on plant-based raw materials for functional nutrition

Tatiana S. Kovaleva	¹	tanyakova2501@gmail.com	 0000-0002-3531-3811
Tatiana I. Romanyuk	¹	tafursova@ya.ru	 0000-0001-8813-9901
Ludmila V. Antipova	¹	antipova.l54@ya.ru	 0000-0002-1416-0297
Svetlana F. Yakovleva	¹	svetlana.yakovleva.68@mail.ru	 0000-0003-3686-9966
Elena A. Korotkikh	¹	dobruly@bk.ru	 0000-0002-5951-7085
Sofia S. Dyadishcheva	¹	miss.diadischewa@ya.ru	 0009-0002-7765-040X

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

Abstract. Currently, there is a growing demand for functional drinks in Russia. They help replenish the deficiency of vitamins, minerals and other beneficial substances, thereby increasing resistance to various diseases. The objective of the work is to substantiate the component composition and formulation of functional drinks based on soluble collagen. The following recipes have been developed for non-alcoholic collagen-containing functional drinks: "Raspberry", "Sea Buckthorn", "Kalinka", "Kryzhovnikov", "Boyarynka", "Orange", "Solodushka", "Vitaminny", which have a beneficial effect on physiological processes in the body. The developed drinks make it possible to expand the range of functional drinks using fish raw materials, to obtain products with high organoleptic properties, long-lasting shelf life, and high nutritional and biological value. Research and experiments with collagen-containing drinks have been conducted. Such drinks are able to fully or partially satisfy certain requirements: have an antidote property; accelerate or slow down metabolism; accelerate the elimination of harmful substances from the body; Enhance the body's overall resistance; target the most vulnerable organs with individual nutrients; and compensate for increased expenditure of nutrients and biologically active substances associated with dietary changes. Results of beverage analysis during shelf life confirm the stability of the test samples, allowing for a shelf life of 6 months under storage conditions of $12 \pm 2^\circ\text{C}$ and $70 \pm 5\%$ relative humidity.

Keywords: protein, collagen, functional drinks, gastrointestinal tract.

Для цитирования

Ковалева Т.С., Романюк Т.И., Антипова Л.В., Яковлева С.Ф., Коротких Е.А. Разработка рецептур коллагенсодержащих напитков на основе растительного сырья для функционального питания // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 55–62. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-55-62

For citation

Kovaleva T.S., Romanyuk T.I., Antipova L.V., Yakovleva S.F., Korotkikh E.A. Development of formulas for collagen-containing drinks based on plant-based raw materials for functional nutrition. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 55–62. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-55-62

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

Введение

В процессе жизнедеятельности организма непрерывно расходуются питательные вещества, выполняющие пластическую и энергетическую функции. Источником питательных веществ являются различные продукты питания, состоящие из комплекса сложных белков, жиров и углеводов, которые в процессе пищеварения превращаются в более простые вещества, усвояемые организмом. На данный момент существует нехватка пищевого белка. Эта проблема является не только экономической, но и социально-медицинской проблемой современного мира, поскольку наличие или отсутствие сбалансированного по белку рациона не даёт нормально развиваться биологическому организму. Следовательно, белок – это одно из мощных средств воздействия на популяцию человека на планете, на формирование умственно и физически развитого индивидуума. Трудно переоценить роль белков соединительных тканей, которые не сбалансированы по аминокислотному составу, но выполняют важнейшие пластические функции.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) в своих докладах сообщает, что у современного человека идёт процесс постоянного «сверхпланового» распада белка, что связано с наличием и ростом масштабов различных заболеваний. Это происходит в результате пагубного состояния экологии, неправильного питания, стресса, а также генетического наследования черт, сформировавшихся нездоровым образом жизни. Сложившаяся ситуация требует обоснования новых комплексных подходов для разработки коллагеновых субстанций и препаратов, полезных и безопасных в поддержании и коррекции состояний человеческого организма.

Уникальные биологические функции коллагена вызывают огромный интерес ученых и практиков, в связи с чем информационные данные о его применимости в практической деятельности человека постоянно обновляются. Коллаген используют как систему доставки лекарственных препаратов, получают защитные контактные линзы в офтальмологии, разнообразные губки от ожогов и ран, матрицы для клеточных культур. Он также используется в операциях при трансплантации кожи на повреждённые участки, производстве имплантатов, искусственных сосудов и клапанов. Причиной огромного количества заболеваний является нарушение процесса синтеза коллагена в организме. Такие нарушения ведут к слабости соединительной ткани и коллагеновых волокон в ней, страдает качество коллагена.

Функциональные продукты питания – это продукты или пищевые ингредиенты, которые положительно влияют на здоровье человека

в дополнение к их питательной ценности. Однако продукты здорового питания не являются лекарствами и не могут излечивать, но помогают предупредить болезни и старение организма. Функциональное питание подразумевает употребление в пищу продуктов, повышающих сопротивляемость человеческого организма заболеваниям и улучшающих многие физиологические процессы в организме человека, что позволяет ему долгое время сохранять активный образ жизни. Напитки, в свою очередь, являются самой технологичной основой для создания новых видов функциональных продуктов. Дело в том, что технология производства напитков такова, что введение в них новых функциональных ингредиентов не представляет большой сложности, а отсутствие термической обработки позволяет сохранять в продукте все витамины и полезные вещества.

В настоящее время в России формируется активный спрос на функциональные напитки. Однако в то время, как российский рынок данных продуктов находится на стадии своего развития, в других странах представлен широкий ассортимент безалкогольных напитков, которые помимо способности утолять жажду, обладают дополнительной пользой для здоровья человека. Медициной многих стран безалкогольный напиток определен как оптимальная форма пищевого продукта, используемого для обогащения организма человека биологически активными веществами, применяемыми для любого контингента потребителей.

На фоне ухудшения экологической обстановки снижается и качественный состав пищевых продуктов. Употребление такой пищи негативно сказывается на состоянии здоровья. Одним из выходов в такой ситуации могут стать функциональные продукты питания (ФП). Они способствуют восполнению дефицита витаминов, минералов и других полезных веществ, благодаря которым повышается устойчивость к различным заболеваниям. Это пищевая продукция, обогащенная различными ингредиентами, которые благотворно влияют на состояние организма и способствуют снижению риска развития множества заболеваний.

Цель функциональных продуктов – поддержание и укрепление здоровья населения, уменьшение риска возникновения заболеваний, связанных с пищевым поведением. Достижение поставленной цели возможно через систематический прием в пищу продуктов функционального назначения, содержащих в своем составе необходимые ингредиенты. ФП не относятся к лекарственным средствам и биологически активным добавкам. Их употребление исключает последствия передозировки.

Цель работы – обоснование компонентного состава и рецептуры напитков функционального назначения на основе растворимого коллагена.

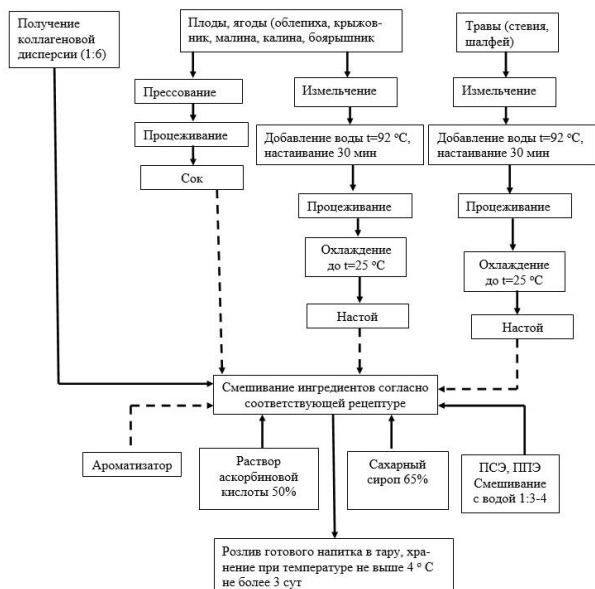


Рисунок 1. Технологическая блок-схема получения безалкогольных коллагенсодержащих напитков функционального назначения

Figure 1. Flow chart for the production of non-alcoholic collagen-containing functional drinks

Материалы и методы

Были разработаны рецептуры безалкогольных коллагенсодержащих напитков функционального назначения «Малиновый», «Облепиховый»,

«Калинка», «Крыжовниковый», «Боярынька», «Апельсинка», «Солодушка», «Витаминный» (рисунок 1), оказывающих благотворное влияние на физиологические процессы в организме. Их главное преимущество заключается в том, что они практически не имеют противопоказаний и разрешены для употребления в любом возрасте.

Сегодня наибольшей популярностью пользуются ФН для массового потребления, проще говоря «здоровые напитки». Они обогащены минеральными веществами, витаминами, ненасыщенными жирными кислотами и пищевыми волокнами, так необходимыми организму. Систематический прием таких ФН способствует профилактике сердечно-сосудистых, желудочно-кишечных заболеваний, препятствуют формированию раковых клеток, укрепляют иммунную систему. Основным составляющим веществом ФН выступает питьевая или минеральная вода, овощные или фруктовые соки, их смеси, молочные напитки.

Согласно ГОСТ Р 56543–2015 «Напитки функциональные. Общие технические условия» функциональный напиток–жидкий функциональный пищевой продукт на основе воды, содержащий один или несколько функциональных пищевых ингредиентов в количестве достаточном при систематическом употреблении для обеспечения благоприятного эффекта на физиологические функции организма человека, с добавлением или без добавления различных пищевых добавок и вкусоароматических веществ.

Таблица 1.

Варианты разработанных напитков

Table 1.

Variants of drinks

Ингредиенты напитков Ingredients	«Малиновый»	«Облепиховый»	«Калинка»	«Крыжовниковый»	«Боярынька»	«Апельсинка»	«Солодушка»	«Витаминный»
Сахар Sugar	+	+	+	+	+	+	+	+
Порошкообразный полисолодовый экстракт из гречихи, кукурузы, ячменя (ПСЭ) Powdered polymalt extract of buckwheat, corn, and barley (PSE)	+				+		+	
Порошкообразный полисолодовый экстракт из ячменя, гречихи, гороха (ППЭ-2) Powdered polymalt extract of barley, buckwheat, and peas (PPE 2)		+				+		
Порошкообразный солодовый экстракт из гречихи (ППСЭ) Powdered malt extract of buckwheat (PME)			+				+	
Порошкообразный солодовый экстракт из гороха (ПГСЭ) Powdered malt extract of peas (PME)				+			+	+
Дисперсия рыбьего коллагена Fish collagen dispersion	+	+	+	+	+	+	+	+
Пюре малиновое гомогенизированное Homogenized raspberry puree	+			+			+	+
Экстракт чабреца Thymus serpyllum L. Thyme extract (Thymus serpyllum L.)					+		+	
Экстракт шалфея лекарственного (Sálviaofficinális) Sage extract (Sálviaofficinális)	+				+			
Экстракт стевии (Stévia) Stevia extract (Stévia)					+		+	
Пюре облепиховое гомогенизированное Homogenized sea buckthorn puree		+				+		+
Пюре крыжовника гомогенизированное Homogenized gooseberry puree				+		+		
Пюре боярышника гомогенизированное Homogenized hawthorn puree			+		+			
Пюре калины гомогенизированное Homogenized viburnum puree			+					
Настой боярышника Hawthorn infusion					+			
Настой калины Viburnum infusion					+			
Кислота аскорбиновая Acid Ascorbic acid	+	+	+	+	+	+	+	+
Ароматизатор «Лесные ягоды» Forest Berry Flavoring							+	+
Ароматизатор пищевой «Апельсин» Orange Emulsion Food Flavoring						+		
Ароматизатор «Мятная карамель» Mint Caramel Flavoring					+			

Разработанные напитки (таблица 1) позволяют расширить ассортимент напитков функционального назначения с использованием рыбного сырья, получить продукты с высокими органолептическими показателями, сохраняющимися длительное время, высокой пищевой, биологической ценностью. Использование жидкой коллагеновой субстанции в качестве основы напитков при обогащении растительными источниками, биологически активными веществами придает ранозаживляющий эффект на слизистую желудочно-кишечного тракта. Заявленный эффект достигается за счет содержит в коллагеновой дисперсии высокого содержания пролина (0,175 мг/100 г) и оксипролина (0,161 мг/100 г), а также благодаря содержанию в настоях и соках незаменимых элементов, в том числе и витамина С, что в свою очередь доказывает эффективные свойства предлагаемой разработки безалкогольных напитков функционального назначения.

Полисолодовые экстракты обладают протекторными свойствами, способствуют уменьшению образования клеток с генетическими нарушениями и излечению организма от абберантных клеток, антимутагенные эффекты экстрактов можно объяснить свойствами содержащихся в них витаминов группы В и серосодержащих аминокислот (цистеина и метионина). В составе ПСЭ и ППЭ содержание витаминов В1 составляет 0,69–1,33 мг%, В2 0,22–1,26 мг%, В4 9,5–11,0 мг%, содержание витаминов С и Е невелико и находится в интервале 0,4–1,1, 0,64–0,72 мг% соответственно.

Сок малины благодаря большому содержанию витаминов (β-каротин, тиамин, рибофлавин, ниацин, пантотеновая, фолиевой, аскорбиновая кислоты, токоферол, филлохинон, флавоноиды, холин) и микроэлементов (К, Р, Са, Na, Mg, Fe, Se, Mn, Zn, Cu) снимает воспаление в суставах, укрепляет сердечную мышцу, очищает сосуды от холестериновых бляшек, нормализует артериальное давление, очищает кишечник от шлаков, токсинов и ядов, облегчает течение климакса у женщин, улучшает настроение, укрепляет нервную систему, снимает симптомы стресса, улучшает работу головного мозга, усиливает память, нормализует работу поджелудочной железы и поддерживает баланс сахара в крови, улучшает работу репродуктивных органов, предотвращает риск мужского бесплодия и повышает фертильность, систематическое употребление малины способствует укреплению иммунитета, а также снижению риска атеросклероза и раковых образований.

Экстракт шалфея *Salvia officinalis* благодаря содержанию эфирного масла, состоящего из D-α-пинена, цинеола (около 15%), α- и β-туйона, D-борнеола и D-камфоры, алкалоидов, флавоноидов, обладает иммуноукрепляющим свойством, применяется как противовоспалительное средство для многих органов, особенно для выделительной системы, противогрибковое средство. Антибактериальный эффект обеспечивает камфора в эфирном масле и витамины группы В. Шалфей восстанавливает клетки печени, устраняет вздутие, спазмы в кишечнике и метеоризм, улучшает пищеварительный процесс, способствует снижению веса, нормализует работу нервной системы, стимулирует умственную деятельность и улучшает память.

Чабрец *Thymus serpyllum* L. обладает бронхолитическими свойствами, а также свойствами, восстанавливающими эпителизацию тканей при заживлении ран, рубцов, ожогов

В соке облепихи содержится большое количество микроэлементов (Na, Mg, Fe, Si, Al, Mn, Mo), витаминов В1, В2, С, Е, К, флавоноидов, фолиевой кислоты, каротиноидов, бетаина, холина, кумарина, глюкозы, фруктозы и фосфолипидов, яблочной кислоты, жирного масла, маннита и кверцетина – вещества принадлежащего к группе витаминов Р. Кверцетин, он же рутин способствует в улучшении работы почек, отвечает за здоровую мышцу сердца, предупреждает раковые заболевания, дряхлость, повышает выносливость, излечивает остеопороз костных тканей. Входящие в плоды биологически активные вещества нормализуют работу щитовидной железы, кишечника, желчного пузыря. В облепихе содержится β-ситостерин – вещество, предотвращающее развитие склероза. Она восстанавливает силы, повышает уровень гемоглобина, поднимает тонус ослабленного болезнью организма. Содержащиеся в ягодах каротины и каротиноиды повышают зрительную функцию, оказывают положительное влияние на репродуктивную систему, ускоряют обновление и рост эпителиальных клеток. За счет большого количества аскорбиновой кислоты облепиховый сок активно регулирует процесс свертываемости крови, укрепляет стенки кровеносных сосудов, нормализует обмен веществ.

Сок крыжовника способен оказывать положительное воздействие на организм человека, предотвращая развитие многих серьезных патологий благодаря высокому содержанию йода, фолиевой кислоты. Ягоды крыжовника содержат до 13,5% сахаров, большая часть которых представлена легкоусвояемыми моносахарами,

до 2% свободных кислот (лимонной, яблочной и др.), более 1% пектиновых веществ, витамины С (до 54 мг%), Р (0,25 мг%), В и А. В золе ягод много фосфора, меди, железа, калия, натрия, кальция, магния. В зрелых плодах до 3,5% вещества составляет серотонин, который обладает не только успокаивающим и стимулирующим действием, но и является противораковым средством. При регулярном употреблении крыжовник способен укреплять сердце и кровеносные сосуды, тормозить развитие склероза, улучшать возможности памяти и внимания, затормаживать рост всевозможных опухолей. При гипертонии крыжовник понижает артериальное давление, снижает уровень «вредного» холестерина, обладает мочегонным, желчегонным и слабительным действием, останавливает кровотечения, ускоряет метаболизм, способствует похудению.

Сок и настой боярышника оказывают сосудорасширяющее действие, тонизирует сердечную мышцу, обеспечивают достаточное поступление кислорода, снижает частоту, устанавливает ритм, увеличивает силу сердечных сокращений, уменьшает возбудимость сердца, снимает его утомление, улучшают коронарный кровоток, мозговое кровообращение. Растение нормализует показатели свертываемости крови, уровень холестерина, предотвращает образование атеросклеротических бляшек. Оказывает седативное действие, снижает возбудимость нервной системы, способствует устранению бессонницы, помогает нормализовать сон. Антиоксидантное действие боярышника препятствует образованию опухолей различной природы, повышает иммунитет, помогает быстрее восстановить силы после перенесенных инфекционных заболеваний.

Экстракт стевии *Stévia* нормализует уровень сахара в крови, улучшает работу иммунной системы, нормализует работу нервной, сердечно-сосудистой и пищеварительной системы, обладает умеренным желчегонным действием, способствует снижению веса, артериального давления. За счет сладкого вкуса экстракта возможно снижение количество добавляемого в напиток сахарного сиропа.

Сок и настой калины богаты органическими кислотами: изовалериановой, уксусной, олеоновой, урсоловой, хлорогеновой, коричной, а также их производными. В большом количестве содержит антиоксиданты (флавоноиды).

В составе калины есть практически все известные витаминные и минеральные соединения. Витамин Р, К, С, калий, цинк и селен, содержатся в суточной дозе всего в 100 г. свежих плодов. Плоды калины укрепляют иммунитет, насыщают организм витаминами, омолаживают его, защищают от действия негативных экзогенных факторов. Улучшают работу нервной системы. Способны снижать давление, устранять спазмы, повышать качество пищеварения. Укрепляют сердечную мышцу, нормализуют проницаемость стенок сосудов. Обладают детоксицирующими, противопаразитарными, антибактериальными и противовоспалительными свойствами.

Результаты и обсуждение

Исходя из вышесказанного, были проведены исследования и опыты с коллагенсодержащими напитками, результаты которых представлены в таблице 2.

Такие напитки способны удовлетворять полностью или частично определенным требованиям: обладать антидотным свойством; ускорять или замедлять метаболизм; ускорять выведение вредных веществ из организма; повышать общую устойчивость организма; воздействовать с помощью отдельных пищевых веществ на состояние наиболее поражаемых органов; компенсировать повышенные затраты пищевых и биологически активных веществ, связанных с учетом рациона питания. Свойства напитка формирует не только коллаген, но и отобранные в результате информационного поиска компоненты. Облепиха оказывает противовоспалительное и регенерирующее действие, помогая заживлять эрозии язвы. Содержащиеся в ней вещества стимулируют работу всех желез внутренней секреции, что благоприятно сказывается на работе всего организма. Облепиха показана при гастритах. Кроме эффекта снижения кислотности желудка, она усиленно используется в лечении язв желудка и 12-перстной кишки, при снижении аппетита, запорах. Ее ягоды полезны свойством снижать уровень холестерина, они мягко и эффективно очищают кишечник от вредных веществ, восстанавливают микрофлору и перистальтику благодаря входящим в состав пектиновым веществам, водорастворимой клетчатке. Плоды эффективно снимают различные воспаления, стимулируют процессы регенерации, в том числе во внутренних органах. Такие свойства облепихи усиливают и дополняют свойства коллагеновых белков.

Таблица 2.

Сравнительная характеристика и органолептические свойства коллагенсодержащих напитков

Table 2.

Comparative characteristics and organoleptic properties of collagen-containing drinks

Название напитка Name	Наименование показателя Indicator				
	внешний вид, консистенция appearance, consistency	цвет color	аромат aroma	вкус taste	пенообразование foaming
«Малиновый»	непрозрачная жидкость, допускается осадок и взвеси, обусловленных особенностями используемого сырья opaque liquid, sediment and suspended matter are allowed, due to the characteristics of the raw materials used	розовый pink	малины raspberry	малины, кисло-сладкий Raspberry, sweet and sour	наблюдается вспенивание, пенообразование имеет нестабильный характер, в течение 4–5 секунд пропадает foaming is observed, foaming is unstable and disappears within 4–5 seconds
«Облепиховый»		желтый yellow	облепихи sea buckthorn	облепихи кисло-сладкий Sea buckthorn, sweet and sour	
«Калинка»		от светло-розового до оранжевого Light pink to orange	лесных ягод wild berries	травянистый, кисло-сладкий Herbaceous, sweet and sour	
«Крыжовниковый»		светло-желтый с зеленоватым оттенком Light yellow with a greenish tint	слабый малиновый weak raspberry	кисло-сладкий Sweet and sour	
«Боярынька»		от светло-розового до оранжевого Light pink to orange	мятно-карамельный mint-caramel	травянистый, кисло-сладкий Herbaceous, sweet and sour	
«Апельсинка»		ярко-оранжевый Bright orange	апельсиновый orange	апельсиновый Orange	
«Солодушка»		светло-розовый Light pink	лесных ягод wild berries	лесных ягод Wild berry	
«Витаминный»		светло-оранжевый Light orange	лесных ягод wild berries	малиново-облепиховый Raspberry-sea buckthorn	

Определение органолептических показателей коллагенсодержащих напитков «Малиновый», «Облепиховый», «Калинка», «Крыжовниковый», «Боярынька», «Апельсинка», «Солодушка», «Витаминный» проводилось по ГОСТ 6687.5–86 «Продукция безалкогольной промышленности. Методы определения органолептических показателей и объема продукции».

Определяли сроки годности напитков, для чего их помещали на хранение при температуре 10 ± 2 °C, относительной влажности воздуха $70 \pm 5\%$, в потребительской герметичной упаковке на 6 месяцев.

Результаты анализа напитков в течение срока хранения подтверждают стабильность показателей испытываемых образцов, что позволило

выявить срок хранения напитков 6 месяцев при условиях хранения: температура 12 ± 2 °C и относительная влажность воздуха $70 \pm 5\%$.

Заключение

Основываясь на результатах исследований, авторами разработаны и предлагаются коллагенсодержащие напитки «Малиновый», «Облепиховый», «Калинка», «Крыжовниковый», «Боярынька», «Апельсинка», «Солодушка», «Витаминный».

Положительной оказалась лабораторно-опытная апробация новой продукции, отличающейся высоким содержанием белков и хорошими потребительскими свойствами.

Литература

- Новикова И.В., Антипова Л.В., Романюк Т.И. и др. Разработка технологии напитков типа «Шорли» с коллагеном // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3. С. 50–57. doi: 10.20914/2310-1202-2020-3-50-57
- Новикова И.В., Гребенчиков А.В., Романюк Т.И. и др. Разработка безалкогольных напитков на основе растительного сырья и коллагена и исследование их доклинической безопасности в опытах in vivo // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2025. № 1 (399). С. 108–114.
- Антипова Л.В., Сторублевцев С.А., Гетманова А.А. Коллагенсодержащие напитки для функционального питания // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. № 3. С. 97–103. doi: 10.20914/2310-1202-2018-3-97-103

- 4 Мезенова Н.Ю., Семенова О.А., Петрова Е.К. и др. Получение и применение коллагеновых композиций в технологии функциональных пищевых продуктов // Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: сборник статей, 2021. С. 341–346.
- 5 Пехтерева Н.Т. Функциональные напитки на основе растительного сырья // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2004. № 1. С. 79–80.
- 6 Al Hajj W., Smith A., Johnson B. et al. Hydrolyzed collagen: Exploring its applications in the food and beverage industries and assessing its impact on human health – A comprehensive review // Heliyon. 2024. V. 10. № 16. P. e38562.
- 7 Lin Y.K., Chen H.M., Wang L.J. et al. Anti-Aging Effects of Hydrolyzed Collagen Beverage with Herbal Extracts on Facial Skin: A Double-Blind, Randomized, Placebo-Controlled Trial // Journal of Food Science and Nutrition. 2022. V. 8. № 128. P. 1–10.
- 8 Aslanova M.A., Semenova A.A., Derevitskaya O.K. Formulating a functional drink with antiosteoporosis effects // Foods and Raw Materials. 2021. V. 9. № 2. P. 215–224.
- 9 Afifah A., Nugraha A.W., Larassati D.P. The Application of Collagen Extract for Collagen Drink: A Review // Jurnal Agroindustri Pangan. 2023. V. 2. № 2. P. 28–43.
- 10 Ma G., Dunchenko N.I., Voloshina E.S. The Use of Collagens in Structured Dairy Products Technologies // Food Science and Technology. 2025. V. 13. № 1. P. 26–35.
- 11 Evrendilek G.A. Collagen: Structure, Synthesis and Common Use // Dates. 2022. V. 2. P. 1–10.
- 12 Sukhikh S., Ivanova S., Lukin A. et al. Comparative analysis of collagen-containing waste biodegradation, amino acid, peptide and carbohydrate composition of hydrolysis products // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 23. P. 11511.
- 13 Dille M.J., Haug I.J., Draget K.I. Gelatin and collagen // Handbook of Hydrocolloids / Ed. by G.O. Phillips, P.A. Williams. 3rd ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2021. P. 1073–1097.
- 14 Pates G., Miller R., Davies J. et al. UC-II® undenatured type II collagen data show retention during functional food and beverage prototype processing // Data in Brief. 2023. V. 48. P. 109216.
- 15 Musayeva F., Özcan S., Kaynak M.S. A review on collagen as a food supplement // Journal of Pharmaceutical Technology. 2022. V. 3. № 1. P. 7–29.
- 16 Кайраткызы Ж., Байгазиева Г.И. Разработка рецептуры функционального напитка на основе облепихи с добавлением сахарозаменителя и коллагена // Вестник Алматинского технологического университета. 2025. Т. 148. № 2. С. 34–39.
- 17 Косенко И.С., Новикова О.П., Смирнов В.В. и др. Пищевая ценность и сбалансированность функциональных продуктов для геродиетического питания // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 87. № 1. С. 213–222.
- 18 Wu Y., Li H., Zhang M. et al. Oral collagen-based supplement as a bioactive component in functional foods // Collagen and Leather. 2025. V. 7. № 1. P. 15.
- 19 Verkhivker Y., Myroshnichenko O., Pavlenko S. Development of collagen-containing drinks // Food Science and Technology. 2021. V. 15. № 2. P. 78–85.
- 20 Holwerda A.M., van Loon L.J.C. The impact of collagen protein ingestion on musculoskeletal connective tissue remodeling: a narrative review // Nutrition Reviews. 2022. V. 80. № 6. P. 1497–1514.

References

- 1 Novikova I.V., Antipova L.V., Romanyuk T.I. et al. Development of technology for "Shorley"-type drinks with collagen. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 50–57. doi: 10.20914/2310-1202-2020-3-50-57 (in Russian)
- 2 Novikova I.V., Grebenshchikov A.V., Romanyuk T.I. et al. Development of non-alcoholic beverages based on plant raw materials and collagen and study of their preclinical safety in in vivo experiments. Proceedings of Universities. Food Technology. 2025. no. 1 (399). pp. 108–114. (in Russian)
- 3 Antipova L.V., Storablevtsev S.A., Getmanova A.A. Collagen-containing beverages for functional nutrition. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018. no. 3. pp. 97–103. doi: 10.20914/2310-1202-2018-3-97-103 (in Russian)
- 4 Mezenova N.Yu., Semenova O.A., Petrova E.K. et al. Production and application of collagen compositions in the technology of functional food products. Food technologies of the future: innovations in the production and processing of agricultural products: collection of articles. Ed. by [Editor's Name]. [City]: [Publisher], 2021. pp. 341–346. (in Russian)
- 5 Pekhtereva N.T. Functional beverages based on plant raw materials. Proceedings of Universities. Food Technology. 2004. no. 1. pp. 79–80. (in Russian)
- 6 Al Hajj W., Smith A., Johnson B. et al. Hydrolyzed collagen: Exploring its applications in the food and beverage industries and assessing its impact on human health – A comprehensive review. Heliyon. 2024. vol. 10. no. 16. p. e38562. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e38562
- 7 Lin Y.K., Chen H.M., Wang L.J. et al. Anti-Aging Effects of Hydrolyzed Collagen Beverage with Herbal Extracts on Facial Skin: A Double-Blind, Randomized, Placebo-Controlled Trial. Journal of Food Science and Nutrition. 2022. vol. 8. no. 128. pp. 1–10.
- 8 Aslanova M.A., Semenova A.A., Derevitskaya O.K. Formulating a functional drink with antiosteoporosis effects. Foods and Raw Materials. 2021. vol. 9. no. 2. pp. 215–224. doi: 10.21603/2308-4057-2021-2-215-224
- 9 Afifah A., Nugraha A.W., Larassati D.P. The Application of Collagen Extract for Collagen Drink: A Review. Jurnal Agroindustri Pangan. 2023. vol. 2. no. 2. pp. 28–43. doi: 10.31941/agroindustri.v2i2.3327
- 10 Ma G., Dunchenko N.I., Voloshina E.S. The Use of Collagens in Structured Dairy Products Technologies. Food Science and Technology. 2025. vol. 13. no. 1. pp. 26–35.
- 11 Evrendilek G.A. Collagen: Structure, Synthesis and Common Use. Dates. 2022. vol. 2. pp. 1–10. doi: 10.57762/date.v2i1.15

12 Sukhikh S., Ivanova S., Lukin A. et al. Comparative analysis of collagen-containing waste biodegradation, amino acid, peptide and carbohydrate composition of hydrolysis products. *Applied Sciences*. 2021. vol. 11. no. 23. p. 11511. doi: 10.3390/app112311511

13 Dille M.J., Haug I.J., Draget K.I. Gelatin and collagen. *Handbook of Hydrocolloids*. 3rd ed. Ed. by G.O. Phillips, P.A. Williams. Duxford: Woodhead Publishing, 2021. pp. 1073–1097. doi: 10.1016/B978-0-12-820104-6.00006-7

14 Pates G., Miller R., Davies J. et al. UC-II® undenatured type II collagen data show retention during functional food and beverage prototype processing. *Data in Brief*. 2023. vol. 48. p. 109216. doi: 10.1016/j.dib.2023.109216

15 Musayeva F., Özcan S., Kaynak M.S. A review on collagen as a food supplement. *Journal of Pharmaceutical Technology*. 2022. vol. 3. no. 1. pp. 7–29. doi: 10.47277/jpt/3(1)29

16 Kairatkyzy Zh., Baigazieva G.I. Development of a recipe for a functional beverage based on sea buckthorn with the addition of a sweetener and collagen. *Bulletin of the Almaty Technological University*. 2025. vol. 148. no. 2. pp. 34–39. (in Russian)

17 Kosenko I.S., Novikova O.P., Smirnov V.V. et al. Nutritional value and balance of functional products for gerodietetic nutrition. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 213–222. (in Russian)

18 Wu Y., Li H., Zhang M. et al. Oral collagen-based supplement as a bioactive component in functional foods. *Collagen and Leather*. 2025. vol. 7. no. 1. p. 15. doi: 10.1186/s42825-025-00141-5

19 Verkhivker Y., Myroshnichenko O., Pavlenko S. Development of collagen-containing drinks. *Food Science and Technology*. 2021. vol. 15. no. 2. pp. 78–85.

20 Holwerda A.M., van Loon L.J.C. The impact of collagen protein ingestion on musculoskeletal connective tissue remodeling: a narrative review. *Nutrition Reviews*. 2022. vol. 80. no. 6. pp. 1497–1514. doi: 10.1093/nutrit/nuab083

Сведения об авторах

Татьяна С. Ковалева к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tanyakova2501@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3531-3811>

Татьяна И. Романюк к.т.н., доцент, кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tafursova@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8813-9901>

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@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1416-0297>

Светлана Ф. Яковлева к.т.н., доцент, кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, svetlana.yakovleva.68@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3686-9966>

Елена А. Коротких к.т.н., доцент, кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, dobruly@bk.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5951-7085>

Софья С. Дядищева ассистент, кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, miss.diadischewa@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-7765-040X>

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

Tatiana S. Kovaleva Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, fermentation and sugar production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tanyakova2501@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3531-3811>

Tatiana I. Romanyuk Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, fermentation and sugar production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tafursova@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8813-9901>

Ludmila V. Antipova Dr. Sci. (Engin.), professor, animal products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, antipova.l54@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1416-0297>

Svetlana F. Yakovleva Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, biochemistry and biotechnology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, svetlana.yakovleva.68@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3686-9966>

Elena A. Korotkikh Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, fermentation and sugar production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, dobruly@bk.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5951-7085>

Sofia S. Dyadishcheva assistant, fermentation and sugar production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, miss.diadischewa@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-7765-040X>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/11/2025	После редакции 20/11/2025	Принята в печать 08/12/2025
Received 03/11/2025	Accepted in revised 20/11/2025	Accepted 08/12/2025

Обоснование применения хитина и хитозана для псевдокапсулирования рыбных комбикормов

Константин В. Мишинеv	¹	mishinev.k@yandex.ru	 0009-0006-0202-7700
Александр Н. Остриков	¹	ostrikov27@ya.ru	 0000-0002-2335-0017
Максим В. Копылов	¹	kopylov-maks@yandex.ru	 0000-0003-2678-2613
Игорь С. Богомолов	²	igor-bog@ya.ru	 0000-0001-8172-6919

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

² ВНИИ комбикормовой промышленности, пр-т Труда, 91, г. Воронеж, 394026, Россия

Аннотация. В статье представлено комплексное научное и технологическое обоснование применения хитина и его производного хитозана для создания защитных инертных оболочек (псевдокапсул) на гранулах рыбных комбикормов. Актуальность работы обусловлена необходимостью решения ключевых проблем современной аквакультуры, связанных с потерями водорастворимых нутриентов, окислением липидов и микробиологической порчей кормов, особенно при использовании альтернативных, в том числе растительных, компонентов с высоким содержанием жиров. Авторы доказывают, что хитин, как высокомолекулярный аминополисахарид, полученный из панцирей ракообразных, обладает уникальным сочетанием свойств, делающих его идеальным материалом для псевдокапсулирования. К ним относятся химическая инертность, механическая прочность, термостойкость, нетоксичность, биоразлагаемость и, что особенно важно, выраженными барьерные и антимикробные свойства. Образующаяся хитиновая пленка предотвращает вымывание витаминов, аминокислот и минеральных веществ в воду, защищает жиры от прогоркания, подавляет развитие патогенной микрофлоры (включая золотистый стафилококк) и тем самым существенно увеличивает срок хранения корма. В технологическом аспекте статья описывает усовершенствованный процесс производства, включающий экструзию, вакуумную пропитку гранул жидкими компонентами и финишное нанесение хитиновой оболочки. Это позволяет программировать свойства корма, такие как плавучесть и скорость погружения, и обеспечивает высокую водостабильность гранул, что критически важно для кормления ценных видов рыб (осетровых, лососевых). Практическая ценность исследования подтверждена результатами производственных испытаний на осетровых рыбах. Применение псевдокапсулированных комбикормов позволило повысить усвояемость питательных веществ на 10–12%, увеличить привесы на 10–12% и снизить конверсию корма на 15%. Экономический эффект выразился в сокращении затрат корма на единицу продукции на 8–12%. Представленные рецептуры стартового и производственного кормов соответствуют физиологическим потребностям рыб, а микробиологический анализ подтвердил их экологическую чистоту и улучшенные санитарные показатели. Таким образом, исследование демонстрирует, что псевдокапсулирование с использованием хитина и хитозана является эффективным инновационным решением. Оно направлено на повышение питательной ценности, сохранности и экономической эффективности комбикормов, что способствует устойчивому развитию индустриальной аквакультуры.

Ключевые слова: хитин, хитозан, псевдокапсулирование, рыбный комбикорм, инертные оболочки, показатели качества, технология.

Rationale for the use of chitin and chitosan for pseudo-encapsulation of fish feed

Konstantin V. Mishinev	¹	mishinev.k@yandex.ru	 0009-0006-0202-7700
Alexander N. Ostrikov	¹	ostrikov27@ya.ru	 0000-0002-2335-0017
Maxim V. Kopylov	¹	kopylov-maks@yandex.ru	 0000-0003-2678-2613
Igor S. Bogomolov	²	igor-bog@ya.ru	 0000-0001-8172-6919

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

² All-Russian Research Institute of Feed Industry, Truda Ave., 91, Voronezh, 394026, Russia

Abstract. This article presents a comprehensive scientific and technological rationale for the use of chitin and its derivative chitosan to create protective inert shells (pseudocapsules) on fish feed pellets. The relevance of this work stems from the need to address key issues in modern aquaculture related to the loss of water-soluble nutrients, lipid oxidation, and microbiological spoilage of feed, particularly when using alternative, high-fat ingredients, including plant-based ones. The authors demonstrate that chitin, a high-molecular-weight aminopolysaccharide obtained from crustacean shells, possesses a unique combination of properties that make it an ideal material for pseudoencapsulation. These include chemical inertness, mechanical strength, heat resistance, non-toxicity, biodegradability, and, crucially, pronounced barrier and antimicrobial properties. The resulting chitinous film prevents the leaching of vitamins, amino acids, and minerals into water, protects fats from rancidity, inhibits the growth of pathogenic microflora (including *Staphylococcus aureus*), and thereby significantly increases the shelf life of the feed. In terms of technology, the article describes an improved production process, including extrusion, vacuum impregnation of pellets with liquid components, and final application of a chitinous coating. This allows for programmable feed properties, such as buoyancy and sinking speed, and ensures high water stability of the pellets, which is critical for feeding valuable fish species (sturgeon, salmon). The practical value of the study is confirmed by the results of production trials on sturgeon. The use of pseudoencapsulated compound feed increased nutrient digestibility by 10-12%, increased weight gain by 10-12%, and reduced feed conversion by 15%. The economic effect resulted in a reduction in feed costs per unit of production by 8-12%. The presented starter and grower feed formulations meet the physiological needs of fish, and microbiological analysis confirmed their environmental friendliness and improved sanitary properties. Thus, the study demonstrates that pseudoencapsulation using chitin and chitosan is an effective innovative solution. It aims to improve the nutritional value, shelf life, and cost-effectiveness of compound feed, thereby contributing to the sustainable development of industrial aquaculture.

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

Для цитирования

Мишинеv К.В., Остриков А.Н., Копылов М.В., Богомолов И.С. Обоснование применения хитина и хитозана для псевдокапсулирования рыбных комбикормов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 63–69. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-63-69

For citation

Mishinev K.V., Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Bogomolov I.S. Rationale for the use of chitin and chitosan for pseudo-encapsulation of fish feed. Vestnik VGUIIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 63–69. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-63-69

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

Введение

Ограничения используемых в промышленности технологий производства комбикормов для ценных пород рыб с использованием рыбной муки и рыбьего жира не позволяют обеспечить высокие темпы развития аквакультуры. Среди наиболее перспективных направлений технологий при производстве кормов для аквакультуры эксперты называют применение альтернативных источников протеина, в т. ч. растительного происхождения. В дальнейшем можно ожидать сокращения использования в кормах рыбной муки до 10% при увеличении растительного протеина до 69%, а новых компонентов – до 10% [9].

Современные технологии производства аквакомбикормов для ценных пород рыб основаны на использовании экструзионной обработки многокомпонентной смеси для придания различной плавучести и регулируемой скорости погружения получаемого комбикорма. Экструзионная технология позволит вводить в продукт большое количество жира – до 35–40%, достичь высокого (до 90%) уровня расщепления крахмала. Экструдированный продукт имеет высокую водостойкость, сохраняет свою форму [3]. Применение более глубокой гидробаротермической обработки совместно с вакуумным эмульгированием жидких компонентов и жира позволит выйти на создание комбикормов с программируемыми свойствами, максимально адаптированные для разных пород ценных рыб [2, 9].

В своей работе Parker R. [13] проанализировал влияние включения побочных продуктов животного происхождения в комбикорма для атлантического лосося. Автор пришел к выводу, что такое использование ресурсов может способствовать снижению экологической нагрузки в аквакультуре, однако одновременно влияет и на качество конечной продукции. Величина этого эффекта зависит от метода распределения, выбранного для обработки продуктов и побочных продуктов в системах кормления. Производство австралийского лосося (*Salmo salar*) характеризуется возможностью широкого включения в корма побочных продуктов животного происхождения (птицеводства и мясного скотоводства), что предлагает решения для снижения экологической нагрузки, связанной с утилизацией этих ресурсов.

Ученые [11] представили исследования, в которых оценивалась возможность кормления готового корма для молодых озерных осетровых *Acipenser fulvescens* и определялась оптимальная скорость подачи мягко-влажного корма на показатели роста и состав всего тела рыбы. Оптимальные скорости кормления, основанные

на удельном темпе роста, оценивались как 7,6 и 6,2% для осетровых осей весом 3,5 и 7,8 г соответственно.

Коллективом под руководством Liland N.S. [12] исследовали влияние пищевых растительных масел на накопление липидов в кишечнике у атлантического лосося. Рыбу кормили комбикормом с высоким содержанием растительного белка и рыбьего жира, заменяемого оливковым маслом, рапсовым маслом, либо соевым маслом. Были отмечены задержки переноса липидов в рапсовом масле, возможно, вызванные высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот.

В научной литературе представлены данные [10] об изучении влияния плодов шиповника и сафлора (*Rose hip (Rosa canina)* и *Safflower (Carthamus tinctorius)*) на показатели роста, гематологические, биохимические параметры и врожденный иммунный ответ у молодой белуги *Huso huso*. Рыбы ($26,3 \pm 0,4$ г) выделялись в 15 резервуаров (20 рыб на один резервуар), а трижды группы получали контрольную диету или диеты, содержащие 1 и 2% лекарственных трав, соответственно. Коэффициент конверсии корма (FCR), удельный темп роста (SGR) и коэффициент состояния (CF) не выявили значительных различий ($P > 0,05$) у рыб при травяных диетах. Значительные различия наблюдались в отношении количества лейкоцитов (WBC) и гемоглобина (Hb) среди диетических методов лечения. Уровни сывороточной аланинаминотрансферазы (АЛТ) и аспаратаминотрансферазы (АСТ) были значительно ниже в дозированных группах диеты по сравнению с контролем. Врожденные иммунные реакции (активность лизоцима и АСН50) были значительно выше у 2% рыбы, питавшейся сафлором, по сравнению с другими группами. Полученные данные свидетельствуют о том, что включение лекарственных трав в рацион может служить эффективной кормовой добавкой, положительно влияющей на физиологическое состояние и усиливаемой иммунный ответ у персидского осетра.

Было установлено [14], что включение в рацион рапсового и сафлорового масел влияет на показатели роста и профиль жирных кислот русского осетра (*Acipenser gueldenstaedtii*). При этом они заменили 50% рыбьего жира (FO) рапсовым маслом (CO) и сафлоровым маслом (SFO) в рационах русского осетра. Были составлены две изопротеиновые (48%) и изолидные (12%) диеты, объединяющие два источника масла (50% рыбьего жира + 50% рапсовым маслом или 50% рыбьего жира + 50% сафлорового масла). Диеты скармливали трем группам рыб в течение 15 недель дважды в день. При этом значимых

различий между группами, получавшими рапсовое (СО) и сафлоровое (СФО) масла, по таким показателям, как прирост массы, удельная скорость роста, коэффициент конверсии корма и коэффициент эффективности белка, выявлено не было. Таким образом, частичная (50%) замена рыбьего жира на СО или СФО в рационе осетровых не оказывает негативного влияния на их рост, эффективность использования корма и жирнокислотный состав мышечной ткани.

Вышеприведенный анализ показывает, что доминирующим направлением повышения качества и усвояемости комбикормов для рыб является относительно высокое содержание липидов. Однако, для предотвращения прогоркания жиров необходимы технологии нанесения защитных оболочек, которые сводили к минимуму процессы окисления жиров, увеличивая тем самым продолжительность их хранения.

Предлагаемые многими исследователями [2–4, 6–8, 13, 14] научно-обоснованные полноценные рецептуры комбикормов для рыб имеют серьезный недостаток: содержащие в них питательные компоненты, минеральные и биологически активных веществ легко растворимы в воде. При их внесении в воду такие компоненты относительно быстро растворяются, переходя в жидкую фазу и снижая тем самым их количество, необходимое для полноценного питания рыб.

Отсутствие сбалансированных, высокоусвояемых комбикормов для ценных пород рыб создает трудности для воспроизводства и выращивания популяций ценных видов рыб – осетровых, сиговых, лососевых и других [2]. Получение псевдокапсулированных комбикормов предотвращает перенос водорастворимых веществ из корма в воду и обеспечивает их поступление в желудочно-кишечный тракт рыб [4, 5].

Анализ приведенных данных показывает, что недостаточное изучение общих закономерностей процессов получения псевдокапсулированных кормов рыб сдерживает использование новых, перспективных способов и разработку на их основе эффективных технологий, позволяющих увеличить не только усвояемость комбикормов, но и существенно повысить сроки их хранения. Поэтому важное значение приобретают задачи серьезного решения вопросов разработки научно обоснованных режимов осуществления технологических процессов и аппаратного оформления технологий получения псевдокапсулированного комбикорма.

Материалы и методы

Выполненные аналитические исследования позволили выявить и обосновать выбор в качестве инертного носителя хитина – высокомолекулярного аминополисахарида, который является основным компонентом наружного скелета (панцирь и клешни) членистоногих и входит в состав клеточных стенок грибов, ряда бактерий и сине-зелёных водорослей.

Хитин ($C_8H_{13}NO_5$)_n – биополимер группы азотсодержащих полисахаридов из остатков N-ацетилглюкозамина, связанных между собой β-(1→4)-гликозидными связями. Его отличительными особенностями являются: нерастворимость в воде из-за высокой степени кристалличности и прочной системы водородных связей, механическая прочность, термостойкость (устойчивость к высоким температурам), химическая инертность (он устойчив к воздействию кислот и щелочей при умеренных температурах), нетоксичность и биоразлагаемость, а также он обладает противомикробными свойствами [7].

При гидролизе хитина с концентрированной щелочью (NaOH) образуется хитозан, который представляет собой линейный полимер, состоящий из звеньев D-глюкозамина и оставшихся звеньев N-ацетилглюкозамина, соединённых β-(1,4)-гликозидными связями [8].

Чтобы получить хитин в чистом виде, из содержащих его органических веществ удаляют белок, кальций и другие минералы, переводя их в растворимую форму. В результате получается хитиновая крошка. Из-за способности хитина к абсорбированию покрытие из него предотвращает потерю влаги. Снижение активности воды на поверхности гранул комбикорма увеличивает время его хранения. Кроме того, хитозановая пленка понижает скорость распространения микробов в комбикорме, подавляет появление бактерии золотистого стафилококка и повышает продолжительность хранения, пленка из хитозана является практически прозрачной упаковкой.

Для оценки физико-механических свойств псевдокапсулированных комбикормов определяли следующие показатели: отбор проб – по ГОСТ 13496.0; объемную массу и угол естественного откоса – по ГОСТ 28254, гранулометрический состав частиц – по ГОСТ 13496.8. массовую долю белка в комбикорме методом Кьельдаля – по ГОСТ 13496.4–93, массовую долю сырого жира в комбикорме – по ГОСТ 13496.15–2016; определение запаха – по ГОСТ 13496.13; определение массовой доли влаги – по ГОСТ 13496.3; определение крошимости – по ГОСТ 28497; определение водостойкости – по ГОСТ 28758, наличие патогенной микрофлоры (ГОСТ 31708, 31878).

Твердость псевдокапсулированных гранул (H) определялась по отношению максимальной силы (F), разделенной на средний диаметр анализируемой гранулы (d). Полученные значения твердости аппроксимировались средними значениями по всем проведенным опытам.

Плавающеесть псевдокапсулированных гранул определялась следующим образом. В стеклянный сосуд диаметром 200 мм с 4 л воды осторожно помещались пятьдесят гранул. Плавающие гранулы были подсчитаны после 30 с. В зависимости от полученной количества плавающих гранул образцы классифицировались следующим образом: если количество плавающих гранул было менее 30%, то считали, что это тонущие гранулы, если от 30% до 70% – то полуплавающие гранулы и если более 70% – то плавающие гранулы.

Для определения прочности 350 г псевдокапсулированных гранул были просеяны на рассеве с размером отверстий от 1,0 мм до 7,1 мм. Во всех опытах измельченные гранулы составляли менее 0,1% от начальной массы образца.

Результаты

Технология производства псевдокапсулированного акваорма для ценных пород рыб, позволяющая получать тонущие, медленно тонущие и плавающие корма, включала следующие основные операции: формирование исходной смеси компонентов комбикорма в соответствие с заданной рецептурой, смешивание, влаготепловая обработка в кондиционере-пропаривателе, экструдирование, высушивание-охлаждение экструдированных гранул с влажностью 20–25% до влажности 8%. Затем гранулы помещались в вакуумный напылитель, в котором создавался вакуум 200–300 мбар. После этого на поверхность гранул наносились жидкие компоненты: (белково-витаминно-липидный комплекс, улучшители, ароматизаторы, и т. д.), в количестве до 40%. Далее в вакуумный напылитель подавался воздух, под давлением которого жидкие компоненты проникают в поры гранул. При этом поверхность гранул комбикорма покрывается маслом, которое поступают по капиллярам вглубь гранул [3]. Вакуумная пропитка гранул маслом придает им эстетичный вид с однородной выровненной поверхностью, более эластичной оболочкой, лучше защищенной от истирания.

На завершающем этапе вводились инертные оболочки для нанесения их на наружную поверхность гранул. Нанесение инертных оболочек

на поверхность экструдированных гранул придают медленно тонущим и плавающим кормам для ценных пород рыб высокую стабильность в воде.

Объектом исследования являлись псевдокапсулированные комбикорма для осетровых рыб: стартовый для рыб массой от 5 г до 100 г [1] и производственный для рыб массой от 100 г и более. За основу были взяты рецепты рыбных комбикормов, разработанные проф. Пономаревым С.В. [9], которые были доработаны в соответствие с технологией вакуумного напыления [2, 3].

При корректировке состава рецептов псевдокапсулированных комбикормов использовали известные данные о потребности рыб в протеине, липидах, углеводах, минеральных веществах, а также в незаменимых аминокислотах [9].

Были проведены исследования по определению эффективности скармливания псевдокапсулированных комбикормов в кормлении осетровых рыб на крестьянском фермерском хозяйстве (КФХ) Малахов А.Е., которые показали, что их применение способствует снижению затрат корма на единицу произведенной продукции на 8–12% за счет лучшей переваримости питательных веществ, повышает усвояемость рыбами комбикормов на 10–12% и привесы рыб на 10–12% и снижают конверсию корма на 15%.

В зависимости от стадий развития осетровых рыб использовались стартовый комбикорм, предназначенный для молоди массой около 5 г, обладающих к началу активного питания пищеварительной системой, и производственный комбикорм для рыб массой свыше 100 г.

При этом стартовые комбикорма должны содержать не менее 45–50% сырого протеина, 11–15% жира, 15–20% безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ), клетчатки не более 2%, 10–12% минеральных веществ и 12–15 тыс. кДж переваримой энергии на 1 кг корма, а производственные корма – не менее 40–45% протеина, 7–15% жира, 20–25% БЭВ, не более 3% клетчатки, 10–15% минеральных веществ и не менее 10–12 тыс. кДж переваримой энергии на 1 кг кормосмеси [9].

Всем этим требованиям удовлетворяют псевдокапсулированные комбикорма для осетровых рыб, рецептуры которых приведены в таблице 1.

Качество псевдокапсулированных комбикормов для ценных пород рыб оценивали по микробиологическим показателям (таблица 2).

Таблица 1.

Рецепты и основные показатели псевдокапсулированных комбикормов, %

Table 1.

Recipes and main indicators of pseudo-encapsulated compound feeds, %

Компоненты Ingredients	Рецепт комбикорма для осетровых Recipe	
	стартовых start	производственных production
Мука рыбная Fishmeal	42	37
Мука мясокостная Meat and bone meal	12	3,4
Мука кровяная Blood meal	2	5
Мука водорослевая Seaweed meal	–	–
Обрат сухой Dried whey	–	–
Дрожжи кормовые Feed yeast	10	9
Пшеница мелкого помола Finely ground wheat	10	12,8
Шрот соевый Soybean meal	10	19,2
Витазар Vitazar	5	5
Рыбий жир Fish oil	–	3
Масло растительное Vegetable oil	–	3
Глютен Gluten	12	–
Фосфатиды Phosphatides	–	–
Премикс ПФ-2В PF 2B premix	1,0	1,0
Хитозан Chitosan	1,0	1,6
Содержание основных питательных веществ, % Content of essential nutrients, %		
Сырой протеин Crude protein	45,5	44,3
Сырой жир Crude fat	9,7	10,0
Сырая клетчатка Crude fiber	22,9	32,4
БЭВ Natural extracts	2,2	1,4
Лизин Lysine	2,5	2,4
Метионин+цистин Methionine + cystine	1,3	1,2
Триптофан Tryptophan	14,3	13,8
Обменная энергия, МДж/кг Metabolizable energy, MJ/kg	45,5	44,3

Таблица 2.

Микробиологические показатели псевдокапсулированных комбикорма

Table 2.

Microbiological parameters of pseudo-encapsulated compound feed

Показатель	Допустимые значения	Образец
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более QMAFAnM, CFU/g, no more than	1×1E4	0,4×1E4
масса продукта (г), в которой не допускаются: Product weight (g), in following are not allowed:		
БГКП (колиформы) Coliforms	1,0	–
Патогенные, в т. ч. сальмонеллы Pathogenic, including Salmonella	25	–
Vсereus Vсereus	0,1	–
Плесени, КОЕ/г, не более Molds, CFU/g, no more than	50	–

Анализ данных, приведенных в таблице 2 показывает, что предлагаемый псевдокапсулированный комбикорм экологически чистый, имеет улучшенное санитарное состояние.

Заключение

1. Использование в качестве инертного носителя для псевдокапсулирования гранул комбикорма хитина и хитозана показало, что они не растворимы в воде имеют высокую механическую прочность, устойчивость к высоким температурам, нетоксичность и биоразлагаемость, и обладают противомикробными свойствами. Установлено, что хитиновая пленка понижает скорость распространения микробов в комбикорме, подавляет

появление бактерии золотистого стафилококка и повышает продолжительность хранения.

2. Проведенные исследования по определению эффективности скармливания псевдокапсулированных комбикормов в кормлении осетровых рыб показали, что их применение способствует снижению затрат корма на единицу произведенной продукции на 8–12% за счет лучшей переваримости питательных веществ, повышает усвояемость рыбами комбикормов на 10–12% и привесы ценных пород рыб на 10–12% и снижают конверсию корма на 15%.

3. Предлагаемый псевдокапсулированный комбикорм экологически чистый, имеет улучшенное санитарное состояние.

Литература

- 1 Абросимова К.С., Абросимова Н.А., Васильева Л.М. Проблемы выращивания личинок и мальков осетровых рыб в интенсивной аквакультуре и пути их решения // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-9. С. 1882–1886.
- 2 Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Богомолов И.С. и др. Разработка технологии высокоусвояемых комбикормов с вакуумным напылением жидких компонентов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 1. С. 94–101.
- 3 Афанасьев В.А., Богомолов И.С., Остриков А.Н. и др. Технология и оборудование для производства комбикормов для ценных пород рыб // Комбикорма. 2021. № 1. С. 24–28.

- 4 Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Кочкин И.Ю. и др. Разработка продуктивных псевдокапсулированных комбикормов для радужной форели, выращиваемой в Центральном федеральном округе Российской Федерации // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85. № 1. С. 174–179. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-174-179
- 5 Васильев Д.С., Москаленко С.П., Поддубная И.В. и др. Эффективность использования муки из гидробионтов разной технологии приготовления в кормлении радужной форели // Аграрный научный журнал. 2021. № 5. С. 50–53.
- 6 Muñoz-Tebar N., López-Carballo G., Fernández-Santos M. et al. Chitosan edible films and coatings with added bioactive compounds: Antibacterial and antioxidant properties and their application to food products: A review // *Polymers*. 2023. V. 15. № 2. P. 396. doi: 10.3390/polym15020396
- 7 Бектурсунова М.Ж., Семенова А.А., Новикова Е.В. и др. Использование нетрадиционных видов сырья при производстве комбикормов для ценных видов рыб // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 2. С. 34–49.
- 8 Москаленко С.П., Васильев Д.С. Целесообразность использования продуктов переработки ракообразных в составе комбикормов для радужной форели // Аграрный научный журнал. 2020. № 2. С. 55–60.
- 9 Пономарев С.В., Грозеску Ю.Н., Бахарева А.А. Корма и кормление рыб в аквакультуре. М.: МОРКНИГА, 2013. 410 с.
- 10 Dadras H., Hayatbakhsh M.R., Shelton W.L., Golpour A. Effects of dietary administration of Rose hip and Safflower on growth performance, haematological, biochemical parameters and innate immune response of Beluga, *Huso huso* (Linnaeus, 1758) // *Fish & Shellfish Immunology*. 2016. V. 59. P. 109–114.
- 11 Lee S., Zhao H., Li Y. et al. Evaluation of Formulated Feed for Juvenile Lake Sturgeon Based on Growth Performance and Nutrient Retention // *North American Journal of Aquaculture*. 2018. V. 80. № 2. P. 223–236.
- 12 Liland N.S., Johnsen E.N., Hellberg H. et al. Effects of dietary vegetable oils and varying dietary EPA and DHA levels on intestinal lipid accumulations in Atlantic salmon // *Aquaculture Nutrition*. 2018. V. 24. № 5. P. 1599–1610.
- 13 Parker R. Implications of high animal by-product feed inputs in life cycle assessments of farmed Atlantic salmon // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2018. V. 23. № 5. P. 982–994.
- 14 Tiril S.U., Dernekbası S., Karayucel I. et al. Effects of canola and safflower oil supplementation in diets, on growth performance and fatty acid composition of russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii brandt*, 1833) // *Israeli Journal of Aquaculture – Bamigdeh*. 2016. V. 68. P. 1222.
- 15 Pourhosein-Sarameh S. Application of various sources of vegetable lipids in sturgeon feeding // *Aquatic Animals Nutrition*. 2022. V. 8. № 2. P. 39–52.
- 16 Naghdi S., Mohtasebi S.S., Aghbashlo M. et al. Insights into fishery by-product application in aquatic feed and food: a review // *Aquaculture International*. 2024. V. 32. № 5. P. 5851–5910.
- 17 Athanasopoulou E., Mente E., Karapanagiotidis I.T. et al. Chitosan-based biodegradable coatings for securing nutrients in extruded fish feed pellets // *Aquaculture and Fisheries*. 2025. V. 10. № 6. P. 1062–1068. doi: 10.1016/j.aaf.2025.04.001
- 18 Fotodimas I., Mente E., Vafiadis D. et al. Sustainable Aquaculture Through Enzymatic Hydrolysis of Raw Chitin from Crab By-Products: Functional Fish Feeds Targeting Fish Health with Implications for Human Health // *Fishes*. 2025. V. 10. № 10. P. 514.
- 19 Hasan I., Pribowo S.G.H., Damayanti S. et al. Chitinase and insect meal in aquaculture nutrition: A comprehensive overview of the latest achievements // *Fishes*. 2023. V. 8. № 12. P. 607.
- 20 Abu-Elala N.M., Attia M.M., Abd-Elsalam R.M. et al. Chitosan for Aquaculture: Growth Promotion, Immune Modulation, Antimicrobial Activity, Bio-Carrier Utility, Water Quality Management, and Safety Considerations – A Review // *Annals of Animal Science*. 2025. V. 25. № 2. P. 483–509.
- 21 Kumaran S., Kamaraj V., Manikandan S. et al. Chitin derivatives of NAG and chitosan nanoparticles from marine disposal yards and their use for economically feasible fish feed development // *Chemosphere*. 2021. V. 281. P. 130746. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130746

References

- 1 Abrosimova K.S., Abrosimova N.A., Vasilyeva L.M. Problems of growing larvae and fry of sturgeon fish in intensive aquaculture and ways to solve them. *Fundamental Research*. 2015. no. 2-9. pp. 1882–1886. (in Russian)
- 2 Afanasyev V.A., Ostrikov A.N., Bogomolov I.S. et al. Development of technology for highly digestible compound feeds with vacuum spraying of liquid components. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 94–101. (in Russian)
- 3 Afanasyev V.A., Bogomolov I.S., Ostrikov A.N. et al. Technology and equipment for the production of compound feeds for valuable fish species. *Compound Feeds*. 2021. no. 1. pp. 24–28. (in Russian)
- 4 Vasilenko V.N., Frolova L.N., Kochkin I.Yu. et al. Development of productive pseudo-encapsulated compound feeds for rainbow trout grown in the Central Federal District of the Russian Federation. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 174–179. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-174-179 (in Russian)
- 5 Vasiliev D.S., Moskalenko S.P., Poddubnaya I.V. et al. Efficiency of using hydrobiont flour of different preparation technologies in rainbow trout feeding. *Agrarian Scientific Journal*. 2021. no. 5. pp. 50–53. (in Russian)
- 6 Muñoz-Tebar N., López-Carballo G., Fernández-Santos M. et al. Chitosan edible films and coatings with added bioactive compounds: Antibacterial and antioxidant properties and their application to food products: A review. *Polymers*. 2023. vol. 15. no. 2. p. 396. doi: 10.3390/polym15020396
- 7 Bektursunova M.Zh., Semenova A.A., Novikova E.V. et al. The use of non-traditional types of raw materials in the production of compound feeds for valuable fish species. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries*. 2022. no. 2. pp. 34–49. (in Russian)
- 8 Moskalenko S.P., Vasiliev D.S. Feasibility of using crustacean processing products in compound feeds for rainbow trout. *Agrarian Scientific Journal*. 2020. no. 2. pp. 55–60. (in Russian)
- 9 Ponomarev S.V., Grozesku Yu.N., Bahareva A.A. Feeds and feeding of fish in aquaculture. Moscow: Morkniga, 2013. 410 p. (in Russian)

- 10 Dadras H., Hayatbakhsh M.R., Shelton W.L., Golpour A. Effects of dietary administration of Rose hip and Safflower on growth performance, haematological, biochemical parameters and innate immune response of Beluga, *Huso huso* (Linnaeus, 1758). *Fish & Shellfish Immunology*. 2016. vol. 59. pp. 109–114.
- 11 Lee S., Zhao H., Li Y. et al. Evaluation of Formulated Feed for Juvenile Lake Sturgeon Based on Growth Performance and Nutrient Retention. *North American Journal of Aquaculture*. 2018. vol. 80. no. 2. pp. 223–236.
- 12 Liland N.S., Johnsen E.N., Hellberg H. et al. Effects of dietary vegetable oils and varying dietary EPA and DHA levels on intestinal lipid accumulations in Atlantic salmon. *Aquaculture Nutrition*. 2018. vol. 24. no. 5. pp. 1599–1610.
- 13 Parker R. Implications of high animal by-product feed inputs in life cycle assessments of farmed Atlantic salmon. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2018. vol. 23. no. 5. pp. 982–994.
- 14 Tiril S.U., Dernekbası S., Karayucel I. et al. Effects of canola and safflower oil supplementation in diets, on growth performance and fatty acid composition of russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii* brandt, 1833). *Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgeh*. 2016. vol. 68. p. 1222.
- 15 Pourhosein-Sarameh S. Application of various sources of vegetable lipids in sturgeon feeding. *Aquatic Animals Nutrition*. 2022. vol. 8. no. 2. pp. 39–52.
- 16 Naghdi S., Mohtasebi S.S., Aghbashlo M. et al. Insights into fishery by-product application in aquatic feed and food: a review. *Aquaculture International*. 2024. vol. 32. no. 5. pp. 5851–5910. doi: 10.1007/s10499-024-01571-8
- 17 Athanasopoulou E., Mente E., Karapanagiotidis I.T. et al. Chitosan-based biodegradable coatings for securing nutrients in extruded fish feed pellets. *Aquaculture and Fisheries*. 2025. vol. 10. no. 6. pp. 1062–1068. doi: 10.1016/j.aaf.2025.04.001
- 18 Fotodimas I., Mente E., Vafiadis D. et al. Sustainable Aquaculture Through Enzymatic Hydrolysis of Raw Chitin from Crab By-Products: Functional Fish Feeds Targeting Fish Health with Implications for Human Health. *Fishes*. 2025. vol. 10. no. 10. p. 514.
- 19 Hasan I., Pribowo S.G.H., Damayanti S. et al. Chitinase and insect meal in aquaculture nutrition: A comprehensive overview of the latest achievements. *Fishes*. 2023. vol. 8. no. 12. p. 607. doi: 10.3390/fishes8120607
- 20 Abu-Elala N.M., Attia M.M., Abd-Elsalam R.M. et al. Chitosan for Aquaculture: Growth Promotion, Immune Modulation, Antimicrobial Activity, Bio-Carrier Utility, Water Quality Management, and Safety Considerations – A Review. *Annals of Animal Science*. 2025. vol. 25. no. 2. pp. 483–509.
- 21 Kumaran S., Kamaraj V., Manikandan S. et al. Chitin derivatives of NAG and chitosan nanoparticles from marine disposal yards and their use for economically feasible fish feed development. *Chemosphere*. 2021. vol. 281. p. 130746. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130746

Сведения об авторах

Константин В. Мишинец аспирант, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mishinev.k@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0006-0202-7700>

Александр Н. Остриков д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ostrikov27@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

Максим В. Копылов 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, kopylov-maks@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

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

 <https://orcid.org/0000-0001-8172-6919>

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

Konstantin V. Mishinev graduate student, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mishinev.k@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0006-0202-7700>

Alexander N. Ostrikov Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

Maxim V. Kopylov Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kopylov-maks@yandex.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

 <https://orcid.org/0000-0001-8172-6919>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/11/2025	После редакции 20/11/2025	Принята в печать 11/12/2025
Received 03/11/2025	Accepted in revised 20/11/2025	Accepted 11/12/2025

Повышение экономической эффективности использования растительных компонентов при производстве молочных продуктов в современных условиях производства

Сергей А. Коновалов	¹	sa.konovalov@omgau.org	 0000-0003-3537-8081
Татьяна В. Рыбченко	¹	tv.rybchenko@omgau.org	 0000-0003-2614-2309
Анна А. Дерканосова	²	aa-derk@ya.ru	 0000-0002-9726-9262
Константин К. Полянский	^{2,3}	mto.vrn@mail.ru	 0000-0002-8817-1466

¹ Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революций, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

³ Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67А, Россия

Аннотация. Статья посвящена производственному учету на молокоперерабатывающих предприятиях Омской области. В последние годы многие молокоперерабатывающие предприятия России существенным образом модернизировали свою производственно-технологическую базу, внедрили инновационные технологии обработки молочного сырья, расширили свой ассортимент выпускаемой продукции за счет использования функциональных пищевых ингредиентов и технологических добавок, что заметным образом повлияло на необходимость пересмотра действующих норм расхода сырья и коэффициентов перевода сырья на готовую продукцию. Авторами научной статьи был проведен комплексный анализ использования молочного сырья и немолочных компонентов на основе проведения контрольных выработок и замеров с целью определения их фактического расхода на ведущих предприятиях Омской области, в зависимости от типа предприятия и объема перерабатываемого сырья. На основе проведенного анализа расхода сырья и компонентов были впервые получены новые научно-обоснованные нормы расхода сырья и коэффициенты перевода сырья на готовую продукцию, которые позволяют оперативно проводить производственный учет и принимать управленческие решения для повышения экономической эффективности производства. Особое внимание в статье уделяется применению растительного сырья и технологических добавок на его основе, которые не только существенным образом увеличивают выход готовой молочной продукции, но и придают им высокие потребительские свойства. В статье отмечается особая роль растительных ингредиентов в расширении ассортимента молочных и молочносодержащих продуктов, повышению их качества, пищевой и биологической ценности.

Ключевые слова: молоко коровье сырое, растительные ингредиенты, нормы расхода сырья, коэффициент перевода, молочная продукция, производственный учет, экономическая эффективность производства.

Increasing the economic efficiency of using plant components in the production of dairy products in modern production conditions

Sergey A. Konovalov	¹	sa.konovalov@omgau.org	 0000-0003-3537-8081
Tatyana V. Rybchenko	¹	tv.rybchenko@omgau.org	 0000-0003-2614-2309
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, Institutetskaya 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

Abstract. The article is devoted to production accounting at milk processing enterprises of the Omsk region. In recent years, many Russian dairy processing enterprises have significantly modernized their production and technological base, introduced innovative technologies for processing dairy raw materials, and expanded their product range through the use of functional food ingredients and technological additives, which has significantly influenced the need to review current raw material consumption rates and conversion coefficients for finished products. The authors of the scientific article conducted a comprehensive analysis of the use of dairy raw materials and non-dairy components based on control workings and measurements in order to determine their actual consumption at the leading enterprises of the Omsk region, depending on the type of enterprise and the volume of processed raw materials. Based on the analysis of the consumption of raw materials and components, new scientifically based raw material consumption rates and conversion coefficients of raw materials to finished products were obtained for the first time, which make it possible to promptly carry out production accounting and make management decisions to increase the economic efficiency of production. The article pays special attention to the use of vegetable raw materials and technological additives based on it, which not only significantly increase the yield of finished dairy products, but also give them high consumer properties. The article highlights the special role of herbal ingredients in expanding the range of dairy and dairy-containing products, improving their quality, nutritional and biological value.

Keywords: raw cow's milk, vegetable ingredients, raw material consumption rates, conversion factor, dairy products, production accounting, economic efficiency of production.

Для цитирования

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

For citation

Konovalov S.A., Rybchenko T.V., Derkanosova A.A., Polyansky K.K. Increasing the economic efficiency of using plant components in the production of dairy products in modern production conditions. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 70–79. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-70-79

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

Введение

В молочной промышленности показателем использования сырья при производстве молочной продукции является отношение количества произведенного продукта, к количеству фактически израсходованного сырья. Этот показатель оценивает эффективность использования сырья в производстве, а также применяется для расчетов себестоимости продукции. Перед предприятиями - переработчиками в настоящее время стоит основная задача по разработке научно обоснованных и экономически целесообразных норм расхода сырья на основе контрольных выработок и замеров (индивидуальных норм), которые должны быть прогрессивными, соответствующими современному уровню передовой техники и технологии, организации производства.

Нормы можно считать прогрессивными если они обеспечивают наибольшие экономические результаты при наименьших материальных затратах; использование в процессе производства передовой техники и технологии производства; выполнение плановых организационно-технических мероприятий.

Повышение экономической эффективности производства молочной продукции на основе увеличения выходов продукции, при уменьшении затрат в расчете на единицу готовой продукции, является одной из важных задач, поставленных

перед предприятиями переработчиками молочного сырья, что позволяет считать выбранное направление исследований актуальным.

Цель работы – проведение комплексного анализа использования молочного сырья при производстве молочной продукции с использованием растительного сырья и разработка на его основе коэффициентов перевода молочной продукции на сырое молоко. В зависимости от годового объема переработки сырья, направляемого на выработку молочной продукции, предприятия подразделяют на 4 типа: годовой объем переработки сырья на молочную продукцию в пересчете на сырое молоко, тыс. тонн: 1 группа и 2 группа - от 20000 до 50000; 3 группа - от 50001 до 100000; 4 группа - свыше 100000.

Исходя из классификации молочных предприятий изложенной выше, для проведения контрольных выработок и замеров было выбрано четыре предприятия респондента, специализирующихся на выпуске молочной продукции. Характеристика молокоперерабатывающих предприятий представлена в таблице 1.

Материалы и методы

Молоко коровье принималось весовым и объемным методами с последующим пересчетом объема в массу в соответствии с РД 10-02-02-8-87 «Методика определения массы молока коровьего заготавливаемого при приемке».

Таблица 1.

Характеристика молокоперерабатывающих предприятий выбранных в качестве респондентов

Table 1.

Characteristics of milk processing enterprises selected as respondents

Наименование показателя Naming of the indicator	Респондент 1 The respondent 1	Респондент 2 The respondent 2	Респондент 3 The respondent 3	Респондент 4 The respondent 4
1	2	3	4	5
Проектная мощность предприятия: Design capacity of the enterprise:	Типы предприятий, в зависимости от годового объема переработки молока, тыс. т. Types of enterprises, depending on the annual volume of milk processing, thousand tons			
	от 20000 до 50000 from 20,000 to 50,000		от 50001 до 100000 from 50001 to 100000	свыше 100000 above 100000
- т/год t/year	22857,00	43800,00	80321,00	127750,00
- т/сут t/day	1185,00	12946,00	68544,00	109962,00
Годовой объем, перерабатываемого молока-сырья, т Annual volume of processed raw milk, tons	-	-	314040,36	-
Годовой объем, выпускаемой продукции, т Annual volume of products, tons, t	-	-	19221,47	-
-цельномолочная продукция, т - whole milk products, t	-	-	317,50	-
-кисломолочная продукция, т fermented milk products, t	743,43	1615,83	2214,54	-
- масло, т oil, t	-	-	1218,47	-
- творог, т curd, t	-	-	426,6	2905,24
- сливки питьевые, т drinking cream, t	-	-	252,21	-
- сухое цельное и обезжиренное молоко, т - whole milk powder and skimmed milk, t	1185,00	-	-	-

Продолжение таблицы 1 | Continuation of table 1

1	2	3	4	5
- сыворотка сухая деминерализованная, т - dry demineralized serum, t	-	397,23	-	4430,50
-детские кисломолочные продукты, т - children's fermented milk products	-	1989,28	-	-
- масло, т oil, t	-	1670,87	-	-
- сыр, т cheese, t	-	-	-	7989,41
- сыр плавленый, т processed cheese, t	58,30	60,00	80,00	78,30
- продукты, сгущенные с сахаром, нежирное сгущенное с сахаром, т - products condensed with sugar, low-fat condensed with sugar, t	22857,00	43800,00	80321,00	127750,00
Загрузка от проектной мощности, % Loading from the design capacity	1185,00	12946,00	68544,00	109962,00

В качестве средств измерений для проведения исследований применяли: транспортные меры полной вместимости по ГОСТ 9218-2015; молоко-счетчики; массовые и объемные расходомеры; массомеры; молокомеры; весы; датчики давления [1].

В работе использовались национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52054-2023 Молоко коровье сырое, межгосударственные стандарты [2];

Молочное сырье и продукцию маслодельной и сыродельной отрасли, сухие молочные продукты взвешивали на весах с номинальным пределом взвешивания, который предусмотрен в картах метрологического обеспечения технологического процесса производства технологической инструкции по производству соответствующего вида продукции.

Общие правила отбора образцов для испытаний продукции при подтверждении соответствия проводили по ГОСТ Р 58972-2020 [3].

В соответствии с ГОСТ Р 58972-2020 Молоко взвешивали на весах соответствующей грузоподъемности. Грузоподъемность весов считается допустимой для взвешивания, если она не превосходит предположительную массу контролируемого места более чем в 10 раз.

Приемку и отбор проб для анализа молока и продуктов переработки молока проводили в соответствии с ГОСТ 26809.1-2014 [4].

Методы обработки результатов измерений проводили в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [5].

Для определения химического состава и свойств в молочном сырье и готовых продуктах использовали следующие нормативные документы:

- массовую долю жира, влаги, сухих веществ, белка определяли общепринятыми методиками по ГОСТ Р ИСО 2446-2011, ГОСТ Р 54668-2011, ГОСТ 25179-2014, ГОСТ 34454-2018 соответственно [6,7,8, 9];

- оматические клетки по ГОСТ 23453-2014 [10];

- титруемую кислотность, определяли по ГОСТ Р 54669-2011 [11];

- активную кислотность определяли по ГОСТ 32892-2014 [12];

- сухой обезжиренный молочный остаток по ГОСТ Р 54761-2011 [13];

- измерение температуры проводили в соответствии с ГОСТ 26754-85 [14];

- плотность молока и молочных продуктов определяли по ГОСТ 54758-2011 [15];

- - определение точки замерзания проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5764-2011 [16];

Органолептическая оценка запаха и вкуса молока сырья проводилась в соответствии с действующими нормативными документами.

Особое внимание уделялось соблюдению требований безопасности, установленных Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции» [17].

Установление значений потерь осуществляется по результатам многократных экспериментальных работ в соответствии ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 [18].

Обработка цифрового материала, полученного в ходе проведения измерений проводилась при помощи программ Microsoft Office Excel 2024, 1С: Бухгалтерия 8

Для проведения исследований применялись следующие методы научного познания: наблюдение, сопоставление, группировка, выборка, обобщение, приемы и способы системного подхода, монографический, аналитический и др.

Результаты

Предприятия, отобранные для анализа учета поступающего молока, имеют в своем ассортименте инновационные технологии производства молочной продукции, полностью оснащены автоматизированной системой управления производства, располагают современным технологическим и лабораторным оборудованием.

Молоко принимается в соответствии с ГОСТ Р 52054-2023 Молоко коровье сырое, межгосударственные стандарты, с фиксированием полученных результатов в журнале приемки молока-сырья от поставщиков [2].

Экспериментальные данные по учету молока и определению норм расхода сырья на производство молочных продуктов контролировались на молокоперерабатывающих предприятиях в период с января по декабрь 2024 г.

Нормативы потерь и норм расхода сырья дифференцируются с учетом массовой доли жира и белка в перерабатываемом молоке и сезонности работы предприятия.

В связи с изменением состава и свойств молока контрольные выработки молочной продукции по установлению индивидуальных норм расхода сырья проводили во все сезоны.

При разработке норм расхода на новые виды продукции нормы расхода в начале исследований были временными, установленными на какой-то определенный период, после окончания, которого проводили работу по установлению постоянных норм расхода.

Учет молока коровьего сырого в пересчете на базисную массовую долю жира и белка ведется в журнале приемки молока коровьего сырого. Физико-химические показатели среднегодового поступления молока коровьего сырого от поставщиков представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Физико-химические показатели среднегодового поступления молока коровьего сырого от поставщиков на молокоперерабатывающие предприятия

Table 2.

Physico-chemical indicators of the average annual intake of raw cow's milk from suppliers to dairy processing plants

Наименование показателя Naming of the indicator	респондент 1 the respondent 1	респондент 2 the respondent 2	респондент 3 the respondent 3	респондент 4 the respondent 4
Температура, °C Temperature, °C	5,1	4,6	6	4,8
Кислотность, °T Acidity, °T	17,1	17,3	17	17,2
Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	1028,2	1028,2	1027,0	1028,2
Массовая доля жира, % Mass fraction of fat, %	3,8	4,0	3,6	3,8
Массовая доля белка, % Mass fraction of protein, %	3,2	3,3	3,0	3,2
Массовая доля сухих веществ, % Mass fraction of dry substances, %	11,9	12,2	11,5	12,1

Анализ фактического использования молочного сырья для выработки молочной продукции учитывался по каждому месяцу отдельно с учетом усредненных значений массы, физико-химических показателей от каждого поставщика.

По данным наших исследований молоко, поступающее на основные перерабатывающие предприятия Омской области, имело следующий химический состав (средне статистические данные): массовая доля сухих веществ – 11,92 %, жира – 3,8 %, общего белка – 3,17 %.

Физико-химические показатели, поступающего на предприятия молока были в среднем следующие: титруемая кислотность – 17,1°T, температура – 5,1 °C, плотность 1027,9 кг/м³.

Наиболее полноценным по химическому составу было молоко, поступающее на следующие предприятия: респондент 2 и респондент 4, так массовая доля сухих веществ молока на них по сравнению со средними показателями была выше на 2,1 %, жира на 3,3 %, белка на 2,4 %.

С менее ценным химическим составом было молоко, поступающее на предприятие – респондент 3, так массовая доля сухих веществ на нем по сравнению со средними показателями была ниже на 3,74 %, жира на 4,54 %, белка на 4,62 %.

Анализируя сезонные изменения химического состава молока, поступающего на перерабатывающие предприятия Омской области можно сказать, что, минимальное количество сухого вещества отмечено в апреле и мае у респондента 3 – 10,87 % и 11,30%, в то время, как у респондентов 2 и 4 составляли 11,13 % и 11,54 %. Максимальные значения количества сухих веществ отмечено у респондентов 2 и 4 было отмечено в августе и сентябре 12,75 % и 14,72 % соответственно.

Анализ полученных данных свидетельствует о недостатке кормов в конце весны, их низким качеством в этот период года, а также с выявленной сезонностью отелов коров. В апреле и мае основная масса коров находится на пике лактации, когда содержание сухих веществ в молоке, как правило, понижается. Кроме того, животные на пике лактации более тяжело переносят переход от стойлового содержания к пастбищному. С июня по октябрь количество сухих веществ в молоке начинает повышаться и достигает максимума в октябре – 12,55 %.

Разница между максимальным и минимальным уровнем сухих веществ в молоке на протяжении года составила 3,45 % от среднегодового значения. С ноября количество сухих веществ в молоке снова начинает снижаться, несколько стабилизируясь в декабре-феврале, а затем снова уменьшается, как уже было отмечено, достигая минимума в середине и конце

весны. Таким образом, весенний период характеризуется минимальными значениями массовой доли сухих веществ, массовой доли белка. Для молока летнего периода характерно минимальное содержание жира, массовой доли белка. В осенний период года, особенно в октябре в молоке содержится максимальное количество массовой доли сухих веществ, жира, общего белка.

Анализ данных о переработке молока свидетельствует, о том, что наибольший объем переработки молока наблюдается в теплый период сезона года, начиная с июня по сентябрь. В августе на предприятиях наблюдается пиковая нагрузка по объемам поступающего молока.

В течение года на исследуемых нами предприятиях наблюдались колебания от среднегодовых значений по объемам переработки сырого молока. Так, для предприятия респондента 1, они составили – 28,0 %, респондента 2 – 21,6 %, респондента 3 – 6,4 %, респондента 4 – 8,1 %.

Предприятие – респондент 4 не имеет прямой зависимости в объемах переработки молочного сырья от поставщиков. В январе, когда предприятия – конкуренты не располагают достаточным количеством сырья, предприятие – респондент 4 увеличивает объем переработки, что влечет за собой увеличение объема продаж молочной продукции, что обусловлено экономической стратегией предприятия.

В настоящее время производители молочной продукции в целях повышения экономической эффективности производства применяют комплексную переработку всех составных компонентов молочного сырья, переходят на выпуск высокомаржинальной продукции, имеющую добавочную прибыль от использования немолочных компонентов в виде функциональных ингредиентов, повышающих пищевую и биологическую ценность молочных продуктов. Для обогащения молочных продуктов используют минеральные и витаминные премиксы, сухое или сгущенное молоко, сухая или сгущенная сыворотка, пахта, казеинаты, концентраты и изоляты растительного белка, структурообразующих компонентов (пектин, камедь рожкового дерева, агар-агар, каррагинан, ферментированный гидролизат кукумарии и др.), зерновое сырье, плодово-ягодные и овощные наполнители.

Плодово-ягодные и овощные наполнители используются в виде фруктовых и овощных порошков, фруктово-ягодного и овощного пюре, сиропов, припасов, повидла, цукатов, натуральных и концентрированных соков и сиропов. Травяное растительное сырье используется в виде порошков и экстрактов. Злаки растительных культур используются в виде продуктов размола, экструдеров, полисолодовых экстрактов зерновых культур и др.

Растительное сырье является дополнительным источником белковых и азотистых соединений, ненасыщенных и полиненасыщенных жирных кислот, глюкозы и фруктозы, пищевых волокон, витаминов и минеральных веществ, дубильных веществ, фенольных соединений и органических кислот.

В целях увеличения объема готовой продукции в соответствии с кодами ОКПД2 и ТН ВЭДАЭС, предприятия могут использовать научно-обоснованные коэффициенты пересчета пищевой продукции, все это свидетельствует об актуальности и новизне исследований.

Использование в технологиях молочных продуктов вторичного молочного сырья и немолочных компонентов позволяет более эффективно использовать производственные мощности предприятия, обеспечить более эффективную загрузку молочного оборудования в течение смены и с учётом сезонности, обеспечить комплексную переработку сырья, повысить выход и снизить себестоимость выпуска готовой продукции за счет сокращения потерь при производстве [19].

Производители молочной продукции в целях фактического учета величины потерь молока коровьего сырого переводят его в молоко с базисной массовой доли жира или белка, определяют нормы расхода сырья и компонентов, выводят коэффициенты расхода сырья на единицу продукции.

На предприятиях-респондентах для разработки норм расхода и проведения контрольных выработок и замеров была создана комиссия. В состав комиссии включались специалист, ответственный за нормирование сырьевых ресурсов, главный инженер, технолог, метролог, заведующий лабораторией и механик.

Контрольные выработки и замеры проводились в соответствии с технологическими инструкциями по производству отдельных видов молочных продуктов с соблюдением требований стандартов и технических условий, санитарных правил, карт метрологического обеспечения технологических процессов и контроля производства.

Контрольные выработки проводились, начиная с приемки молока, при этом в расчетном нормативе полностью учитывали потери на всех стадиях технологического цикла.

Контрольные выработки, на основании которых разрабатываются нормы расхода, проводились непосредственно в цехах, имеющих технически исправное и отлаженное оборудование, работающее в технологических режимах согласно установленным регламентам, технологическим инструкциям и инструкциям по эксплуатации оборудования. Наблюдения осуществлялись при установившейся работе

оборудования, при этом проводилось не менее трех выработок при строгом соблюдении технологических режимов. Нормы расхода устанавливались на сырье и основные материалы, соответствующие по качеству требованиям стандартов и технических условий.

Следует подчеркнуть, что расход сырья на выпуск продукции зависит от: исправности теплового и механического оборудования; исправности автоматов для фасования молочной продукции; вида и качества упаковочного материала; протяженности трубопроводов; квалификации оператора, работающего на установке; объема перерабатываемого сырья и эффективной загрузки технологического оборудования; продолжительности вывода технологического оборудования на рабочие режимы эксплуатации.

Методология проведения расчетов по определению коэффициентов перевода молочной продукции на молочное сырье включает в себя ряд последовательно выполняемых операций:

- учет весовых параметров, поступающего на предприятие молочного сырья, проводится на основании измерения его фактической массы;
- перерасчет массы поступающего молочного сырья фактической жирности в молоко базисной жирности;
- определение индивидуальных норм расхода сырья на основании проведения контрольных выработок и замеров;
- определение коэффициентов перевода молочной продукции на молочное сырье.

Для молочных продуктов, произведенных без изменения его состава после нормализации молока коровьего сырого, коэффициент перевода молочной продукции на молочное сырье рассчитывается по следующей формулам:

Для молочных продуктов, произведенных без изменения его состава после нормализации

молока-сырья, коэффициент перевода молочной продукции на молочное сырье рассчитывается по следующей формулам (1) и (2):

$$H_{мб} = \frac{H_{мф} \times Ж_{мф}}{Ж_{мб}}, (1)$$

$$K_{гп1} = \frac{H_{мб}}{1000}, (2)$$

Для расчета молочных продуктов, произведенных с добавлением компонентов, не молочных пищевых продуктов и добавок, коэффициент перевода молочной продукции на молочное сырье рассчитывается по следующей формулам (3) и (4):

$$H_{мб} = \frac{(H_{мф} - B) \times Ж_{мф}}{Ж_{мб}}, (3)$$

$$K_{гп2} = \frac{H_{мб}}{1000}, (4)$$

Обсуждение

Важность разработки коэффициентов расхода молока базисной жирности на 1 т готовой продукции заключается в том, что их применение в разработке индивидуальных норм расхода сырья способствует упрощению процесса планирования ассортиментной линейки продуктов и регулированию объемов производства. Расчет индивидуальных норм расхода сырья при производстве молочной продукции проводился в соответствии с кодами ОКПД2 и ТН ВЭДАЭС [20].

В результате проведенных на предприятиях контрольных выработок и замеров были установлены нормы расхода сырья и выведены коэффициенты перевода молочной продукции на сырое молоко для молочных продуктов с растительными компонентами. Индивидуальные нормы расхода сырья и коэффициенты перевода молочной продукции на сырое молоко для молочных продуктов представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3.

Индивидуальные нормы расхода сырья при производстве молочных продуктов на предприятиях молочной промышленности, кг/т

Table 3.

Individual consumption rates of raw materials in the production of dairy products at dairy enterprises, kg/t

Наименование молочной продукции Name of dairy products	Объем, л / Вес, кг Volume, L / Weight, kg	Типы предприятий, в зависимости от годового объема переработки молока, тыс.т Types of enterprises, depending on the annual volume of milk processing, thousand tons			
		от 20000 до 50000 from 20,000 to 50,000		от 50001 до 100000 from 50001 to 100000	свыше 100000 above 100000
		Индивидуальные нормы расхода сырья на выработку молочной продукции, кг/т Individual consumption rates of raw materials in the production of dairy products at dairy enterprises, kg/t			
		Респондент 1 Respondent 1	Респондент 2 Respondent 2	Респондент 3 Respondent 3	Респондент 4 Respondent 4
1	2	3	4	5	6
Йогурт фруктовый 1,5% Fruit yogurt 1.5%	0,930	22366,84	22344,59	22306,80	22289,03
Коктейль молочный 2% фруктовый Milk fruit cocktail	0,206	-	-	-	10393,99
Коктейль молочный 3% шоколадный 3% Chocolate Milkshake	0,206	10846,95	-	-	10223,51

Продолжение таблицы 3 | Continuation of table 3

1	2	3	4	5	6
Масса творожная 2% с курагой 2% cottage cheese with dried apricots	0,200	10846,95	10634,06	10414,12	10223,51
Масса творожная 5% с изюмом 5% cottage cheese with raisins	0,200	-	-	10451,04	-
Биопродукт кисломолочный с плодово-ягодным соком Fermented milk product with fruit and berry juice	0,200	-	-	10969,93	-
Йогурт, обогащенный лактулозой Yogurt enriched with lactulose	0,200	11610,52	-	10969,93	10896,39
Йогурт фруктовый Fruit yogurt	0,200	11610,52	-	-	-
Молоко, обогащенное витаминами Milk fortified with vitamins	0,200	-	12862,39	-	-
Продукт, кисломолочный обогащенный витаминами и микроэлементами A fermented milk product enriched with vitamins and microelements	0,200	-	12862,39	-	-
Творог с фруктозой Cottage cheese with fructose	0,100	-	-	-	10896,39
Творог фруктовый Fruit curd	0,100	-	-	-	10896,39
Биопродукт кисломолочный с фруктовым соком Fermented milk product with fruit juice	0,200	-	-	-	10896,39
Йогурт, обогащенный лактулозой Yogurt enriched with lactulose	0,200	-	-	-	10956,86
Сыр плавленый «Янтарь» с м.д.ж. 60,0 % Processed cheese Amber with m.d.j. 60.0 %	0,200	9101,86	-	-	-
Заменитель цельного молока (ЗЦМ) весовой Whole Milk Substitute (WMS) by weight	20,000	9118,08	-	-	-

Таблица 4.

Коэффициенты перевода молочной продукции на сырое молоко в зависимости от типа предприятия

Table 4.

Conversion factors for dairy products to raw milk, depending on the type of enterprise

Наименование молочной продукции Name of dairy products	Объем, л Вес, кг Volume, L Weight, kg	Типы предприятий, в зависимости от годового объема переработки молока, тыс. т Types of enterprises, depending on the annual volume of milk processing, thousand tons			
		от 20000 до 50000 from 20,000 to 50,000		от 50001 до 100000 from 50001 to 100000	свыше 100000 above 100000
		Респондент 1 Respondent 1	Респондент 2 Respondent 2	Респондент 3 Respondent 3	Респондент 4 Respondent 4
1	2	3	4	5	6
Йогурт фруктовый 1,5% Fruit yogurt 1.5%	0,930	22,37	22,34	22,31	22,29
Коктейль молочный 2% фруктовый Milk fruit cocktail	0,206	-	-	-	10,39
Коктейль молочный 3% шоколадный 3% Chocolate Milkshake	0,206	10,85	-	-	10,22
Масса творожная 2% с курагой 2% cottage cheese with dried apricots	0,200	-	10,63	10,41	10,22
Масса творожная 5% с изюмом 5% cottage cheese with raisins	0,200	-	-	10,45	-

Продолжение таблицы 4 | Continuation of table 4

1	2	3	4	5	6
Биопродукт кисломолочный с плодово-ягодным соком Fermented milk product with fruit and berry juice	0,200	-	-	10,97	-
Йогурт, обогащенный лактозой Yogurt enriched with lactulose	0,200	11,61	-	10,41	10,90
Йогурт фруктовый Fruit yogurt	0,200	11,61	-	-	-
Молоко, обогащенное витаминами Milk fortified with vitamins	0,200	-	12,86	-	-
Продукт, кисломолочный обогащенный витаминами и микроэлементами A fermented milk product enriched with vitamins and microelements	0,200	-	12,86	-	-
Творог с фруктозой Cottage cheese with fructose	0,100	-	-	-	10,89
Творог фруктовый Fruit curd	0,100	-	-	-	10,89
Биопродукт кисломолочный с фруктовым соком Fermented milk product with fruit juice	0,200	-	-	-	10,89
Йогурт, обогащенный лактозой Yogurt enriched with lactulose	0,200	-	-	-	10,95
Сыр плавленый «Янтарь» с м.д.ж. 60,0 % Processed cheese Amber with m.d.j. 60.0 %	0,200	9,10	-	-	-
Заменитель молока (ЗЦМ) весовой Whole Milk Substitute (WMS) by weight	20,000	9,11	-	-	-

Заключение

Проведена комплексная оценка использования молока коровьего сырого, в результате которой выявлено существенное влияние сезонных изменений химического состава молока на величину норм расхода и потери при производстве молочной продукции, а также определены основные направления использования молочного сырья в зависимости от ассортимента вырабатываемой продукции;

Сформулированы научно обоснованные нормативные требования к химическому составу основного, дополнительного и вспомогательного сырья, и видам упаковки, позволяющие установить полноту использования основных компонентов молока (белков, жира, лактозы) при переработке молочного сырья, направляемого на выпуск молочной продукции;

Произведен пересчет фактического объема расхода сырого молока в молоко с базисной массовой долей жира и белка на одну тонну готовой продукции выпускаемых на предприятиях Омской области в соответствии с кодами ОКПД2 и ТН ВЭДАЭС.

Установлены фактические нормы расхода (индивидуальные нормы расхода) молочного сырья и вспомогательных компонентов на основе контрольных выработок и замеров при производстве широкого ассортимента молочных продуктов на молокоперерабатывающих предприятиях различного типа.

Разработаны научно-обоснованные коэффициенты пересчета молочной продукции в соответствии с кодами ОКПД2 и ТН ВЭДАЭС в сырье (молоко базисной жирности).

Литература

- 1 Алексахина С.А., Белозёрова В.А. Использование альтернативного растительного сырья при производстве молочно-кислых продуктов питания на основе растительных белков // *Инновации и продовольственная безопасность*. 2025. № 1. С. 6–22.
- 2 Алексаночкин Д.И., Семенов И.Д., Фоменко И.А. Напитки на растительной основе: обзор сырьевых компонентов и технологий получения // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2025. Т. 28. № 3. С. 371–384.
- 3 Решеткина Ю.В., Шатова А.В., Столярова О.А. Основные направления повышения экономической эффективности функционирования молочнопродуктового подкомплекса региона // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2023. № 1 (72). С. 147–152.
- 4 Оборин М.С. Повышение эффективности производства продукции в сельском хозяйстве на основе инноваций // *Вестник НГИЭИ*. 2023. № 1 (140). С. 57–67.
- 5 Винничек Л.Б. Повышение эффективности интенсификации молочного скотоводства: тенденции и направления // *Исследование проблем экономики и финансов*. 2021. № 1. С. 4–12.
- 6 Сатаев Р.И., Красников А.Г. Пути повышения эффективности производства и реализации молока // *Актуальные вопросы современной аграрной экономики: сборник статей*, 2020. С. 105–111.
- 7 Тыхенова О.Г., Дагбаева Т.Ц., Семёнова Е.Г. Разработка рецептуры и технологии производства творожной массы с использованием растительного сырья // *Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления*. 2021. № 3 (82). С. 13–20.
- 8 Дерканосова А.А., Иванова С.С., Петрова О.В. и др. Научные подходы к использованию молока коров краснопестрой породы в производстве мягких сыров комбинированного состава // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2021. Т. 83. № 1 (87). С. 146–154.
- 9 Хиценко А.В., Неверова О.П., Зинина О.В. Использование растительных компонентов в производстве мягких сыров // *Актуальные проблемы развития технических наук: сборник статей участников XXII Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» Екатеринбург*, 2020. С. 98–103.
- 10 Яковлева Д.П. Использование различного растительного сырья для производства продукта функционального назначения // *Использование современных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: материалы международной научно-практической конференции пос. Персиановский*, 2020. С. 3–7.
- 11 Rozhkova A., Olentsova J. Development of new technological solutions for the dairy industry // *E3S Web of Conferences*. 2020. V. 161. P. 01086.
- 12 Balivo A., Sacchi R., Genovese A. The Noble Method in the dairy sector as a sustainable production system to improve the nutritional composition of dairy products: A review // *International Journal of Dairy Technology*. 2023. V. 76. № 2. P. 313–328.
- 13 Glagoleva L.E., Ivanova S.A., Petrov K.D. et al. About the use of plant-based complex of alfalfa in production of dairy products // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 848. № 1. P. 012049.
- 14 Kozub Y.A., Komlatsky V.I., Khoroshailo T.A. About some automated processes in the production of dairy products // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 862. № 3. P. 032021.
- 15 Achaw O.W., Danso-Boateng E. Milk and dairy products manufacture // *Chemical and Process Industries: With Examples of Industries in Ghana* / Ed. by O.W. Achaw, E. Danso-Boateng. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 293–374.
- 16 Antoshchenkova V., Kravchenko Y. Current trends in milk production and consumption in the world in the conditions of globalization // *Економічний аналіз*. 2022. V. 32. № 2. P. 7–14.
- 17 Fedorova M.A., Gorodov A.A. Formation of the dairy industry production potential: innovations and problems of their implementation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 548. № 2. P. 022013.
- 18 Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года». URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 10.11.2025).
- 19 Stobiecka M., Król J., Brodziak A. Antioxidant activity of milk and dairy products // *Animals*. 2022. V. 12. № 3. P. 245.
- 20 Walther B., Guggisberg D., Badertscher R. et al. Comparison of nutritional composition between plant-based drinks and cow's milk // *Frontiers in Nutrition*. 2022. V. 9. P. 988707. doi: 10.3389/fnut.2022.988707
- 21 Paul A.A., Kumar S., Kumar V., Sharma R. Milk Analog: Plant based alternatives to conventional milk, production, potential and health concerns // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. V. 60. № 18. P. 3005–3023. doi: 10.1080/10408398.2019.1674243
- 22 Kuzmyk U., Marynin A., Svyatnenko R. et al. Prospects of use of vegetable raw materials in the technology of sour-milk dessert // *EUREKA: Life Sciences*. 2021. № 3. P. 59–69. doi: 10.21303/2504-5695.2021.001848

References

- 1 Aleksashina S.A., Belozeroва V.A. Use of alternative plant raw materials in the production of fermented milk foods based on plant proteins. *Innovations and Food Security*. 2025. no. 1. pp. 6–22. (in Russian)
- 2 Aleksanochkin D.I., Semenov I.D., Fomenko I.A. Plant-based beverages: review of raw material components and production technologies. *Bulletin of Murmansk State Technical University*. 2025. vol. 28. no. 3. pp. 371–384. (in Russian)
- 3 Reshetkina Yu.V., Shatova A.V., Stolyarova O.A. Main directions for increasing the economic efficiency of the dairy products subcomplex of the region. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2023. no. 1 (72). pp. 147–152. (in Russian)
- 4 Oborin M.S. Increasing the efficiency of agricultural production based on innovations. *Bulletin of NGIEI*. 2023. no. 1 (140). pp. 57–67. (in Russian)
- 5 Vinnichuk L.B. Increasing the efficiency of intensification of dairy cattle breeding: trends and directions. *Research of Problems of Economics and Finance*. 2021. no. 1. pp. 4–12. (in Russian)
- 6 Sataev R.I., Krasnikov A.G. Ways to increase the efficiency of milk production and sales. *Current Issues of Modern Agrarian Economics: collection of articles*, 2020. pp. 105–111. (in Russian)
- 7 Tikhonova O.G., Dagbaeva T.Ts., Semenova E.G. Development of recipe and production technology for curd mass using plant raw materials. *Bulletin of East Siberian State University of Technology and Management*. 2021. no. 3 (82). pp. 13–20. (in Russian)
- 8 Derkanosova A.A., Ivanova S.S., Petrova O.V. et al. Scientific approaches to the use of milk from red-mottled cows in the production of soft cheeses of combined composition. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021. vol. 83. no. 1 (87). pp. 146–154. (in Russian)

- 9 Khitsenko A.V., Neverova O.P., Zinina O.V. Use of plant components in the production of soft cheeses. Actual problems of the development of technical sciences: collection of articles of participants of the XXII Regional competition of research works "Scientific Olympus" Yekaterinburg, 2020. pp. 98–103. (in Russian)
- 10 Yakovleva D.P. Use of various plant raw materials for the production of a functional product. Use of modern technologies in agriculture and food industry: materials of the international scientific and practical conference pos. Persianovsky, 2020. pp. 3–7. (in Russian)
- 11 Rozhkova A., Olentsova J. Development of new technological solutions for the dairy industry. E3S Web of Conferences. 2020. vol. 161. p. 01086.
- 12 Balivo A., Sacchi R., Genovese A. The Noble Method in the dairy sector as a sustainable production system to improve the nutritional composition of dairy products: A review. International Journal of Dairy Technology. 2023. vol. 76. no. 2. pp. 313–328.
- 13 Glagoleva L.E., Ivanova S.A., Petrov K.D. et al. About the use of plant-based complex of alfalfa in production of dairy products. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 848. no. 1. p. 012049.
- 14 Kozub Y.A., Komlatsky V.I., Khoroshailo T.A. About some automated processes in the production of dairy products. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. vol. 862. no. 3. p. 032021.
- 15 Achaw O.W., Danso-Boateng E. Milk and dairy products manufacture. Chemical and Process Industries: With Examples of Industries in Ghana. Ed. by O.W. Achaw, E. Danso-Boateng. Cham: Springer International Publishing, 2021. pp. 293–374.
- 16 Antoshchenkova V., Kravchenko Y. Current trends in milk production and consumption in the world in the conditions of globalization. Economic Analysis. 2022. vol. 32. no. 2. pp. 7–14.
- 17 Fedorova M.A., Gorodov A.A. Formation of the dairy industry production potential: innovations and problems of their implementation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. vol. 548. no. 2. p. 022013.
- 18 Decree of the Government of the Russian Federation dated November 17, 2008 No. 1662-r "On the Concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2020". Available at: <http://www.consultant.ru> (accessed November 10, 2025). (in Russian)
- 19 Stobiecka M., Król J., Brodziak A. Antioxidant activity of milk and dairy products. Animals. 2022. vol. 12. no. 3. p. 245. doi: 10.3390/ani12030245
- 20 Walther B., Guggisberg D., Badertscher R. et al. Comparison of nutritional composition between plant-based drinks and cow's milk. Frontiers in Nutrition. 2022. vol. 9. p. 988707. doi: 10.3389/fnut.2022.988707
- 21 Paul A.A., Kumar S., Kumar V., Sharma R. Milk Analog: Plant based alternatives to conventional milk, production, potential and health concerns. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020. vol. 60. no. 18. pp. 3005–3023. doi: 10.1080/10408398.2019.1674243
- 22 Kuzmyk U., Marynin A., Svyatnenko R. et al. Prospects of use of vegetable raw materials in the technology of sour-milk dessert. EUREKA: Life Sciences. 2021. no. 3. pp. 59–69. doi: 10.21303/2504-5695.2021.001848

Сведения об авторах

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.konovlov@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-3537-8081>

Татьяна В. Рыбченко 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, tv.rybchenko@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-2614-2309>

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, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия; профессор консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, mto.vrn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

Information about authors

Sergey A. Konovlov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, food and food biotechnology department department, Omsk State Agrarian University named after. P.A. Stolypin, Institutskaya square, 1, Omsk, 644008, Russia, sa.konovlov@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-3537-8081>

Tatyana V. Rybchenko Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, food and food biotechnology department, Omsk State Agrarian University named after. P.A. Stolypin Institutskaya square, 1, Omsk, 644008, Russia, tv.rybchenko@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-2614-2309>

Anna A. Derkanosova Dr. Sci. (Engin), professor engineer, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 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. 67A. Voronezh, 394030, Russia, consultant professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, mto.vrn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

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.

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 10/11/2025	После редакции 26/11/2025	Принята в печать 08/12/2026
Received 10/11/2025	Accepted in revised 26/11/2025	Accepted 08/12/2026

Формование хлебопекарных дрожжей: исследование реологических характеристик и кинетика процесса

Сергей В. Лавров¹ ya-serglavrov@ya.ru  0000-0002-7031-7738
Александр С. Белозерцев¹ alex_bel77@mail.ru  0000-0002-7391-0254

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

Аннотация. В работе представлено исследование процесса формования хлебопекарных дрожжей на промышленном автомате. Изучены реологические свойства прессованных дрожжей и кинетика их формования. Установлено, что дрожжи относятся к вязким неньютоновским материалам. Их эффективная вязкость значительно снижается с повышением влажности и температуры продукта, а также с ростом скорости сдвига. Полученные зависимости аппроксимированы степенной функцией. Анализ кинетики процесса выявил характерное распределение давления по рабочим зонам автомата: от атмосферного в зоне загрузки до максимального в зоне прессования с последующим снижением. Повышение начальной температуры дрожжей приводит к увеличению давления в системе из-за роста вязкого трения. Температура продукта возрастает по ходу формования, достигая максимума в конечных зонах вследствие перехода механической энергии в теплоту, при этом система не возвращается к исходному температурному состоянию. Основной вывод заключается в том, что для обеспечения стабильного качества дрожжей и снижения энергозатрат необходимо организовать отвод тепла непосредственно в процессе формования, например, путем охлаждения рабочей камеры. Полученные результаты реологических характеристик и кинетики процесса представляют практическую ценность для оптимизации режимов работы, проектирования формовочного оборудования и разработки систем автоматизации данного технологического этапа.

Ключевые слова: хлебопекарные дрожжи, формование, реологические свойства, эффективная вязкость, неньютоновская жидкость, кинетика процесса, формовочный автомат, температура, давление.

Molding of baker's yeast: study of rheological characteristics and process kinetics.

Sergey V. Lavrov¹ ya-serglavrov@ya.ru  0000-0002-7031-7738
Alexandr S. Belozertsev¹ alex_bel77@mail.ru  0000-0002-7391-0254

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

Abstract. This paper presents a study of the molding process of baker's yeast on an industrial molding machine. The rheological properties of pressed yeast and the kinetics of their molding were investigated. It was established that yeast belongs to viscous non-Newtonian materials. Its effective viscosity significantly decreases with an increase in product moisture and temperature, as well as with an increase in shear rate. The obtained dependencies were approximated by a power function. The analysis of the process kinetics revealed a characteristic pressure distribution across the machine's working zones: from atmospheric in the loading zone to a maximum in the pressing zone, followed by a decrease. An increase in the initial yeast temperature leads to an increase in system pressure due to increased viscous friction. The product temperature increases during the molding process, reaching a maximum in the final zones due to the conversion of mechanical energy into heat, while the system does not return to its initial temperature state. The main conclusion is that to ensure stable yeast quality and reduce energy costs, it is necessary to organize heat removal directly during the molding process, for example, by cooling the working chamber. The obtained results on rheological characteristics and process kinetics are of practical value for optimizing operating modes, designing molding equipment, and developing automation systems for this technological stage.

Keywords: baker's yeast, molding, rheological properties, effective viscosity, non-Newtonian fluid, process kinetics, molding machine, temperature, pressure.

Введение

Процесс формования прессованных хлебопекарных дрожжей является ключевой операцией, определяющей потребительские свойства готового продукта [1–5]. Качество формования напрямую зависит от реологического состояния дрожжевой массы и параметров работы оборудования. Однако управление этим процессом часто осуществляется эмпирически, без полного учета взаимосвязи между свойствами сырья, режимами экструзии и характеристиками конечного продукта [6–10].

Для цитирования

Лавров С.В., Белозерцев А.С. Формование хлебопекарных дрожжей: исследование реологических характеристик и кинетика процесса // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 80–85. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-80-85

Цель работы – комплексное эксперимен-

тальное исследование реологических характеристик прессованных дрожжей и кинетики процесса их формования на промышленном автомате. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: изучение зависимости эффективной вязкости дрожжей от влажности, температуры и скорости сдвига; анализ распределения давления и температуры по длине рабочей камеры формующего автомата; качественное описание механизма течения материала в различных зонах. Объектом исследования служили прессованные хлебопекарные дрожжи.

For citation

Lavrov S.V., Belozertsev A.S. Molding of baker's yeast: study of rheological characteristics and process kinetics. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 80–85. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-80-85

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

Материалы и методы

Исследование процесса формирования дрожжей проводилось на установке, включающей промышленный формовочный автомат фирмы Bouwрасо ВРЕХ 4500 (рисунок 1), оснащенный приборами контроля параметров.

Установка включает привод 1, щит управления 2, приемный бункер 3, ворошители 4, шнек 5, формующий канал 6, калибровочный мундштук 7 и раму 8. В состав установки входит контрольно-измерительная аппаратура для измерения температуры обработки и давления.

Привод автомата состоит из электродвигателя мощностью 22 кВт и редуктора.

Основным рабочим органом автомата является шнек. Общая длина шнека составляет 1500 мм, диаметр цилиндрической части – 270 мм, глубина витков изменяется от 100 до 50 мм, а шаг шнека – от 180 мм в зоне загрузки до 120 мм в зоне формования. Скорость формования составляла 0,116 м/с.

В верхней и нижней частях рабочей камеры автомата выполнены отверстия соответственно под спаи термопар прибора ОВЕН 2 ТРМО и датчик давления КРТ-СТ-25-0,5-12.

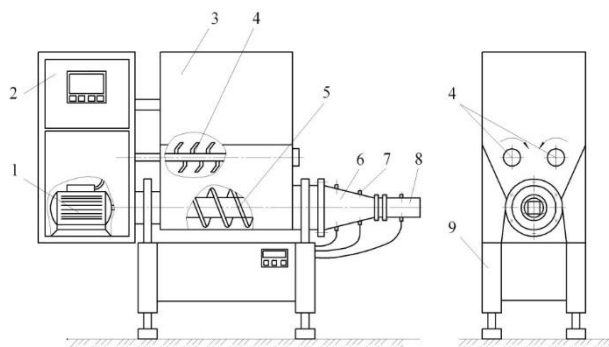


Рисунок 1. Формовочный автомат фирмы Bouwрасо ВРЕХ4500: 1 – привод; 2 – щит управления; 3 – приемный бункер; 4 – ворошители; 5 – шнек; 6 – формующий канал; 7 – датчик давления; 8 – мундштук, 9 – рама

Figure 1. Bouwрасо ВРЕХ4500 molding machine: 1-drive; 2 – control panel; 3 – receiving hopper; 4 – tedders; 5 – auger; 6 – forming channel; 7 – pressure sensor; 8 – mouthpiece, 9 – frame

Дрожжи после вакуум-фильтра, установленного на втором этаже, непрерывным потоком по желобу поступали в приемный бункер автомата и последовательно перемещались шнеком через зоны: I – загрузки формующей массы, II – прессования, III – формования, IV – калибровки (рисунок 2).

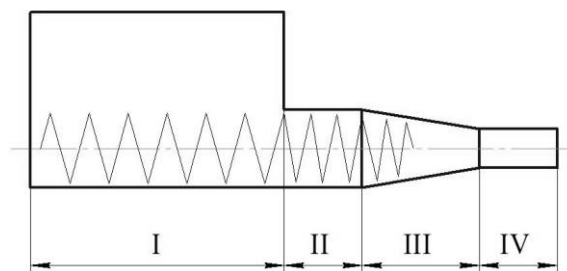


Рисунок 2. Рабочие зоны формовочного автомата: I – зона загрузки формующей массы; II – зона прессования; III – зона формования; IV – зона калибровки

Figure 2. Working zones of the molding machine: I – loading zone of the molded mass; II – pressing zone; III – molding zone; IV – calibration zone

Количество энергии, затрачиваемой на прессование, формование и на работу привода рассчитывалась по формуле $E = UI$, где U , I – напряжение, Вт и сила тока, А.

Показания U и I снимались со щита управления. Поскольку автомат работал в стационарном режиме, количество энергии не зависело от времени, то есть $dE/dt = 0$. По данным многократных замеров количество энергии $E = 7,22...12,2$ кВт.

Измерение производительности формовочного автомата выполнялось весовым методом и составило 2000 т/ч по прессованным дрожжам с влажностью 68%. Отсчет времени при этом проводился с использованием секундомера 16 кл. 2.

С целью проверки воспроизводимости полученных результатов часть опытов проводилась в трехкратной повторности.

Полученные таким образом экспериментальные данные позволяют достаточно полно судить о процессах, происходящих при формировании дрожжей в автомате.

Результаты

Исследование реологических характеристик хлебопекарных дрожжей. Определяющее влияние на протекание процесса формования и качество продукта оказывают реологические свойства, зависящие, в свою очередь, от влажности продукта, температурного режима процесса, а также давления в формующем узле.

Результаты изучения реологических свойств дрожжей необходимы при построении математической модели процесса формования, позволяющей прогнозировать поведение материала в формующем узле установки, а также при создании формующих машин, регулировании основных параметров процесса формования и разработке средств автоматизации.

Реологические исследования различных авторов, позволяют отнести прессованные дрожжи к вязким неньютоновским материалам, поскольку они после снятия нагрузки не восстанавливают первоначальную форму, то есть имеет место необратимая деформация.

Наиболее важным реологическим параметром, определяющим состояние дрожжей, является вязкость (внутреннее трение) – мера сопротивления течению.

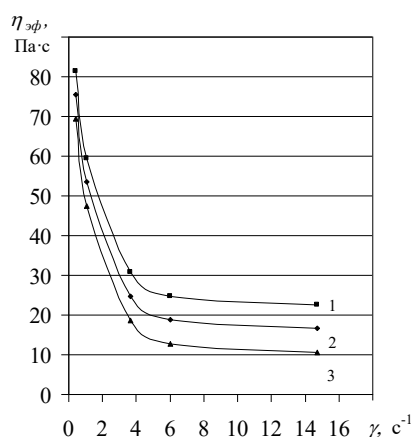


Рисунок 3. Зависимость эффективной вязкости дрожжей $\eta_{эф}$ от скорости сдвига γ при различной влажности $W, \%$: 1 – 68; 2 – 70; 3 – 72. $t = 10^\circ\text{C}$

Figure 3. Dependence of the effective viscosity of yeast η_{eff} on the shear rate γ at different moisture $W, \%$: 1 – 68; 2 – 70; 3 – 72. $t = 10^\circ\text{C}$

Кривые, построенные по экспериментальным данным, имеют одинаковый вид для всех влажностей (рисунок 3) и температур (рисунок 4). Как видно, с повышением влажности и температуры вязкость падает. С увеличением скорости сдвига (при небольших значениях) вязкость резко снижается, затем отмечается плавный переход в область плотной однородной структуры. Так, при скорости сдвига $\gamma = 2 \text{ с}^{-1}$ и $W = 68\%$ (рисунок 3) эффективная вязкость составила $46 \text{ Па}\cdot\text{с}$, а при $\gamma = 6 \text{ с}^{-1}$ – $25 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Аналогичная зависимость прослеживается и при разных температурах. Например, при $\gamma = 2 \text{ с}^{-1}$ и $t = 10^\circ\text{C}$ (рисунок 4) эффективная вязкость составила $40 \text{ Па}\cdot\text{с}$, а при $\gamma = 12 \text{ с}^{-1}$ она равнялась $16 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Опытные данные аппроксимируются степенной зависимостью

$$y = a + bx + cx^2 + dx^{2.5} + ex^3.$$

Значения постоянных a, b, c, d, e сведены в таблицу 1

Исследования проводились на ротационном вискозиметре РВ-8. Принцип определения вязкости основан на измерении скорости вращения внутреннего цилиндра (при неподвижном внешнем) в прессованных дрожжах под действием определенного груза.

Влажность дрожжей изменялась от 68 до 72%, их температура – от 2 до 18°C .

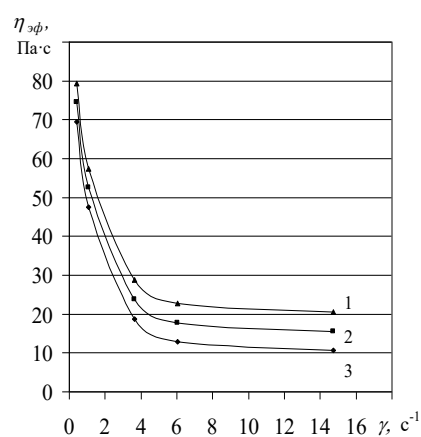


Рисунок 4. Зависимость эффективной вязкости дрожжей $\eta_{эф}$ от скорости сдвига γ при различной температуре $t, ^\circ\text{C}$: 1 – 2; 2 – 10; 3 – 18. $W = 70\%$

Figure 4. The dependence of the effective viscosity of yeast η_{eff} on the shear rate γ at different temperatures $t, ^\circ\text{C}$: 1 – 2; 2 – 10; 3 – 18. $W = 70\%$

Таблица 1.
Значения постоянных a, b, c, d, e при различной влажности и температуре дрожжей

Table 1.
Values of constants a, b, c, d, e at different humidity and temperature of yeast

Влажность, % Moisture (%)	a	b	c	d	e
68	82.178	-34.380	10.246	-3.430	0.334
70	88.617	-33.229	9.337	-3.036	0.287
72	93.510	-29.452	7.370	-2.241	0.197
Температура, °C Temperature (°C)	a	b	c	d	e
2	92.341	-31.321	8.061	-2.474	0.219
10	87.801	-33.715	9.751	-3.217	0.308
18	82.178	-34.380	10.246	-3.430	0.334

Кинетика процесса формирования дрожжей.
Важными параметрами процесса являются давление и температура дрожжей в рабочей камере установки. Знание этих параметров необходимо для получения продукта высокого качества, управления технологическим процессом, расчета формулирующего оборудования и их рабочих элементов.

В результате выполненных экспериментов были построены кривые изменения давления на дрожжи по длине рабочей камеры при различных температурах (рисунок 5).

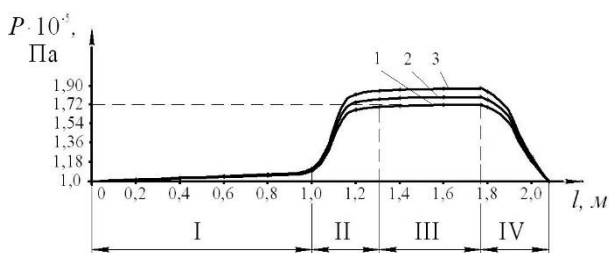


Рисунок 5. Изменение давления p по длине рабочей камеры при различных температурах t_n : 1 – 5 °C, 2 – 10 °C, 3 – 15 °C

Figure 5. The change in pressure along the length of the working chamber at various temperatures: 1 – 5 °C, 2 – 10 °C, 3 – 15 °C

Как видно из рисунка 5, например, при температуре дрожжей $t_n = 5$ °C в зоне загрузки I давление практически остается постоянным и равным атмосферному $p_z = 10^5$ Па; в зоне прессования II оно существенно возрастает и достигает максимального значения $p_{np} = 1,7 \cdot 10^5$ Па. В зоне формирования давление продолжает незначительно возрастать до $p_f = 1,72 \cdot 10^5$ Па, после чего снижается. С повышением температуры дрожжей от 5 до 15 °C давление возрастает из-за увеличения вязкого трения массы о стенки камеры.

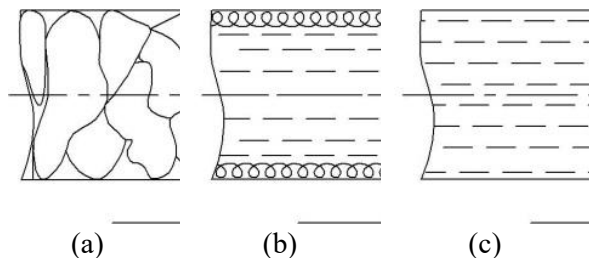


Рисунок 6. Схема перемещения дрожжей в рабочей камере: (а) – зона загрузки; (б) – зона прессования и формирования; (с) – зона калибровки

Figure 6. Scheme of yeast movement in the working chamber: (a) – loading zone; (b) – zone of pressing and molding; (c) – calibration zone

Качественная оценка процесса вязкопластического формирования дрожжей такова. Перемещение дрожжей в начальный момент загрузки протекает с незначительной деформацией при произвольном расположении пластов вследствие того, что давление в камере равно практически атмосферному давлению. По мере перемещения дрожжей к зоне прессования II давление постепенно повышается (рисунок 6, а).

В зонах прессования II и формирования III давление повышается из-за изменения геометрии шнека, имеет место ламинарное течение (сдвиг) спрессованной массы со скольжением материала по внутренней стенке цилиндра рабочей камеры под действием сил трения. Происходит частичная перестройка периферийных слоев (рисунок 6, б). В конце зоны формирования вследствие снижения давления трение периферийных слоев материала о стенки рабочей камеры также снижается. В зоне калибровки имеет место чистый сдвиг жгута, а давление выравнивается до атмосферного (рисунок 6, в). Изменение температуры дрожжей по длине рабочей камеры приведено на рисунок 7. Как видно, температура начинает повышаться в зоне прессования и достигает максимального значения в зонах формирования и калибровки. Это объясняется переходом части механической энергии в теплоту, то есть диссипацией.

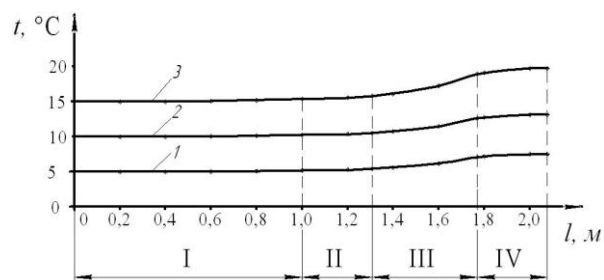


Рисунок 7. Изменение температуры дрожжей по длине рабочей камеры при различных температурах t_n : 1 – 5 °C, 2 – 10 °C, 3 – 15 °C.

Figure 7. Variation of yeast temperature along the length of the working chamber at different temperatures t_n : 1 – 5 °C, 2 – 10 °C, 3 – 15 °C

Казалось бы, что температура должна снижаться в конце процесса формирования (по аналогии с уменьшением давления, рисунок 5). Однако в состоянии температурного равновесия система не возвращается, то есть материал по завершении процесса не релаксирует, поскольку не охлаждается до стартовой температуры. Это объясняется следующим: нагревание дрожжей происходит под действием давления, а теплоотдача от наружной стенки рабочей камеры к окружающей среде затруднена вследствие того, что температура последней, как правило, превышает температуру дрожжей. В летний период теплопритоки увеличиваются, что отрицательно сказывается на качестве дрожжей и повышает энергозатраты на их охлаждение в холодильной камере. Напрашивается вывод о необходимости охлаждения дрожжей в процессе их перемещения с помощью, например, холодной воды.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Прессованные хлебопекарные дрожжи проявляют свойства вязкого неньютоновского материала, и их эффективная вязкость существенно снижается с повышением влажности, температуры и скорости сдвига, что подтверждается полученными зависимостями. Кинетика процесса формирования характеризуется значительным ростом давления в зоне прессования и последующим его спадом, причем повышение начальной температуры дрожжей ведет к увеличению рабочего давления в системе. Установлено, что в процессе формирования происходит монотонный рост температуры продукта вследствие диссипации механической энергии, и система не возвращается в исходное температурное состояние.

Основной практический вывод работы заключается в необходимости организации активного отвода тепла непосредственно в процессе формирования для стабилизации качества дрожжей и снижения энергетических затрат на их последующее охлаждение. Наиболее целесообразным решением является внедрение системы охлаждения рабочей камеры. Полученные экспериментальные данные о реологических свойствах и кинетических закономерностях процесса представляют собой научную основу для оптимизации режимов работы, совершенствования конструкции формирующего оборудования и разработки систем автоматического управления технологическим процессом формирования дрожжей.

Литература

- 1 Shahryari S., Azizi M.H., Ghavidel R.A. et al. Application of sprouted soybean sourdough to improve textural features, mold-free shelf-life, aroma and amino acid profiles of the supplemented wheat bread // *Applied Food Research*. 2025. V. 5. P. 101540.
- 2 Moulaei S., Shahidi F., Varidi M. et al. Effect of magnetized water on rheological properties of wheat flour, quality characteristics of frozen dough, and subsequent bread // *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2025. V. 19. P. 1–14.
- 3 Montes L., Correa M.J., Ferrero C. Effect of polyphenols from *Ascophyllum nodosum* seaweeds on the rheology and digestion of corn starch gels and gluten-free bread features // *Heliyon*. 2024. V. 10. № 7. P. e28544.
- 4 She Z., Wang X., Li H. et al. Partial substitution of wheat flour with kiwi starch: Rheology, microstructure changes in dough and the quality properties of bread // *Food Chemistry: X*. 2024. V. 23. P. 101614.
- 5 Merijs-Meri R., Zicans J., Ivanova T. et al. Melt-Processed Polybutylene-Succinate Biocomposites with Chitosan: Development and Characterization of Rheological, Thermal, Mechanical and Antimicrobial Properties // *Polymers*. 2024. V. 16. № 19. P. 2808.
- 6 Nikolaou Ya.N., Krokida M.K., Karathanos V.T. Enrichment of bakery products with different formulations of bioactive microconstituents from black Corinthian grape: Impact on physicochemical and rheological properties in dough matrix and final product // *Journal of Cereal Science*. 2022. V. 108. P. 103566.
- 7 Saleh O., Hrušková M., Smejkalová E. Enhancing rheological properties of dough and quality of potato fibre-enriched bread // *Czech Journal of Food Sciences*. 2025. V. 43. P. 1–12.
- 8 Demarinis C., Verni M., Pinto L. et al. Effect of LAB starters on technological and functional properties of composite carob and chickpea flour plant-based gurt // *Future Foods*. 2024. V. 9. P. 100289.
- 9 Boltenko Ya.N., Ivanov S.S., Petrova O.V. et al. The effect of the dosage of table salt on the change of rheological properties of wheat dough // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 5 (131). С. 3–10.
- 10 Chochkov R., Taneva D., Petkova N. et al. Effects of teff-based sourdoughs on dough rheology and gluten-free bread quality // *Foods*. 2022. V. 11. № 7. P. 1012.
- 11 Якияева М., Истаев А., Якияева М.А. и др. Исследование реологических свойств бездрожжевого теста из пшеничной муки первого и второго сорта // *Известия НАН РК. Серия химии и технологии*. 2021. № 5-6. С. 99–111.
- 12 Невзоров В.Н., Петров А.С., Сидорова О.В. и др. Способ производства пшенично-ячменного зернового хлеба из шелушенного зерна // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2024. № 1 (202). С. 215–221.
- 13 Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А., Ткачева Е.Д. Совершенствование рецептуры и технологии хлеба пшеничного с использованием яблочных выжимок // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2020. Т. 82. № 2 (84). С. 61–66.
- 14 Зинина О.В., Хиценко А.В., Неверова О.П. и др. Разработка рецептуры хлеба, обогащенного концентратом пищевых волокон из вторичного растительного сырья // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2022. Т. 10. № 4. С. 57–67.
- 15 Al-Sharify Z.T., Al-Sharify T.A., Al-Sharify N.H. et al. Non-Thermal Technologies in Food Processing: Implications for Food Quality and Rheology // *Applied Sciences*. 2025. V. 15. № 6. P. 2512.
- 16 Premi M., Sharma V. Mixing and forming // *Agro-Processing and Food Engineering: Operational and Application Aspects* / Ed. by M. Premi, V. Sharma. Singapore: Springer Singapore, 2022. P. 253–305.
- 17 Cappelli A., Bettaccini L., Cini E. The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. V. 104. P. 91–101.
- 18 Bykova N.Y., Chernykh V.Y. Development of a modern methodology for experimental laboratory baking of rye bread // *AIP Conference Proceedings*. 2022. V. 2478. № 1. P. 060002.
- 19 Qian X., Zhang Y., Li J. et al. Milling and roasting impact pasting and rheological properties of oat flours and quality of steamed oat cakes // *LWT – Food Science and Technology*. 2023. V. 175. P. 114477.
- 20 Dong Y.N., Karboune S. A review of bread qualities and current strategies for bread bioprotection: Flavor, sensory, rheological, and textural attributes // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. V. 20. № 2. P. 1937–1981.

References

- 1 Shahryari S., Azizi M.H., Ghavidel R.A. et al. Application of sprouted soybean sourdough to improve textural features, mold-free shelf-life, aroma and amino acid profiles of the supplemented wheat bread. *Applied Food Research*. 2025. vol. 5. p. 101540.
- 2 Moulaei S., Shahidi F., Varidi M. et al. Effect of magnetized water on rheological properties of wheat flour, quality characteristics of frozen dough, and subsequent bread. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2025. vol. 19. pp. 1–14.
- 3 Montes L., Correa M.J., Ferrero C. Effect of polyphenols from *Ascophyllum nodosum* seaweeds on the rheology and digestion of corn starch gels and gluten-free bread features. *Heliyon*. 2024. vol. 10. no. 7. p. e28544.
- 4 She Z., Wang X., Li H. et al. Partial substitution of wheat flour with kiwi starch: Rheology, microstructure changes in dough and the quality properties of bread. *Food Chemistry: X*. 2024. vol. 23. p. 101614.
- 5 Merijs-Meri R., Zicans J., Ivanova T. et al. Melt-Processed Polybutylene-Succinate Biocomposites with Chitosan: Development and Characterization of Rheological, Thermal, Mechanical and Antimicrobial Properties. *Polymers*. 2024. vol. 16. no. 19. p. 2808.
- 6 Nikolaou E.N., Krokida M.K., Karathanos V.T. Enrichment of bakery products with different formulations of bioactive microconstituents from black Corinthian grape: Impact on physicochemical and rheological properties in dough matrix and final product. *Journal of Cereal Science*. 2022. vol. 108. p. 103566.
- 7 Saleh O., Hrušková M., Smejkalová E. Enhancing rheological properties of dough and quality of potato fibre-enriched bread. *Czech Journal of Food Sciences*. 2025. vol. 43. pp. 1–12.
- 8 Demarinis C., Verni M., Pinto L. et al. Effect of LAB starters on technological and functional properties of composite carob and chickpea flour plant-based gurt. *Future Foods*. 2024. vol. 9. p. 100289.
- 9 Boltenko Ya.A., Ivanov S.S., Petrova O.V. et al. The effect of the dosage of table salt on the change of rheological properties of wheat dough. *International Research Journal*. 2023. no. 5 (131). pp. 3–10. (in Russian)
- 10 Chochkov R., Taneva D., Petkova N. et al. Effects of teff-based sourdoughs on dough rheology and gluten-free bread quality. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 7. p. 1012.
- 11 Yakiyayeva M., Istayev A., Yakhiiyeva M.A. et al. Study of rheological properties of yeast-free dough from first and second grade wheat flour. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Chemistry and Technology*. 2021. no. 5-6. pp. 99–111. (in Russian)
- 12 Nevzorov V.N., Petrov A.S., Sidorova O.V. et al. Method for producing wheat-barley grain bread from husked grain. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2024. no. 1 (202). pp. 215–221. (in Russian)
- 13 Kovaleva A.E., Pyankova E.A., Tkacheva E.D. Improvement of the recipe and technology of wheat bread using apple pomace. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020. vol. 82. no. 2 (84). pp. 61–66. (in Russian)
- 14 Zinina O.V., Khitsenko A.V., Neverova O.P. et al. Development of a recipe for bread enriched with a dietary fiber concentrate from secondary plant raw materials. *Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2022. vol. 10. no. 4. pp. 57–67. (in Russian)
- 15 Al-Sharify Z.T., Al-Sharify T.A., Al-Sharify N.H. et al. Non-Thermal Technologies in Food Processing: Implications for Food Quality and Rheology. *Applied Sciences*. 2025. vol. 15. no. 6. p. 2512.
- 16 Premi M., Sharma V. *Mixing and forming. Agro-Processing and Food Engineering: Operational and Application Aspects*. Ed. by M. Premi, V. Sharma. Singapore: Springer Singapore, 2022. pp. 253–305.
- 17 Cappelli A., Bettaccini L., Cini E. The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. vol. 104. pp. 91–101.
- 18 Bykova N.Y., Chernykh V.Y. Development of a modern methodology for experimental laboratory baking of rye bread. *AIP Conference Proceedings*. 2022. vol. 2478. no. 1. p. 060002.
- 19 Qian X., Zhang Y., Li J. et al. Milling and roasting impact pasting and rheological properties of oat flours and quality of steamed oat cakes. *LWT – Food Science and Technology*. 2023. vol. 175. p. 114477.
- 20 Dong Y.N., Karboune S. A review of bread qualities and current strategies for bread bioprotection: Flavor, sensory, rheological, and textural attributes. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. vol. 20. no. 2. pp. 1937–1981.

Сведения об авторах

Сергей В. Лавров к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ya-serglavrov@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7031-7738>

Александр С. Белозерцев к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alex_bel77@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7391-0254>

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

Sergey V. Lavrov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ya-serglavrov@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7031-7738>

Alexandr S. Belozertsev Cand. Sci. (Engin.), physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alex_bel77@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7391-0254>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/11/2025	После редакции 20/11/2025	Принята в печать 15/12/2025
Received 03/11/2025	Accepted in revised 20/11/2025	Accepted 15/12/2025

Эффективность комбинированного ферментативного гидролиза для получения высокобелкового гидролизата из гороха

Павел С. Бикбулатов	¹	bikbulatovpavel@mail.ru	 0000-0002-1285-4797
Наталья А. Панкратьева	¹	nata-pankratieva@ya.ru	 0000-0002-9831-3635
Ольга В. Чугунова	¹	chugun.ova@ya.ru	 0000-0002-7039-4047
Людмила А. Донскова	¹	cafedra@list.ru	 0000-0002-8396-0431

¹ Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия

Аннотация. Исследована эффективность ферментативных и комбинированных методов выделения и модификации растительного белка из гороха для получения высокобелкового гидролизата с улучшенными функциональными свойствами. Цель работы состояла в сравнительной оценке различных схем гидролиза и обосновании оптимального технологического решения. Объектом исследования служили гидролизаты белка гороха, полученные без обработки, с применением протеазы и лактата кальция, а также при последовательном использовании амилазы и протеазы. Установлено, что контрольный образец характеризуется низкой массовой долей белка 27.5% и отсутствием выраженного гидролиза. Использование протеазы в сочетании с лактатом кальция обеспечивает повышение содержания белка до 55.8% и степень гидролиза 9.77%, что связано с расщеплением глобулярных белков и улучшением их растворимости. Наибольший эффект достигнут при комбинированном ферментативном гидролизе с предварительным действием амилазы, при котором массовая доля белка возрастает до 70.5%, содержание аминного азота достигает 698.66 мг на 100 г, а степень гидролиза составляет 13.41%. Снижение выхода сухого остатка с 28.5 до 16.8 г подтверждает эффективное удаление небелковых компонентов, прежде всего крахмала и клетчатки. Показано, что применение амилазы снижает вязкость системы и повышает доступность белкового субстрата для протеазы, а лактат кальция интенсифицирует коагуляцию и отделение белковой фазы. Сделан вывод о целесообразности использования комбинированного ферментативного гидролиза для получения высокобелковых растительных ингредиентов с повышенной биодоступностью, которые рекомендованы для функциональных и специализированных пищевых продуктов.

Ключевые слова: растительный белок, горох, ферментативный гидролиз, протеаза, амилаза, лактат кальция, выделение белка, гидролизат белка, степень гидролиза.

Efficiency of combined enzymatic hydrolysis for producing high-protein hydrolysate from pea

Pavel S. Bikbulatov	¹	bikbulatovpavel@mail.ru	 0000-0002-1285-4797
Natalia A. Pankratyeva	¹	nata-pankratieva@ya.ru	 0000-0002-9831-3635
Olga V. Chugunova	¹	chugun.ova@ya.ru	 0000-0002-7039-4047
Lyudmila A. Donskova	¹	cafedra@list.ru	 0000-0002-8396-0431

¹ Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia

Abstract. The study evaluates the efficiency of enzymatic and combined approaches for the extraction and modification of pea protein aimed at producing a high protein hydrolysate with improved functional properties. The objective was to compare different hydrolysis schemes and to justify an optimal technological solution. Pea protein hydrolysates obtained without treatment, with protease and calcium lactate, and with sequential application of amylase and protease were investigated. The control sample showed a low protein content of 27.5% and no significant hydrolysis. The use of protease combined with calcium lactate increased the protein content to 55.8% with a degree of hydrolysis of 9.77%, which is attributed to the breakdown of globular proteins and improved solubility. The highest efficiency was achieved using combined enzymatic hydrolysis with preliminary amylase treatment, resulting in a protein content of 70.5%, an amino nitrogen level of 698.66 mg per 100 g, and a degree of hydrolysis of 13.41%. The reduction in dry matter yield from 28.5 to 16.8 g confirms effective removal of non protein components, primarily starch and dietary fiber. It is shown that amylase decreases system viscosity and increases protein availability for protease action, while calcium lactate enhances protein coagulation and phase separation. The results demonstrate the feasibility of combined enzymatic hydrolysis for producing high protein plant ingredients with improved bioavailability recommended for functional and specialized food products.

Keywords: vegetable protein, pea, enzymatic hydrolysis, protease, amylase, calcium lactate, protein isolation, protein hydrolysate, degree of hydrolysis.

Для цитирования

Бикбулатов П.С., Панкратьева Н.А., Чугунова О.В., Донскова Л.А. Эффективность комбинированного ферментативного гидролиза для получения высокобелкового гидролизата из гороха // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 86–92. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-86-92

For citation

Bikbulatov P.S., Pankratieva N.A., Chugunova O.V., Donskova L.A. Efficiency of combined enzymatic hydrolysis for producing high-protein hydrolysate from pea. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 86–92. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-86-92

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

Введение

Несмотря на то, что растения могут являться источником белка, существует ряд факторов, препятствующих широкому их распространению в качестве альтернативы животным белкам. Так, общее содержание белка в растительных продуктах намного ниже, в сравнении с животными. Данный фактор приводит к необходимости потребления либо большого количества продуктов растительного происхождения, с целью достижения необходимого уровня белка в рационе, либо выделять и концентрировать растительный белок, что является технологически достаточно трудоемко. При этом сложность выделения белка из продуктов растительного происхождения связана с тем фактом, что полученный белок имеет ограниченность в незаменимых аминокислотах и имеет более низкую усвояемость ввиду наличия антипитательных факторов, что говорит о необходимости поиска путей подавления их влияния [1–3]. Так, например, зерновые культуры как овес, риса, кукуруза и пшеница, ограничены в лизине; фасоль и колотый желтый горох ограничены в содержании триптофана. При этом, чтобы потребить 10 г. эквивалентного качественного белка, потребуется 32,2 г жареной куриной грудки, 79,5 г вареных яиц, 63 г. нутовой муки, 187 г. очищенного ячменя и 113 г оптимизированной смеси нута и ячменя. Такое количество продукта приведет к потреблению калорий в размере 53 ккал для курицы, 123 ккал для яйца, 244 ккал для нута, 636 ккал для ячменя и 401 ккал для оптимизированной смеси [4–6]. Данный фактор указывает на то, что потребление эквивалентного количества качественного белка требует потребления большего количества растительного белка. Комбинация продуктов различного происхождения может быть способом снижения общего количества калорий в рационе.

Ряд исследований показали, что растительные белки эффективны для снижения веса и его поддержания на заданном уровне [3, 4]. Данный фактор обуславливается низкой энергетической ценностью растительных продуктов и повышенным чувством насыщения после потребления. Преимущества включения данных продуктов в рацион, также обуславливаются снижением риска развития диабета, поддержкой здоровья при ишемической болезни и снижением общего артериального давления [2–4].

Ферментативные методы и использование солей кальция, могут существенно влиять на структуру и свойства белков, что позволяет улучшать их технологические качества [5, 6].

Изучение воздействия протеаз и солей кальция (в частности, лактата кальция) на растительные белки является ключевым для разработки новых подходов к их модификации и применения. В ранее рассмотренных работах было показано, что протеазы могут эффективно расщеплять белковые молекулы, изменяя их функциональные характеристики, например, улучшая пенообразующие свойства [2, 7, 8]. В то же время ряд исследований указывает о положительном влиянии солей кальция на коагуляцию и осаждение белков в растительных экстрактах [10, 11].

В исследовании представлены результаты исследований, направленные на изучение влияния ферментных препаратов – протеазы, амилазы, целлюлазы и вспомогательного компонента – лактата кальция на выделение белка из гороха и подсолнечного шрота в результате ферментативного гидролиза. Применение данного ферментного комплекса (протеаза + амилаза + целюлаза) в среде, активированной лактатом кальция, позволяет проводить многостадийный гидролиз сырья с высокой эффективностью. Это комплексное решение направлено на максимальное извлечение и модификацию целевых белковых компонентов при одновременном удалении основных балластных веществ. В ходе исследований выдвигаются гипотезы о том, что:

- протеаза, оказывает влияние на структуру белка и его растворимость, что должно отразиться на массе сухого остатка. Предполагается, что протеаза будет способствовать расщеплению белковых молекул, что может привести к уменьшению массы сухого остатка по сравнению с контрольным образцом или с образцами, где протеаза не применялась;

- лактат кальция, оказывает влияние на коагуляцию белков, что может оказать влияние на массу сухого остатка. Так, лактат кальция может способствовать образованию более плотного осадка, что позволит увеличить массу сухого остатка по сравнению с образцами, где лактат кальция не применялся;

- комбинированное воздействие протеазы и лактата кальция может привести к более выраженным изменениям, нежели при использовании этих добавок по отдельности. Ожидается, что комбинированное воздействие может привести к изменению как массы, так и структуры сухого остатка, а также к изменению свойств жидкой фракции;

- амилаза – способна оказать влияние на разрушение основного полисахарида в зернах гороха – крахмал. Использование данного фермента в общей системе гидролиза, позволит

существенно снизить содержание углеводов, расщепляя их до более простых сахаров – мальтозу и глюкозу. Изменение углеводного состава позволит достичь наиболее чистый конечный продукт, обладающий повышенным содержанием белка;

— целлюлаза, позволяет направленно разрушать основной углеводный компонент подсолнечного шрота – клетчатку, состоящая в значительной степени из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Снижение углеводов в составе подсолнечного шрота в свою очередь позволит повысить количество высвобождаемого белка и получения наиболее чистого конечного продукта.

Стоит отметить, что данные компоненты относятся к категории безопасных и экологических добавок, разрешённых для использования в пищевой промышленности [9, 10]. Их химическая природа определяет разные, однако в общей структуре, взаимодополняющие механизмы действия в технологическом процессе выделения растительного белка из первичного сырья. «Протозим Н» действует как биологический катализатор, модифицируя молекулярную структуру белков, в то время как амилаза, являясь ферментом, содержащимся в ЖКТ и целлюлаза, продуцируемая из грибов, позволяет существенно снизить углеводную составляющую продукта, а лактат кальция функционирует как физико-химический модификатор [11, 12].

Добавление протеазы в процессе получения гидролизата белка из зерен гороха оказывает комплексное воздействие на процесс выделения, существенно влияя на конечный общий выход продукта. Так, ферментативный гидролиз с применением протеазы «Протозим Н» способствует [12]:

— разрушению сложной белковой матрицы зерен гороха, расщепляя глобулярные белки (легумин и вицилин) на более мелкие пептидные фрагменты. Данное разрушение приводит к значительному повышению растворимости белковых компонентов в водной среде, что облегчает их переход в экстракт при стандартных условиях экстракции (рН 7–8, температура 50–55 °С);

— снижению общей молекулярной массы белков, что минимизирует их агрегацию и улучшает фильтруемость раствора. В результате доля белка, остающегося в нерастворимом осадке, сокращается, а общий выход увеличивается на 15–25% по сравнению с методами безферментативной экстракции;

— способствует разрушению антипитательных соединений (ингибиторы трипсина), способные в нативном состоянии препятствовать полноценной экстракции белка.

Использование амилазы оказывает существенное влияние на процесс получения гидролизата белка гороха, являясь косвенным, но при этом крайне важным компонентом для повышения эффективности и качества конечного продукта. Таким образом, внесение амилазы в общей методике получения гидролизата белка гороха позволяет достигнуть:

Расщепление крахмала, значительно содержащегося в зернах гороха (40–60%), до мальтозы и глюкозы, что в свою очередь способствует резкому снижению вязкости раствора, что упрощает дальнейшую экстракцию белка и повышению его концентрации в конечном продукте;

Улучшение доступа протеазы к субстрату, благодаря снижению вязкости, создаваемой крахмалом, «экранирующий» необходимые белковые молекулы и снижающий возможность их связывания с протеазами;

Стандартизации процесса, благодаря снижению содержанию крахмала, что позволяет легче контролировать и стандартизировать условия проведения гидролиза (рН, температура, концентрация фермента);

Улучшения органолептических показателей, благодаря образованию сахаров, снижающих горечь, а также не позволяющих первоначальным молекулам крахмала взаимодействовать с белками / пептидами, способных формировать нежелательные оттенки вкуса.

Внесение лактата кальция в общем методе получения гидролизата белка гороха, оказывается ряд ключевых воздействий на технологический процесс и качество конечного продукта. Так, добавление лактата кальция в общей системе получения гидролизата белка, данный компонент выполняет функцию:

Эффективного коагулянта, способствуя осаждению белковых молекул в их изoeлектрической точке (рН 4,5–5,5). Данный процесс происходит благодаря взаимодействию ионов кальция с отрицательно заряженными карбоксильными группами (–COOH) белковых молекул, что приводит к снижению их растворимости и образованию плотного осадка;

Повышения эффективности выделения белка, поскольку выход продукта увеличивается на 15–20% по сравнению с методами, не использующими коагулянты. При этом образуется осадок с улучшенными структурными характеристиками, что облегчает его последующее отделение центрифугированием или фильтрацией;

Снижение первоначального растительного вкуса в полученном гидролизате белка без формирования дополнительного привкуса, в сравнении с другими солями кальция (например, хлорида кальция);

Способствование стабилизации белковой структуры, благодаря улучшению функциональные свойства как: водоудерживающая способность и гелеобразование [11, 12].

Материалы и методы

Объектом исследований были гидролизаты белка гороха – ГБП 1, ГБП 2, ГБП 3. Сырьем для получения белковых гидролизатов является сухой цельный горох сортов «Самариус» (Свердловская область, урожая 2024 г.). Общее содержание белка в таком горохе 26–28%, отличается высоким содержанием незаменимых аминокислот, включая лизин 1,70–1,85 г/100 г и метионин 0,27–0,32 г/100 г.

Белковые гидролизаты были получены при различных режимах ферментативного гидролиза по следующей методике: очищенный от примесей и промытый горох измельчали до размера частиц не более 300 мкм после чего диспергировали в воде в соотношении 1:10 для получения основной суспензии.

Гидролиз белка проводили параллельно тремя методами с целью определения наиболее эффективного из них:

— ГБП 1 – водную суспензию выдерживали в течение 2 часов при 25 °С, после чего центрифугировали при 10000× g, 5 мин, 20° и фильтровали с последующей сушкой сухого остатка;

— ГБП 2 – водную суспензию доводили раствором 1М NaOH до pH 8,0, вносили фосфатный буфер и нагревали до t 50–55 °С, после чего вносили 0,5% лактата кальция от массы суспензии и 1,5% протеазы от массы измельченного гороха. Полученную суспензию выдерживали в течение 1,5 часов, при постоянной t, после чего центрифугировали при 10000× g, 5 мин при 20° и фильтровали с последующей сушкой сухого остатка;

— ГБП3 – водную суспензию доводили раствором 10% лимонной к-ты до pH 4,2–5,6, после чего нагревали до 50–55 °С, вносили 1% целлюлазы и выдерживали в течение 50–60 мин при постоянном перемешивании. Полученную суспензию центрифугировали, после чего твердую фазу отделяли с последующей сушкой и повторно диспергировали водой. Вторичную водную суспензию доводили раствором 1М NaOH до pH 8,0. Далее в ГБП 2 и ГБП 3 вносили фосфатный буфер и нагревали до t 50–55 °С, после чего вносили 0,5% лактата кальция от массы суспензии и 1,5% протеазы от массы сухого остатка первичного гидролиза. Полученную суспензию выдерживали в течение 1,5 часов, при постоянной t и перемешивании, после чего центрифугировали при 10000× g, 5 мин, 20° и фильтровали с последующей сушкой сухого остатка.

Разработка параметров контролируемого ферментативного гидролиза с применением комбинации протеазы, целлюлазы и лактата кальция позволит получить гидролизат белка гороха с заданной степенью гидролиза (СГ) и определенными функционально-технологическими свойствами (растворимость, эмульгирующая и пенообразующая способность), а также высокой биодоступностью и сниженной антигенной активностью. Схема выделения белка из семян гороха представлена на рисунке 1.

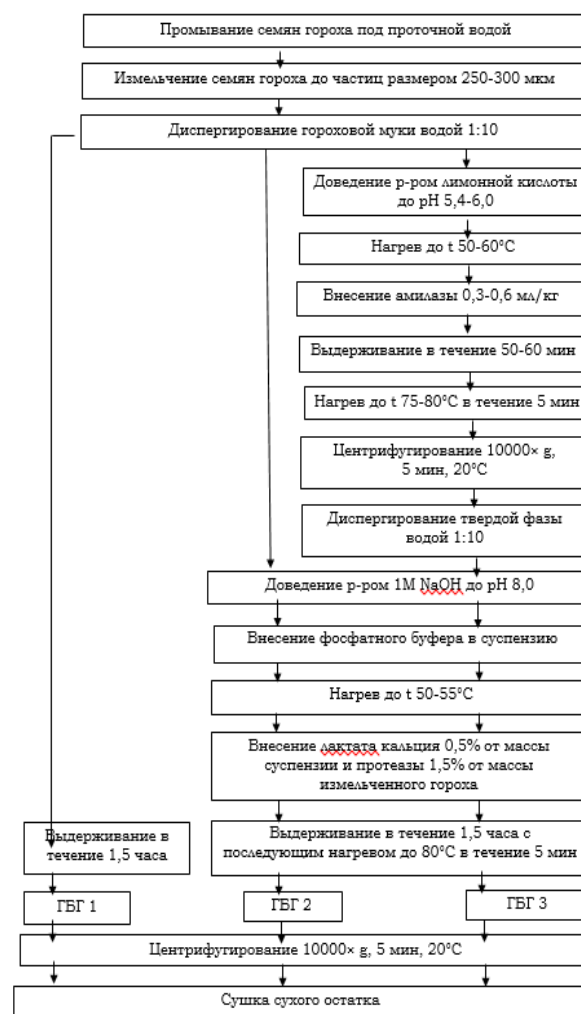


Рисунок 1. Схема получения гидролизата белка гороха
Figure 1. Scheme for obtaining pea protein hydrolysate

Первым этапом получения гидролизата белка гороха является промывание зерен гороха проточной водой и измельчение до частиц размером 250–300 мкм, с последующим их диспергированием в воде в соотношении 1:10 для получения основной суспензии. После чего проводили 3 параллельных варианта гидролиза белка:

В первом варианте (ГБП1) водную суспензию выдерживают в течение 2 часов при 25 °С, после чего центрифугируют при 10000× g, 5 мин, 20° и фильтруют с последующей сушкой сухого остатка;

Во втором варианте водную суспензию доводят раствором 1М NaOH до pH 8,0, вносят фосфатный буфер и нагревают до t 50–55 °С, после чего вносят 0,5% лактата кальция от массы суспензии и 1,5% протеазы от массы измельченных зерен гороха. Полученную суспензию выдерживают в течение 1,5 часов, при постоянной t и помешивании. После чего нагревают 80 °С в течение 5 минут, центрифугируют при 10000 • g, 5 мин, 20° с последующей сушкой сухого остатка;

В третьем варианте (ГБГ3) первичную суспензию доводят раствором 10% лимонной кислоты до pH 5,4–6,0, после чего нагревают до 50–60 °С, вносят амилазу из расчёта 0,3–0,6 мл/кг и выдерживают в течение 50–60 мин при постоянном помешивании. Полученную суспензию нагревают до 75–80 °С в течение 5 минут,

центрифугируют, отделяют твердую фазу и повторно диспергируют водой.

Вторичную водную суспензию доводят раствором 1М NaOH до pH 8,0, вносят фосфатный буфер и нагревают до t 50–55 °С, после чего вносят 0,5% лактата кальция от массы суспензии и 1,5% протеазы от массы сухого остатка первичного гидролиза. Полученную суспензию выдерживают в течение 1,5 часов, при постоянной t и помешивании. После чего нагревают 80 °С в течение 5 минут, центрифугируют при 10000× g, 5 мин, 20° с последующей сушкой сухого остатка.

Результаты и обсуждение

Физико-химические показатели образцов белка гороха, полученного различными способами представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты получения гидролизата белка гороха

Table 1.

Results of obtaining pea protein hydrolysates

Показатель Indicator	ГБГ 1	ГБГ 2	ГБГ 3
Выход, г Yield, g	28,5 ± 0,2	24,1 ± 0,2	16,8 ± 0,2
Массовая доля влаги, % Moisture content, %	8,2 ± 0,2	7,5 ± 0,2	5,5 ± 0,2
Массовая доля белка, % Protein content, %	27,5 ± 0,2	55,8 ± 0,2	70,5 ± 0,2
Массовая доля аминного азота, мг/100 г Amino nitrogen content, mg/100 g	134,62 ± 6,73	329,41 ± 16,47	698,66 ± 34,93
Степень гидролиза, % Degree of hydrolysis, %	-	9,77	13,41

Анализ результатов получения гидролизатов белка гороха показал, что применение только протеазы (ГБГ 2) позволило повысить массовую долю белка с 27,5% до 55,8% по сравнению с контролем (ГБГ 1). При этом наибольшая эффективность достигнута при комбинированной обработке амилазой и протеазой (ГБГ 3), где содержание белка достигло 70,5% при степени гидролиза 21,2%. Снижение выхода продукта с 28,5 г до 16,8 г подтверждает эффективное удаление основных небелковых компонентов (крахмала и клетчатка) в процессе ферментативного гидролиза, что доказывает эффективность последовательной ферментативной обработки для получения высокобелкового концентрата из гороха.

Проведённое исследование подтверждает эффективность применения комбинированных ферментативных подходов для выделения и концентрирования белка из растительного сырья, в частности из гороха. Использование протеазы в сочетании с лактатом кальция позволяет увеличить содержание белка в продукте более чем в два раза по сравнению с контрольным образцом, а последовательная обработка амилазой и протеазой обеспечивает максимальное очищение от углеводных компонентов, повышая массовую долю белка до 70,5%.

Ключевыми преимуществами предложенной технологии являются:

- Значительное увеличение выхода белка и степени его гидролиза.
- Удаление антипитательных факторов и балластных веществ (крахмала, клетчатки).
- Улучшение функциональных свойств белка (растворимость, стабильность).
- Безопасность и экологичность применяемых реагентов (ферменты, лактат кальция), разрешённых для использования в пищевой промышленности.

Таким образом, разработанный метод комбинированного ферментативного гидролиза представляет собой перспективное решение для производства высококачественных растительных белковых концентратов и гидролизатов. Эти ингредиенты могут быть использованы в производстве функциональных продуктов питания, спортивного питания, а также в качестве альтернативы животным белкам в условиях растущего спроса на растительные продукты. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию параметров процесса, изучение влияния полученных белков на органолептические свойства конечных продуктов и оценку их биологической ценности *in vivo*.

Литература

- 1 Чугунова О.В., Бикбулатов П.С., Девяткин Д.И. и др. Ресурсный потенциал сортов гороха Свердловской области для получения белковых гидролизатов // Индустрия питания. 2025. Т. 10. № 3. С. 53–61. doi: 10.29141/2500-1922-2025-10-3-6
- 2 Иванчихина О.В. Значение белка в профилактике и лечении заболеваний // Медицина. Социология. Философия. Прикладные исследования. 2023. № 2. С. 59–62.
- 3 Куликов Д.С., Аксенова Л.М., Самойлова А.М. Функционально-технологические свойства белковых продуктов из зернобобовых культур и их модификация под влиянием различных факторов. Часть 1 // Пищевая промышленность. 2024. № 3. С. 20–25. doi: 10.52653/PPI.2024.3.3.004
- 4 Позняковский В.М. Вызовы и стратегические мегатренды современной нутрициологии // Индустрия питания. 2024. Т. 9. № 2. С. 5–12. doi: 10.29141/2500-1922-2024-9-2-1
- 5 Куликов Д.С., Королев А.А. Функционально-технологические свойства белковых продуктов из зернобобовых культур и их модификация под влиянием различных факторов. Часть 2 // Пищевая промышленность. 2024. № 8. С. 35–44. doi: 10.52653/PPI.2024.8.8.007
- 6 Бикбулатов П.С., Чугунова О.В., Заворохина Н.В. Анализ современного рынка растительных белков и технологических решений их получения // Вестник КрасГАУ. 2025. № 5 (218). С. 244–260. doi: 10.36718/1819-4036-2025-5-244-260
- 7 Matoba T., Hata T. Relationship between bitterness of peptides and their chemical structures // Agricultural and Biological Chemistry. 1972. V. 36. P. 1423–1431.
- 8 Leksrisompong P.P., Miracle R.E., Drake M.A. Characterization of Flavor of Whey Protein Hydrolysates // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2010. V. 58. № 10. P. 6318–6327.
- 9 Chatterjee C., Gleddie S., Xiao C.W. Soybean bioactive peptides and their functional properties // Nutrients. 2018. V. 10. № 9. P. 1211. doi: 10.3390/nu10091211
- 10 Куликов Д.С., Королев А.А. Аспекты ферментативной модификации растительных белков // Пищевые системы. 2025. Т. 8. № 1. С. 22–28. doi: 10.21323/2618-9771-2025-8-1-22-28
- 11 Матишова Д.А., Приходько Д.В., Красноштанова А.А. Получение белковых изолятов на основе муки бобовых // Бултеровские сообщения. 2025. Т. 81. № 1. С. 114–124. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/25-81-1-114
- 12 Витол И.С. Характеристика продуктов ферментативной модификации семян бобовых культур // Пищевая промышленность. 2024. № 10. С. 73–76. doi: 10.52653/PPI.2024.10.10.014
- 13 Шариков А.Ю., Иванов В.В., Амелякина М.В. Влияние перемешивания на эффективность ферментативного гидролиза высококонцентрированных сред экструдированного крахмала кукурузы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3. С. 96–103. doi: 10.20914/2310-1202-2020-3-96-103
- 14 Sareen J., Shi D., Stone A.K. et al. Effect of enzyme hydrolysis on the physicochemical, functional, and nutritional properties of pea and faba bean protein isolates // European Food Research and Technology. 2023. V. 249. № 12. P. 3175–3190. doi: 10.1007/s00217-023-04358-y
- 15 Gharibzadeh S.M.T., Smith B., Altintas Z. Bioactive and health-promoting properties of enzymatic hydrolysates of legume proteins: a review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. V. 64. № 9. P. 2548–2578. doi: 10.1080/10408398.2022.2124399
- 16 García Arteaga V., Leeb E., Liu Y. et al. Enzymatic hydrolysis and fermentation of pea protein isolate and its effects on antigenic proteins, functional properties, and sensory profile // Foods. 2022. V. 11. № 1. P. 118. doi: 10.3390/foods11010118
- 17 Tulbek M.C., Wang Y.L., Hounjet M. Pea—a sustainable vegetable protein crop // Sustainable Protein Sources / Ed. by S.R. Nadathur, J.P.D. Wanasundara, L. Scanlin. 2nd ed. Cambridge: Academic Press, 2024. P. 143–162. doi: 10.1016/B978-0-323-91652-3.00027-7
- 18 Shanthakumar P., Klepacka J., Bains A. et al. The current situation of pea protein and its application in the food industry // Molecules. 2022. V. 27. № 16. P. 5354. doi: 10.3390/molecules27165354
- 19 David Troncoso F., Alberto Sánchez D., Luján Ferreira M. Production of plant proteases and new biotechnological applications: an updated review // ChemistryOpen. 2022. V. 11. № 3. P. e202200017. doi: 10.1002/open.202200017
- 20 Tiruneh A., Ptaszek P., Żmudziński D. et al. Peas (*Pisum sativum* subsp. *arvense* Asch) and Beans (*Vicia faba* var. *minor*) as Source of Quality Plant Proteins // Molecules. 2025. V. 30. № 9. P. 2009. doi: 10.3390/molecules30092009

References

- 1 Chugunova O.V., Bikbulatov P.S., Devyatkin D.I. et al. Resource potential of pea varieties from the Sverdlovsk region for obtaining protein hydrolysates. Food Industry. 2025. vol. 10. no. 3. pp. 53–61. doi: 10.29141/2500-1922-2025-10-3-6 (in Russian)
- 2 Ivanchikhina O.V. The importance of protein in the prevention and treatment of diseases. Medicine. Sociology. Philosophy. Applied Research. 2023. no. 2. pp. 59–62. (in Russian)
- 3 Kulikov D.S., Aksenova L.M., Samoilova A.M. Functional and technological properties of protein products from legumes and their modification under the influence of various factors. Part 1. Food Industry. 2024. no. 3. pp. 20–25. doi: 10.52653/PPI.2024.3.3.004 (in Russian)
- 4 Poznyakovskiy V.M. Challenges and strategic megatrends of modern nutriology. Food Industry. 2024. vol. 9. no. 2. pp. 5–12. doi: 10.29141/2500-1922-2024-9-2-1 (in Russian)
- 5 Kulikov D.S., Korolev A.A. Functional and technological properties of protein products from legumes and their modification under the influence of various factors. Part 2. Food Industry. 2024. no. 8. pp. 35–44. doi: 10.52653/PPI.2024.8.8.007 (in Russian)
- 6 Bikbulatov P.S., Chugunova O.V., Zavorokhina N.V. Analysis of the modern plant protein market and technological solutions for their production. Bulletin of KrasGAU. 2025. no. 5. pp. 244–260. doi: 10.36718/1819-4036-2025-5-244-260 (in Russian)
- 7 Matoba T., Hata T. Relationship between bitterness of peptides and their chemical structures. Agricultural and Biological Chemistry. 1972. vol. 36. no. 8. pp. 1423–1431. doi: 10.1080/00021369.1972.10860458

- 8 Leksrisompong P.P., Miracle R.E., Drake M.A. Characterization of flavor of whey protein hydrolysates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2010. vol. 58. no. 10. pp. 6318–6327. doi: 10.1021/jf9044297
- 9 Chatterjee C., Gleddie S., Xiao C.W. Soybean bioactive peptides and their functional properties. *Nutrients*. 2018. vol. 10. no. 9. p. 1211. doi: 10.3390/nu10091211
- 10 Kulikov D.S., Korolev A.A. Aspects of enzymatic modification of plant proteins. *Food Systems*. 2025. vol. 8. no. 1. pp. 22–28. doi: 10.21323/2618-9771-2025-8-1-22-28 (in Russian)
- 11 Matishova D.A., Prikhodko D.V., Krasnoshtanova A.A. Production of protein isolates based on legume flour. *Butlerov Communications*. 2025. vol. 81. no. 1. pp. 114–124. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/25-81-1-114 (in Russian)
- 12 Vitol I.S. Characteristics of products of enzymatic modification of legume seeds. *Food Industry*. 2024. no. 10. pp. 73–76. doi: 10.52653/PPI.2024.10.10.014 (in Russian)
- 13 Sharikov A.Yu., Ivanov V.V., Amelyakina M.V. The effect of stirring on the efficiency of enzymatic hydrolysis of high-concentration media of extruded corn starch. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 96–103. doi: 10.20914/2310-1202-2020-3-96-103 (in Russian)
- 14 Sareen J., Shi D., Stone A.K. et al. Effect of enzyme hydrolysis on the physicochemical, functional, and nutritional properties of pea and faba bean protein isolates. *European Food Research and Technology*. 2023. vol. 249. no. 12. pp. 3175–3190. doi: 10.1007/s00217-023-04358-y
- 15 Gharibzahedi S.M.T., Smith B., Altintas Z. Bioactive and health-promoting properties of enzymatic hydrolysates of legume proteins: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. vol. 64. no. 9. pp. 2548–2578. doi: 10.1080/10408398.2022.2124399
- 16 García Arteaga V., Leeb E., Liu Y. et al. Enzymatic hydrolysis and fermentation of pea protein isolate and its effects on antigenic proteins, functional properties, and sensory profile. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 1. p. 118. doi: 10.3390/foods11010118
- 17 Tulbek M.C., Wang Y.L., Hounjet M. Pea—a sustainable vegetable protein crop. *Sustainable Protein Sources*. 2nd ed. Ed. by S.R. Nadathur, J.P.D. Wanasundara, L. Scanlin. Cambridge: Academic Press, 2024. pp. 143–162. doi: 10.1016/B978-0-323-91652-3.00027-7
- 18 Shanthakumar P., Klepacka J., Bains A. et al. The current situation of pea protein and its application in the food industry. *Molecules*. 2022. vol. 27. no. 16. p. 5354. doi: 10.3390/molecules27165354
- 19 David Troncoso F., Alberto Sánchez D., Luján Ferreira M. Production of plant proteases and new biotechnological applications: an updated review. *ChemistryOpen*. 2022. vol. 11. no. 3. p. e202200017. doi: 10.1002/open.202200017
- 20 Tiruneh A., Ptaszek P., Żmudziński D. et al. Peas (*Pisum sativum* subsp. *arvense* Asch) and Beans (*Vicia faba* var. *minor*) as Source of Quality Plant Proteins. *Molecules*. 2025. vol. 30. no. 9. p. 2009. doi: 10.3390/molecules30092009

Сведения об авторах

Павел С. Бикбулатов к.т.н., доцент, кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия, bikbulatovpavel@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1285-4797>

Наталья А. Панкратьева д.х.н., профессор, кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия, nata-pankratjeva@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9831-3635>

Ольга В. Чугунова к.э.н., инженер, кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия, chugun.ova@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7039-4047>

Людмила А. Донскова кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия, кафедра@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8396-0431>

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

Pavel S. Bikbulatov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, food technology department, Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia, bikbulatovpavel@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1285-4797>

Natalia A. Pankratyeva Dr. Sci. (Chem.), professor, food technology department, Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia, nata-pankratjeva@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9831-3635>

Olga V. Chugunova Cand. Sci. (Econ.), engineer, food technology department, Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia, chugun.ova@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7039-4047>

Lyudmila A. Donskova food technology department, Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia, кафедра@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8396-0431>

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 10/11/2025	После редакции 27/11/2025	Принята в печать 10/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 27/11/2025	Accepted 10/12/2025

Опыт получения хондроитин сульфата из побочных продуктов переработки пресноводных рыб

Али Мухаммад	¹	ali963.muhammad@mail.ru	 0009-0008-2046-4896
Людмила В. Антипова	¹	antibovaI54@ya.ru	 0000-0002-1416-0297
Алла Е. Куцова	¹	alla-toporkova@ya.ru	 0000-0002-5778-6150

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

Аннотация. Статья посвящена анализу источников, методов получения и биомедицинского потенциала хондроитин сульфата (ХС), с особым акцентом на возможность его экстракции из побочных продуктов переработки пресноводных рыб. ХС, как сульфатированный гликозаминогликан, является ключевым структурным и функциональным компонентом внеклеточного матрикса, играя критическую роль в поддержании здоровья суставов, нейропластичности, регенерации тканей и модуляции воспалительных процессов. Его биологическая активность напрямую зависит от структурных особенностей, таких как степень сульфатирования («сульфатный код»), молекулярная масса и пространственная организация, которые, в свою очередь, определяются источником сырья и технологией выделения. В работе подчеркивается, что традиционное промышленное производство ХС опирается на сырье животного происхождения (хрящи крупного рогатого скота, свиней, кур), что сопряжено с рядом ограничений, включая религиозные аспекты, риски зоонозных заболеваний и нестабильность сырьевой базы. В этом контексте гидробионты, и особенно побочные продукты рыбоперерабатывающей промышленности (скелеты, хрящи, головы), рассматриваются как перспективная и устойчивая альтернатива. Использование такого сырья позволяет решить проблему утилизации отходов и соответствует принципам экономики замкнутого цикла. В статье проводится детальный обзор традиционных (щелочной и кислотный гидролиз) и современных (ферментативный, ультразвуковой, микроволновой, сверхкритическая флюидная экстракция) методов извлечения ХС. Делается вывод, что разработка эффективных и рентабельных технологий получения ХС из рыбных отходов представляет собой актуальную научно-практическую задачу. Такие технологии должны обеспечивать не только высокий выход и чистоту, но и сохранение специфической структуры сульфатированных изоформ, что определяет их терапевтическую эффективность. Внедрение подобных решений позволит расширить сырьевую базу для производства ХС, создать новые цепочки добавленной стоимости в рыбной отрасли и удовлетворить растущий рыночный спрос на функциональные нутрицевтики и биомедицинские материалы с предсказуемыми свойствами.

Ключевые слова: хондроитин сульфат, гликозаминогликаны, побочные продукты рыбопереработки, экстракция, методы очистки, структура и функции, сульфатный код, функциональные продукты питания, нутрицевтики, биомедицинские материалы..

Experience in obtaining chondroitin sulfate from by-products of freshwater fish processing

Ali Muhhamad	¹	ali963.muhammad@mail.ru	 0009-0008-2046-4896
Ludmila V. Antipova	¹	antibovaI54@ya.ru	 0000-0002-1416-0297
Alla E. Kutsova	¹	alla-toporkova@ya.ru	 0000-0002-5778-6150

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

Abstract. This article analyzes the sources, production methods, and biomedical potential of chondroitin sulfate (CS), with a particular emphasis on its extraction from byproducts of freshwater fish processing. CS, as a sulfated glycosaminoglycan, is a key structural and functional component of the extracellular matrix, playing a critical role in maintaining joint health, neuroplasticity, tissue regeneration, and modulating inflammatory processes. Its biological activity directly depends on structural features such as the degree of sulfation ("sulfate code"), molecular weight, and spatial organization, which, in turn, are determined by the source of the raw material and the extraction technology. The paper emphasizes that traditional industrial production of CS relies on animal-based raw materials (cartilage from cattle, pigs, and chickens), which is associated with a number of limitations, including religious considerations, the risk of zoonotic diseases, and the instability of the raw material base. In this context, aquatic organisms, and particularly by-products of the fish processing industry (skeletons, cartilage, heads), are considered a promising and sustainable alternative. The use of such raw materials solves the problem of waste disposal and is consistent with the principles of a circular economy. This article provides a detailed review of traditional (alkaline and acid hydrolysis) and modern (enzymatic, ultrasonic, microwave, supercritical fluid extraction) methods for extracting cholesterol. It is concluded that the development of effective and cost-effective technologies for obtaining cholesterol from fish waste is a pressing scientific and practical challenge. Such technologies must ensure not only high yield and purity but also preserve the specific structure of sulfated isoforms, which determines their therapeutic efficacy. The implementation of such solutions will expand the raw material base for cholesterol production, create new value chains in the fishing industry, and meet the growing market demand for functional nutraceuticals and biomedical materials with predictable properties.

Keywords: chondroitin sulfate, glycosaminoglycans, fish processing by-products, extraction, purification methods, structure and function, sulfate code, functional foods, nutraceuticals, biomedical materials.

Для цитирования

Мухаммад Али, Антипова Л.В., Куцова А.Е. Опыт получения хондроитин сульфата из побочных продуктов переработки пресноводных рыб // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 93–100. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-93-100

For citation

Muhammad Ali, Antipova L.V., Kutsova A.E. Experience in obtaining chondroitin sulfate from by-products of freshwater fish processing. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 93–100. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-93-100

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

Введение

В последние годы потребительский спрос, а следовательно, и ассортимент продуктов питания, сместился в сторону функциональных обогащенных продуктов питания и пищевых добавок. Это открывает новые возможности для использования хондроитинсульфата в качестве терапевтического нутриента, а также создает проблемы регулирования, стандартизации и контроля качества этих новых категорий продуктов, требующих повышенного внимания.

Хондроитин сульфат (ХС) – это типичный сульфатированный гликозаминогликан (ГАГ), основной компонент внеклеточного матрикса, в частности хрящевой ткани. Он играет важную роль в поддержании здоровья суставов и опорно-двигательного аппарата. Он способствует задержке воды в хряще, улучшает его амортизационные свойства и ингибирует ферменты, разрушающие хрящевую ткань. Многочисленные исследования, посвященные его защитному эффекту для хряща, особенно при остеоартрите, подтверждают его важность для укрепления здоровья.

Особые структурные свойства молекулы, включая её высокую анионность за счет большого количества сульфатных или карбоксильных групп, позволяют существовать множеству различных структурных типов и производных. Каждый из них отвечает за придание ХС разнообразных биологических функций, влияющих на развитие многих патологических процессов [1]. Доказано, что образцы сульфатирования ХС («сульфатный код»), обладают структурной сложностью и влияют на биологические функции. Нарушения степени сульфатирования ХС часто ассоциируются со скелетной дисплазией, дегенеративными заболеваниями и злокачественными опухолями. Качественный состав и последовательность сульфатирования (ХС-А и ХС – С; ХС – D и ХС – E) идентифицированы в тканях рака груди. Известно, что синтезированные ХС дисахариды с различной степенью сульфатирования по-разному влияют на различные типы клеток [2]. Под действием отрицательного заряда ХС могут взаимодействовать с белками внеклеточного матрикса, регулируя клеточную активность, а модификации за счет взаимодействия ионов металлов и пептидов, образующих комплексы, в последние годы представляют большой интерес для исследователей [3].

Хондроитин сульфат в основном применяется в ортопедии и ревматологии (в качестве лекарственного препарата и пищевой добавки для лечения остеоартрита), а также в спортивной медицине (для профилактики эрозии суставов) и питании (в качестве функционального пищевого ингредиента).

Рынок хондроитин сульфата представлен разнообразной группой производителей. Различные препараты ХС производятся из тканей животных (например, крупного рогатого скота, свиней и кур) и водных обитателей (хрящах рыб, акул, скатов и костных рыб) [4]. Производители различаются по этим источникам сырья, уровням чистоты и формам выпуска (порошок, капсулы, инъекции). Конечные продукты ХС, полученные из этих смешанных источников, могут иметь разные характеристики, включая чистоту, биологическое воздействие, наличие примесей и клиническую эффективность, что порождает проблемы качества и безопасности препаратов [4]. Для оценки мировых стандартов поставок и качества крайне важно проанализировать основных производителей хондроитин сульфата.

Несмотря на широкое использование хондроитин сульфата в качестве добавки, наблюдается отсутствие четко регламентированных «продуктов» (сырья или стандартных ингредиентов) для промышленного производства обогащенных продуктов питания, а не только фармацевтических препаратов или пищевых добавок. Это создает регуляторный вакуум, который может повлиять на качество и безопасность конечного продукта. Важнейшим этапом в реализации технологий ХС является экстракция. Существующие методы экстрагирования ХС с использованием щелочей или других органических веществ не соответствуют принципам экологически чистого производства. Альтернативным способом получения ХС из животных или водных источников, выступает биосинтез и ферментация [5]. Весьма перспективно комбинирование биосинтеза и ферментации с помощью генной инженерии. Например, показано, что дрожжи *Pichia pastoris* могут служить клеточной фабрикой для получения ХС типа А, что решает вопрос дефицита сырья животного происхождения для этих целей в будущем [6].

Химическая природа ХС известна и описана, идентифицировано молекулярное разнообразие в природных источниках: Хондроитинсульфат (ХС) – это сульфатированный гликозаминогликан (ГАГ), состоящий из повторяющихся дисахаридных единиц.

Каждая дисахаридная единица состоит из двух молекул сахара: N-ацетилгалактозамин (GalNAc) и Глюкуроновой кислоты (GlcA)

Эти единицы связаны между собой β -1,4-гликозидными связями. Ключевой структурной особенностью ХС является наличие сульфатных групп, присоединенных к гидроксильным группам GalNAc, которые могут различаться по положению и количеству, что приводит к различным подтипам ХС. Общая структура

представляет собой последовательность соединенных между собой фрагментов [7]: $[GlcA - \beta(1 \rightarrow 3) - GalNAc - \beta(1 \rightarrow 4)]_n$, где GlcA: глюконовая кислота GalNAc: N-ацетилгалактозамин n: количество повторяющихся дисахаридных единиц Известны и описаны схемы сульфатирования [8]:

Хондроитин-4-сульфат (ХС-А): сульфатная группа в 4-й позиции GalNAc.

Хондроитин-6-сульфат (ХС-С): сульфатная группа в 6-й позиции GalNAc.

Хондроитин-2,6-сульфат (ХС-Д): сульфатные группы как во 2-й позиции GlcA, так и в 6-й позиции GalNAc.

Хондроитин-4,6-сульфат (ХС-Е): сульфатные группы как в 4-й, так и в 6-й позиции GalNAc.

Молекулярное разнообразие ХС возникает из-за изменений в моделях сульфатирования, когда положение и количество сульфатных групп различается, что приводит к возникновению различных подтипов (например, ХС – А, ХС – С, ХС – Д, ХС – Е). [2] Количество повторяющихся дисахаридных единиц может различаться, что влияет на длину цепи и молекулярную массу.

Пространственное строение представлено: трехмерной структурой ХС, которая различается в зависимости от модели сульфатирования и взаимодействия с другими молекулами. Разнообразие строения позволяет ХС выполнять широкий спектр биологических функций, многие из которых расшифрованы.

Например ХС, является важнейшим компонентом внеклеточного матрикса (ВКМ) и выполняет ряд функций в организме [9]:

- ХС является основным компонентом протеогликанов (например, аггрекана) в хряще. Он притягивает и удерживает воду, обеспечивая сжимаемость и упругость хряща, что необходимо для функционирования суставов и защиты от ударов;

- регуляторная функция ХС заключается во взаимодействии с факторами роста, цитокинами и рецепторами клеточной поверхности, модулируя сигнальные пути, участвующие в пролиферации, дифференцировке и миграции клеток, влияя на восстановление и развитие тканей;

- установлены противовоспалительные эффекты ХС, которые подавляют выработку провоспалительных факторов, разрушающих хрящ. Это делает его полезным при лечении остеоартрита и других воспалительных заболеваний суставов;

- в нервной системе ХС является компонентом, который стабилизирует синапсы и регулирует пластичность нервной системы, подавляет рост аксонов после травмы, играя роль в формировании глиальных рубцов. Таким образом ХС – мощный фактор развития и восстановления нервной системы;

- ХС способствует восстановлению тканей, регулируя активность факторов роста и заживление ран; усиливает отложение коллагена;

- некоторые формы ХС (например, ХС-Е) проявляют умеренную антикоагулянтную активность, взаимодействуя с антитромбином, выполняя функции стабилизации крови, подобно гепарину;

- наконец, ХС вместе с гиалуроновой кислотой способствует вязкости синовиальной жидкости, уменьшая трение между поверхностями суставов.

Поскольку потребление мяса и объемы его производства растут, на скотобойнях образуется большое количество съедобных побочных продуктов, включая хрящи животных. Аналогичное можно отметить и в рыбоперерабатывающем секторе экономики. Полисахариды или белки, содержащиеся в хрящах животных, могут быть переработаны в ценные ингредиенты для промышленной продукции. Информационные данные по получению ХС представлены на рисунке 1А.

Курятина является одним из самых популярных видов мяса по всему миру. Отчет Управления сельского хозяйства США за 2021 год (<https://fas.usda.gov/data/russia-poultry-and-products-annual-2>) указывает, что ежегодное производство куриного мяса в России составляет 4.725 миллиона метрических тонн, что означает значительное количество побочных продуктов (например, кости, хрящи и соединительные ткани). В частности, из куриной грудки обычно делают закуски (хрящи и курятина) за счет богатого содержания питательных веществ (например, коллаген и полисахариды). Отмечено, что ХС и пептиды ХС могут быть извлечены из хряща куриной грудки [10–11]. Показано, что другие части, включая хрящи передней грудной клетки, проксимальные хрящи плеча, дистальные хрящи плеча, проксимальные хрящи бедра, дистальные хрящи бедра, проксимальные хрящи голени и дистальные хрящи голени бройлеров, могут быть использованы для извлечения пептидов ХС с помощью тканевого автолиза с использованием буфера ацетата натрия с концентрацией 0,5 моль/л [12]. Кроме того, костная ткань куриных ног (то есть концы костей ног) содержит полисахариды (в основном ХС). Экспериментально доказано, что и костный бульон может быть использован для изоляции ХС [13]. Более того, побочные продукты от механического обвалки курятины, такие как (раздробленные кости, хрящи, кожа, жировая ткань и мышцы) также могут быть использованы для получения ХС [14]. В данной литературе описан способ получения ХС из этого побочного сырья с использованием протеолиза.

Кости грудного отдела имеют наивысшую концентрацию целевого продукта. Доказано, что основным компонентом глюкаминогликана (ГАГ) в вышеописанных образцах является ХС. Аналогичные исследования предполагают, что сульфатированный гликозаминогликан можно выделить из костей крыла, костей ног, передних костей и задних костей куриных тушек, а из целой куриной тушки массой 1,66 кг можно получить 1,9 г ХС [15]. Хрящи или хрящеподобные ткани других видов домашней птицы (например, уток, гусей и индеек) теоретически могут быть использованы для получения ХС, однако исследования на эту тему и смежные вопросы мало отражены в современной литературе. Вероятно, это связано с ограниченностью объемов производства по сравнению с побочными продуктами при переработке кур.

Имеются литературные данные об извлечении ХС и хондроитин сульфатных Протеогликаов из говяжьего трахейного хряща. При этом цепи ХС были гетерогенными, с разными уровнями хондроитин-4- и 6-сульфатов [17]. ХС можно получать из роговицы и других соединительных тканей. Роговица глаз говядины может быть использована для извлечения ХС – протеогликанов, которые могут быть применены в исследованиях, касающихся структурных взаимодействий, участвующих в адгезии инфицированных *Plasmodium falciparum* красных кровяных клеток [18]. Из соединительных тканей выделены и описаны два преобладающих протеогликана в говяжьих сухожилиях и связках – декорин и бигликан [19,20].

Побочные продукты переработки свиней являются еще одним источником ХС. В частности, изучалось использование хрящей носа, гортани и трахеи свиней для получения ХС [21]. Фолликулярная жидкость свиных яичников также может быть использована для изоляции протеогликанов, включая ХС и дерматансульфат [22]. В свиных сухожилиях и связках большинство ГАГов составляет гиалуронан, за которым следуют дерматансульфат и небольшие количества ХС [23]. В скелетной мышце свиней также можно выделить сульфатированные ГАГи [24]. Другие источники животного происхождения, включая хрящи носа овец [25] и растущие олени рога [26], также были описаны при извлечении ХС. При этом установлена химическая природа ХС из оленьих рогов [27, 28], ГАГи могут быть изолированы из различных частей растущих рогов лося; было подтверждено, что в среднем общее количество уроновой кислоты в ГАГах составляет 88 % в каждом фрагменте рога.

Хотя большинство коммерческого ХС получают из животных источников (например, хрящей или нехрящевых тканей кур, говядины, свинины, овец и других наземных животных), некоторые проблемы, связанные с этими источниками, включая религиозные ограничения и безопасность (например, бешенство, птичий грипп H7N9, сальмонелла и другие риски пищевой цепи), следует учитывать. Указанные выше проблемы могут быть исключены путем использования костистых рыб и других гидробионтов в качестве источников ХС. При этом ХС из этих источников (акула, осетр и скат) показал лучшую активность и качество. Было сообщено, что ежегодно добывается 132 миллиона гидробионтов, включая аквакультуру (в основном рыбу, моллюсков и ракообразных), и более 35 % общей массы составляют побочные продукты или отходы [29]. Значительные объемы побочных продуктов в виде хрящевых материалов или

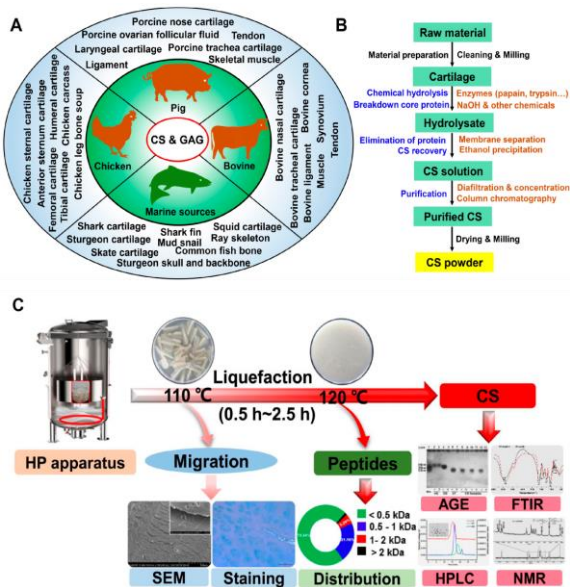


Рисунок 1. Источники ХС и методы добычи, основанные на использовании хряща. (А) Основные источники ХС и GAG; (В) традиционные процессы экстракции ХС, основанные на использовании хряща; (С) совместная продукция ХС и пептидов из грудинного хряща курицы путем обработки горячим давлением [11]

Figure 1. Sources of cholesterol and extraction methods based on the use of cartilage. (A) Main sources of cholesterol and GAG; (B) traditional cholesterol extraction processes based on the use of cartilage; (C) co-production of cholesterol and peptides from chicken sternal cartilage by hot pressure treatment [11]

Говяжьи побочные продукты являются еще одним основным источником ХС. Говяжий носовой хрящ, трахейный хрящ и роговица глаза – все это общие сырьевые материалы, используемые для получения ХС. Недавнее исследование показало, что ХС можно извлечь из говяжьего носового хряща после обработки папаином и трипсином, причем фракция с наименьшей молекулярной массой ХС проявила более сильную антиоксидантную активность [16].

костей рыбы (например, акулы, лосося, ската и обычной рыбы) и других гидробионтов, таких как морские губки, морские огурцы, кальмары, моллюски и некоторые беспозвоночные, являются хорошими источниками для получения ГАГов [30,31]. Для этих водных организмов были исследованы хрящ акулы [32–33], хрящ ската [34], хрящ кальмара [35], хрящ, череп и позвоночник осетра [36] и улитки-пресмыкающиеся [37] для получения ХС с помощью различных методов извлечения. Хотя плавники акул являются известным источником ХС высокого качества, нерациональное использование акул и другие экологические аспекты приводят к ограниченному объему извлечения ХС. Привлекательным источником ХС являются скелеты ската, однако практического значения они не имеют. [29,38]. ХС также может быть изолирован и очищен из костей обычных рыб, таких как морской волк, треска, акула-катран, лосось и тунец [39]. Содержание ХС в них колеблется от 0,011 % для трески до 0,34 % для морского волка с различными структурными дисахаридами.

Расшифровка функций ХС в поддержании здоровья опорно-двигательной системы человека привела к мощному развитию направления по получению и применению препаратов на основе изученных сырьевых источников. Обобщение информации позволяет выделить наиболее важные этапы технологии – извлечение и очистка целевого вещества.

В настоящее время (ХС) широко используется в фармацевтике и в составе нутрицевтиков, благодаря своим терапевтическим свойствам, особенно при лечении остеоартрита.

Извлечение ХС из хрящей животных (бычьего, свиного, птицеводческого или водного происхождения) включает несколько методов, каждый из которых имеет свои уникальные преимущества и недостатки. [40]

Представляет научный и практический интерес анализ наиболее распространенных способов извлечения ХС из сырья – побочных продуктов животного происхождения. Хрящ обрабатывают щелочным раствором (например, NaOH) для гидролиза сопутствующих белков и выделения ХС. Щелочные условия разрушают пептидные связи, растворяя протеогликановую матрицу.

К преимуществам способа можно отнести высокий выход ХС за счет эффективной деградации белка. Способ прост в исполнении, экономически эффективен и удовлетворяет условиям крупномасштабного производства.

Однако жесткие условия могут привести к частичной деградации цепей ХС. При реализации способа требуется нейтрализация после экстрагирования, что усложняет процесс и приводит к образованию солей.

Известен опыт ферментативного гидролиза [41].

Апробированы ферменты, такие как папаин, трипсин или протеиназа К и др. для расщепления белков в хряще, высвобождая ХС. Этот метод выполняется в условиях мягкого pH и температуры. При этом сохраняется структурная целостность цепей ХС. За счет высокой специфичности гидролиза белка минимизируются загрязнения конечных продуктов. Вместе с тем, можно отметить, что ферменты дороги и увеличивают производственные затраты.

А также требуется точный контроль pH, температуры и концентрации фермента применяется кислотная экстракция [42], когда хрящ обрабатывают кислотными растворами (например, HCl) для выделения ХС. Кислотные условия обеспечивают гидролиз коллагена и других белков.

Способ характеризуется простотой и экономичностью. Установлено, что при этом возникает частичная десульфатация ХС, что снижает его биологическую активность.

Кроме этого, жесткие условия могут разрушать цепи ХС, влияя на его молекулярную массу.

Ультразвуковое экстрагирование применяют для разрушения хрящевой ткани, что создает условия для высвобождения ХС. Эффект кавитации усиливает разрушение внеклеточного матрикса [43]. Способ обеспечивает более интенсивную экстракцию по сравнению с традиционными методами.

При этом значительно сокращается использование химических веществ, что делает процесс экологически чистым.

Однако, реализация способа требует специализированного оборудования, что увеличивает производственные затраты. Следует учитывать, что длительное воздействие ультразвука может привести к фрагментации цепей ХС.

При обработке хряща имеется опыт использования сверхкритического диоксида углерода (CO₂), состояние которого обеспечивает эффективное проникновение реагента в ткань. Способ экологически чистый, так как не содержит органических растворителей.

Высокая чистота экстрагированного ХС достигается селективностью экстракции.

К недостаткам можно отнести высокую стоимость оборудования и значительные эксплуатационные расходы, а также ограниченная масштабируемость для промышленного применения [44].

В процессе микроволновой экстракции нагрев и разрушение хрящевой ткани достигаются за счет микроволновой энергии, высвобождающей ХС – быстрый нагрев усиливает разрушение внеклеточного матрикса. Способ характерен интенсивностью и экономичностью экстракции, а также энергоэффективностью по сравнению с традиционными методами нагрева. Однако существует риск перегрева, который может привести к деградации ХС.

Технология требует точного контроля параметров микроволн (мощность, время, температура). [45].

Известен опыт применения ионообменной хроматографии, когда после первоначальной экстракции ХС очищается с помощью ионообменных смол. При этом отрицательно заряженные сульфатные группы ХС связываются с положительно заряженными, что дает высокую чистоту ХС.

Этот способ удовлетворяет требованиям для фармацевтических применений, эффективно удаляет загрязняющие вещества, включая белки и другие ГАГ. Однако способ дорог, процесс трудоемок, а также требует дополнительных этапов для регенерации и обслуживания смол.

Достаточно прост и распространен для практического применения метод осаждения [46], когда ХС осаждается из раствора с использованием этанола или других растворителей. Добавление растворителей снижает растворимость ХС, который выпадает в осадок. Процесс простой и экономичный, возможна реализация в условиях крупномасштабного производства, не требует специального оборудования. Как недостаток, следует отметить недостаточную чистоту за счет соосаждения примесей. Требуется тщательный контроль концентрации растворителя и температуры.

При мембранной фильтрации ХС отделяется от примесей с помощью ультрафильтрационных или нанофильтрационных мембран. [47] Мембраны избирательно пропускают ХС, удерживая более крупные сопутствующие молекулы.

Способ весьма привлекателен для реализации, масштабируемый и эффективный для промышленного применения. В нем не используются органические растворители, что делает его экологически чистым.

Сопутствует загрязнение мембран, что со временем снижает эффективность процесса.

Требуется регулярное обслуживание и замена мембран.

В комбинированных методах для экстракции и очистки используется сочетание ферментативного гидролиза, щелочной обработки и ионообменной хроматографии. [48]. Такой подход максимизирует выход и чистоту, подходит для конкретных исходных материалов и применений.

Однако, в большинстве случаев, процесс сложный и трудоемкий.

Требуется более высоких эксплуатационных расходов из-за многостадийности.

Заключение

Выбор метода экстракции зависит от желаемого конечного результата выхода, чистоты и направления применения ХС.

Для ХС фармацевтического класса предпочтительны такие методы, как ферментативный гидролиз и ионообменная хроматография, из-за их способности сохранять структурную целостность и биологическую активность. Однако эти методы являются дорогостоящими и требуют много времени. Для промышленного производства более подходящими являются методы щелочного гидролиза и осаждения из-за их экономической эффективности и масштабируемости.

Новые технологии, такие как ультразвуковая и микроволновая экстракция, предлагают более быстрые и экологически чистые альтернативы, но требуют дальнейшей оптимизации для минимизации деградации ХС. Сверхкритическая флюидная экстракция, хотя и является высокочистой, ограничена ее высокой стоимостью и проблемами масштабируемости.

Поиск новых более современных принципов, подходов и методов в получении ХС следует признать актуальной проблемой. Не менее важный этап исследований связан с расширением перечня потенциальных сырьевых источников в разработке препаратов ХС с различной применимостью в практической деятельности человека.

References

- 1 Mikami T., Kitagawa H. Biosynthesis and function of chondroitin sulfate. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – General Subjects*. 2013. vol. 1830. no. 10. pp. 4719–4733.
- 2 Poh Z.W., Gan C.H., Lee E.J., Guo S., Yip G.W., Lam Y. Divergent Synthesis of Chondroitin Sulfate Disaccharides and Identification of Sulfate Motifs that Inhibit Triple Negative Breast Cancer. *Scientific Reports*. 2015. vol. 5. p. 14355.
- 3 Bishnoi M., Jain A., Hurkat P., Jain S.K. Chondroitin sulphate: A focus on osteoarthritis. *Glycoconjugate Journal*. 2016. vol. 33. no. 5. pp. 693–705.
- 4 Volpi N. Chondroitin Sulfate Safety and Quality. *Molecules*. 2019. vol. 24. no. 8. p. 1447.
- 5 Shi Y., Meng Y.C., Li J.R., Chen J., Liu Y.H., Bai X. Chondroitin Sulfate: Extraction, Purification, Microbial and Chemical Synthesis. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2014. vol. 89. no. 10. pp. 1445–1465.
- 6 Jin X., Zhang W., Wang Y., Sheng J., Kang Z.J.G.C. Biosynthesis of non-animal chondroitin sulfate from methanol using genetically engineered *Pichia pastoris*. *Green Chemistry*. 2021. vol. 23. no. 12. pp. 4365–4374.

- 7 Volpi N. Chondroitin Sulfate: Structure, Role, and Pharmacological Activity. *Advances in Pharmacology*. 2009. vol. 57. pp. 1–36.
- 8 Sugahara K., Kitagawa H. Recent advances in the study of the biosynthesis and functions of sulfated glycosaminoglycans. *Current Opinion in Structural Biology*. 2002. vol. 12. no. 5. pp. 578–586.
- 9 Lauder R.M. Chondroitin sulphate: a complex molecule with potential impacts on a wide range of biological systems. *Glycoconjugate Journal*. 2009. vol. 26. no. 3. pp. 277–280.
- 10 Luo X.M., Fosmire G.J., Leach R.M., Jr. Chicken keel cartilage as a source of chondroitin sulfate. *Poultry Science*. 2002. vol. 81. no. 7. pp. 1086–1089.
- 11 Shen Q., Zhang C., Jia W., Qin X., Cui Z., Mo H., Richel A. Co-production of chondroitin sulfate and peptide from liquefied chicken sternal cartilage by hot-pressure. *Carbohydrate Polymers*. 2019. vol. 222. p. 115015.
- 12 Srichamroen A., Nakano T., Pietrasik Z., Ozimek L., Betti M. Chondroitin sulfate extraction from broiler chicken cartilage by tissue autolysis. *LWT – Food Science and Technology*. 2013. vol. 50. no. 2. pp. 607–612.
- 13 Wang X., Shen Q., Zhang C., Jia W., Han L., Yu Q. Chicken leg bone as a source of chondroitin sulfate. *Carbohydrate Polymers*. 2019. vol. 207. pp. 191–199.
- 14 Nakano T., Pietrasik Z., Ozimek L., Betti M.J.P.B. Extraction, isolation and analysis of chondroitin sulfate from broiler chicken biomass. *Process Biochemistry*. 2012. vol. 47. no. 12. pp. 1909–1918.
- 15 Nakano T., Ozimek L. Chondroitin sulphate distribution in broiler chicken carcasses. *British Poultry Science*. 2014. vol. 55. no. 1. pp. 54–58.
- 16 Zou Z., Wei M., Fang J., Dai W., Sun T., Liu Q., Gong G., Liu Y., Song S., Ma F. et al. Preparation of chondroitin sulfates with different molecular weights from bovine nasal cartilage and their antioxidant activities. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. vol. 152. pp. 1047–1055.
- 17 Muthusamy A., Achur R.N., Valiyaveetil M., Madhunapantula S.V., Kakizaki I., Bhavanandan V.P., Gowda C.D. Structural characterization of the bovine tracheal chondroitin sulfate chains and binding of *Plasmodium falciparum*-infected erythrocytes. *Glycobiology*. 2004. vol. 14. no. 7. pp. 635–645.
- 18 Achur R.N., Muthusamy A., Madhunapantula S.V., Bhavanandan V.P., Seudieu C., Channe Gowda D. Chondroitin sulfate proteoglycans of bovine cornea: Structural characterization and assessment for the adherence of *Plasmodium falciparum*-infected erythrocytes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – General Subjects*. 2004. vol. 1701. no. 1–2. pp. 109–119.
- 19 Rees S.G., Flannery C.R., Little C.B., Hughes C.E., Caterson B., Dent C.M. Catabolism of aggrecan, decorin and biglycan in tendon. *Biochemical Journal*. 2000. vol. 350. no. 1. pp. 181–188.
- 20 Hitchcock A.M., Yates K.E., Costello C.E., Zaia J. Comparative glycomics of connective tissue glycosaminoglycans. *Proteomics*. 2008. vol. 8. no. 7. pp. 1384–1397.
- 21 da Cunha A.L., Aguiar J.A.K., Correa da Silva F.S., Michelacci Y.M. Do chondroitin sulfates with different structures have different activities on chondrocytes and macrophages? *International Journal of Biological Macromolecules*. 2017. vol. 103. pp. 1019–1031.
- 22 Yanagishita M., Rodbard D., Hascall V.C. Isolation and characterization of proteoglycans from porcine ovarian follicular fluid. *Journal of Biological Chemistry*. 1979. vol. 254. no. 3. pp. 911–920.
- 23 Watanabe M., Nojima M., Shibata T., Hamada M. Maturation-related biochemical changes in swine anterior cruciate ligament and tibialis posterior tendon. *Journal of Orthopaedic Research*. 1994. vol. 12. no. 5. pp. 672–682.
- 24 Nakano T., Sunwoo H.H., Li X., Price M.A., Sim J.S. Study of Sulfated Glycosaminoglycans from Porcine Skeletal Muscle Epimysium Including Analysis of Iduronosyl and Glucuronosyl Residues in Galactosaminoglycan Fractions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1996. vol. 44. no. 6. pp. 1424–1434.
- 25 Seno N., Anno K., Yaegashi Y., Okuyama T. Microheterogeneity of chondroitin sulfates from various cartilages. *Connective Tissue Research*. 1975. vol. 3. no. 2. pp. 87–96.
- 26 Sunwoo H.H., Nakano T., Hudson R.J., Sim J.S. Isolation, characterization and localization of glycosaminoglycans in growing antlers of wapiti (*Cervus elaphus*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*. 1998. vol. 120. no. 2. pp. 273–283.
- 27 Scott J.E., Hughes E.W. Chondroitin sulphate from fossilized antlers. *Nature*. 1981. vol. 291. no. 5817. pp. 580–581.
- 28 Zhao Q.C., Kiyohara H., Nagai T., Yamada H. Structure of the complement-activating proteoglycan from the pilose antler of *Cervus nippon* Temminck. *Carbohydrate Research*. 1992. vol. 230. pp. 361–372.
- 29 Vázquez J.A., Rodríguez-Amado I., Montemayor M.I., Fraguas J., González M.D.P., Murado M.A. Chondroitin sulfate, hyaluronic acid and chitin/chitosan production using marine waste sources: Characteristics, applications and eco-friendly processes: A review. *Marine Drugs*. 2013. vol. 11. no. 3. pp. 747–774.
- 30 Vieira R.P., Mourão P.A. Occurrence of a unique fucose-branched chondroitin sulfate in the body wall of a sea cucumber. *Journal of Biological Chemistry*. 1988. vol. 263. no. 34. pp. 18176–18183.
- 31 Kinoshita-Toyoda A., Yamada S., Haslam S.M., Khoo K.H., Sugiura M., Morris H.R., Dell A., Sugahara K. Structural determination of five novel tetrasaccharides containing 3 O-sulfated D-glucuronic acid and two rare oligosaccharides containing a beta-D-glucose branch isolated from squid cartilage chondroitin sulfate E. *Biochemistry*. 2004. vol. 43. no. 34. pp. 11063–11074.
- 32 Sim J.S., Im A.R., Cho S.M., Jang H.J., Jin H.J., Kim Y.S. Evaluation of chondroitin sulfate in shark cartilage powder as a dietary supplement: Raw materials and finished products. *Food Chemistry*. 2007. vol. 101. no. 2. pp. 532–539.
- 33 Sugahara K., Nadanaka S., Takeda K., Kojima T. Structural analysis of unsaturated hexasaccharides isolated from shark cartilage chondroitin sulfate D that are substrates for the exolytic action of chondroitin ABC lyase. *European Journal of Biochemistry*. 1996. vol. 239. no. 3. pp. 871–880.
- 34 Lignot B., Lahogue V., Bourseau P. Enzymatic extraction of chondroitin sulfate from skate cartilage and concentration-desalting by ultrafiltration. *Journal of Biotechnology*. 2003. vol. 103. no. 3. pp. 281–284.

- 35 Shetty A.K., Kobayashi T., Mizumoto S., Narumi M., Kudo Y., Yamada S., Sugahara K. Isolation and characterization of a novel chondroitin sulfate from squid liver integument rich in N-acetylgalactosamine(4,6-disulfate) and glucuronate(3 sulfate) residues. *Carbohydrate Research*. 2009. vol. 344. no. 13. pp. 1526–1532.
- 36 Gui M., Song J., Zhang L., Wang S., Wu R., Ma C., Li P. Chemical characteristics and antithrombotic effect of chondroitin sulfates from sturgeon skull and sturgeon backbone. *Carbohydrate Polymers*. 2015. vol. 123. pp. 454–460.
- 37 Lee K.B., Kim J.S., Kwak S.T., Sim W., Kwak J.H., Kim Y.S. Isolation and identification of chondroitin sulfates from the mud snail. *Archives of Pharmacal Research*. 1998. vol. 21. no. 5. pp. 555–558.
- 38 Field I.C., Meekan M.G., Buckworth R.C., Bradshaw C.J. Chapter 4. Susceptibility of sharks, rays and chimaeras to global extinction. *Advances in Marine Biology*. 2009. vol. 56. pp. 275–363.
- 39 Maccari F., Galeotti F., Volpi N. Isolation and structural characterization of chondroitin sulfate from bony fishes. *Carbohydrate Polymers*. 2015. vol. 129. pp. 143–147.
- 40 Volpi N. Analytical aspects of pharmaceutical grade chondroitin sulfates. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2007. vol. 96. no. 12. pp. 3168–3180.
- 41 Maccari F., Galeotti F., Volpi N. Enzymatic extraction of chondroitin sulfate from cartilage: A green approach. *Carbohydrate Polymers*. 2015. vol. 131. pp. 394–403.
- 42 Li H., Qiu X., Wang Y., Li Z., Chen G., Liu Y. Acid extraction of chondroitin sulfate from shark cartilage: Optimization and characterization. *Marine Drugs*. 2016. vol. 14. no. 8. p. 154.
- 43 Wang Y., Li C., Liu P., Ahmed Z., Xiao P., Bai X. Physical properties of sweet potato starch modified by chemical, physical and genetic methods: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. vol. 45. pp. 302–314.
- 44 Chemat F., Vian M.A., Cravotto G. Green extraction of natural products: concept and principles. *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. vol. 13. no. 7. pp. 8615–8627.
- 45 Zhang Q.W., Lin L.G., Ye W.C. Techniques for extraction and isolation of natural products: a comprehensive review. *Chinese Medicine*. 2018. vol. 13. no. 1. p. 20.
- 46 Lauder R.M. Precipitation of chondroitin sulfate from cartilage extracts. *Glycoconjugate Journal*. 2009. vol. 26. no. 3. pp. 287–294.
- 47 Maccari F., Galeotti F., Volpi N. Membrane filtration for the purification of chondroitin sulfate. *Separation and Purification Technology*. 2014. vol. 125. pp. 260–267.
- 48 Li H., Qiu X., Wang Y., Li Z., Chen G., Liu Y. Combined extraction and purification methods for chondroitin sulfate from marine sources. *Marine Biotechnology*. 2019. vol. 21. no. 4. pp. 556–570.

Сведения об авторах

Али Мухаммад аспирант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ali963.muhammad@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-2046-4896>

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, antiboval54@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1416-0297>

Алла Е. Куцова к.т.н., инженер, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alla-toporkova@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5778-6150>

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

Ali Muhhamad Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, animal products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ali963.muhammad@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-2046-4896>

Ludmila V. Antipova Dr. Sci. (Engin.), professor, animal products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, antiboval54@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1416-0297>

Alla E. Kutsova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, animal products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alla-toporkova@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5778-6150>

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 10/11/2025	После редакции 01/12/2025	Принята в печать 15/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 01/12/2025	Accepted 15/12/2025

Ресурсы современных рыбохозяйственных комплексов: разновидности и объёмы производства

Ассумани Идди	¹	assumaniiddy2023@mail.ru	 0009-0008-2046-4896
Людмила В. Антипова	¹	antipovaI54@ya.ru	 0000-0002-1416-0297
Алла Е. Куцова	¹	alla-toporkova@ya.ru	 0000-0002-5778-6150

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

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу состояния и перспектив развития мировых рыбохозяйственных комплексов с акцентом на производственные ресурсы, ассортимент продукции и её роль в здоровом питании. Исследование базируется на обзоре современных источников, включая данные Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО). Авторы констатируют, что в условиях глобализации рыбного хозяйства и стагнации объёмов промышленного вылова в Мировом океане ключевую роль в удовлетворении растущего мирового спроса играет аквакультура. Особенно динамично этот сектор развивается в азиатском регионе, на который приходится около 90% объёмов выращивания. В статье подчёркивается, что дальнейший рост производства возможен именно за счёт интенсификации аквакультуры, включая пресноводную, и внедрения новых технологий. Центральное место в работе занимает детальный анализ пищевой и биологической ценности рыбного сырья. На основе представленных табличных данных по химическому составу различных видов рыб (горбуша, треска, карп, сельдь и др.) автор убедительно доказывает, что рыба является незаменимым источником высококачественного, легкоусвояемого белка, полиненасыщенных жирных кислот (Омега-3 и Омега-6), широкого спектра витаминов (А, D, Е, группы В) и эссенциальных микроэлементов (йод, селен, фосфор). Особо отмечена польза морских видов для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний и поддержания когнитивных функций. В статье также рассматриваются современные тенденции потребительского спроса, ориентированного на здоровое питание, что стимулирует обновление и расширение ассортимента рыбных продуктов, в том числе функционального и специализированного назначения. Делается вывод о том, что устойчивое развитие рыбохозяйственных комплексов, основанное на экосистемном подходе и рациональном использовании ресурсов, имеет критическое значение не только для экономического роста многих стран, но и для глобальной продовольственной безопасности и здоровья населения.

Ключевые слова: рыбохозяйственный комплекс, аквакультура, продукты здорового питания, пищевая ценность рыбы, мировое рыболовство, рыбные продукты, продовольственная безопасность.

Ressources of modern fisheries: types and production volumes

Assumani Iddy	¹	assumaniiddy2023@mail.ru	 0009-0008-2046-4896
Lyudmila V. Antipova	¹	antipovaI54@ya.ru	 0000-0002-1416-0297
Alla Ye. Kutsova	¹	alla-toporkova@ya.ru	 0000-0002-5778-6150

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

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of the status and development prospects of global fisheries, focusing on production resources, product range, and their role in healthy nutrition. The study is based on a review of current sources, including data from the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The authors note that, given the globalization of fisheries and stagnant commercial catches in the world's oceans, aquaculture plays a key role in meeting growing global demand. This sector is developing particularly dynamically in the Asian region, which accounts for approximately 90% of farmed fish. The article emphasizes that further production growth is possible through the intensification of aquaculture, including freshwater aquaculture, and the introduction of new technologies. A central feature of the study is a detailed analysis of the nutritional and biological value of fish raw materials. Using tabular data on the chemical composition of various fish species (pink salmon, cod, carp, herring, etc.), the author convincingly demonstrates that fish is an indispensable source of high-quality, easily digestible protein, polyunsaturated fatty acids (omega-3 and omega-6), a wide range of vitamins (A, D, E, and B vitamins), and essential microelements (iodine, selenium, and phosphorus). The benefits of marine species for the prevention of cardiovascular disease and the maintenance of cognitive function are particularly noted. The article also examines current trends in consumer demand focused on healthy eating, which is stimulating the renewal and expansion of fish products, including those for functional and specialized purposes. It is concluded that the sustainable development of fisheries, based on an ecosystem approach and the rational use of resources, is critical not only for the economic growth of many countries but also for global food security and public health.

Keywords: fisheries, aquaculture, healthy food products, nutritional value of fish, global fisheries, fish products, food security..

Для цитирования

Ассумани Идди, Антипова Л.В., Куцова А.Е. Ресурсы современных рыбохозяйственных комплексов: разнообразности и объёмы производства // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 101–111. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-101-111

For citation

Assumani Iddy, Antipova L.V., Kutsova A.E. Ressources of modern fisheries: types and production volumes. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 101–111. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-101-111

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

Введение

В настоящее время в мировом рыбном хозяйстве наблюдается процесс глобализации. За последнее десятилетие уровень глобального предложения рыбы превысил показатели прироста мирового населения, а рыба и морепродукты стали одним из самых ходовых пищевых товаров в мире. Изменились способы подготовки, маркетинга и поставки рыбной продукции потребителям. Промышленное рыболовство как вид экономической деятельности стало играть все большую роль в обеспечении продовольственной безопасности населения и в развитии многих прибрежных районов. При этом оно оказывает определенное воздействие на экосистемы и затрагивает не только эколого-экономические, но и социальные проблемы. Общество стало понимать, что водные биоресурсы не являются неиссякаемыми и их необходимо использовать рационально. Большую популярность в решении данных проблем приобретает принцип экологизации на основе экосистемного подхода к устойчивому развитию мирового рыболовства [1–3].

Генеральная Ассамблея ООН провозгласила 2022 год Международным годом кустарного рыболовства и аквакультуры. Под кустарным рыболовством следует понимать фермерские и семейные хозяйства, малый бизнес, помогающий сохранять традиционные виды рыболовства, идентичность регионов. Объем мировой добычи в водах океана вышел на плато, последние 10 лет практически не увеличивался и тенденций к росту не наблюдается. При этом в мире спрос на рыбу и морепродукты растет. Увеличивать добычу можно за счет уникальных технологий, редких видов рыб, не освоенных промыслом, а также за счет развития аквакультуры – морской и пресноводной.

В последние годы спрос на аквакультуру увеличивается по ряду факторов. Так, развитие информационных технологий способствует распространению знаний о пользе рыбы для здоровья человека и о превосходстве морепродуктов с диетической точки зрения над красным мясом животных и другими видами мяса с высоким содержанием жира. В результате многие люди переключаются на морепродукты, чему способствует экономический рост, быстрое увеличение в развивающихся странах доли семей среднего по доходам класса. Свой вклад в рост потребления морепродуктов вносят и развитие рыночных стратегий по сбыту, ужесточение норм безопасности и сертификации морепродуктов.

Статистика ФАО показывает, что, во Франции и Германии с середины 90-х годов аквакультура начала бурно развиваться, но темпы ее роста

вскоре упали. У развивающихся стран больший потенциал в отношении наращивания ее производства, в том числе на экспорт, для удовлетворения высокого мирового спроса. Этот сектор может в будущем играть значительную роль в экономике стран Азиатского региона. За последние 30 лет морепродукты здесь стали главной статьей по объему в торговле продуктами питания, причем каждые 10 лет показатели удваивались.

Сейчас из десяти ведущих стран-производителей продукции аквакультуры восемь находятся в Азии. Около 90% всей рыбы, выращиваемой в мире (и по объему, и по валовой стоимости), приходится на этот континент. Значительная часть ее потребляется местным населением. По данным ФАО, подушевое потребление рыбы в Азии заметно выше, чем в среднем по миру (20,7 кг в год против 19,2 кг) [4, 6, 2].

В России на основании последних результатов фундаментальных исследований специалисты Института питания РАМН разработали, а Минздравсоцразвития утвердило нормы потребления продуктов питания, которые основаны на самых современных представлениях диетологов о том, какую именно еду и в каком количестве надо есть, чтобы сохранить здоровье. При этом учитывались особенности и традиции питания в нашей стране, а также возможности Агропрома России.

Состав здорового рациона человека для ежедневного питания (по данным института питания РАМН, 2010) включает: мясо и мясопродукты (всего 200 г), в том числе: говядина (70 г), баранина (3 г), птица (80 г), свинина (40 г); молоко и молочные продукты (всего 900 г), в том числе: молоко, кефир, йогурт с жирностью 1,5–3,2% (165 г), из них обогащенные микронутриентами (300 г), молоко, кефир, йогурт с жирностью 0,5–1,5% (140 г), сыр (16 г), сметана (10 г), творог жирный (25 г), творог нежирный 0,09% (25 г), масло животное (10 г); хлебобулочные и макаронные изделия в пересчете на муку, мука, крупы, бобовые (270 г); картофель (270 г); фрукты и ягоды (260 г); масло растительное (30 г); овощи и бахчевые (360 г); сахар (70 г); соль (8 г); яйца (0,7 штук); рыба и рыбопродукты (55 г)

В Китае, который является мировым лидером по объему аквакультуры, ее развитию всегда уделяли много внимания, так как потребление рыбы здесь высокое. Но значительная ее доля идет на экспорт – более, чем на 12 млрд евро в год. Показатели Вьетнама, Таиланда и Индии остаются на уровне 4–5 млрд евро. Во многих частях Азии (особенно в Юго-Восточной) рыба остается основным источником животного белка, но в некоторых странах континента люди страдают от нехватки этого важного

компонента питания. Дорогие мясные продукты не попадают в их меню. Доля животного белка здесь менее 10%, тогда как для поддержания здоровья человека она должна составлять не менее трети. Кроме того, население все еще нуждается в средствах. Именно здесь особенно выгодно развивать экологически устойчивую аквакультуру, так как она не только накормит местное население, но и даст дополнительный доход за счет экспорта.

Мировым лидером по производству кормов для аквакультуры и одновременно крупнейшим их потребителем является Китай. Ежегодно в Китае производится около 17,30 млн т кормов, что составляет около 40% мирового производства. В то же время китайская аквакультура потребляет 3/4 общего объема кормов, производимых в мире.

По объемам отраслевого производства кормов вслед за Китаем, с большим отрывом, располагаются такие страны, как Вьетнам (2,80 млн т/год), Норвегия (1,79 млн т/год), Чили (1,24 млн т/год), Индонезия (1,23 млн т/год), Индия (1,16 млн т/год), США (1,00 млн т/год) и др.

В настоящее время, несмотря на сложившуюся кризисную ситуацию в мировой экономике, проблемы в сфере экологически безопасного здорового питания, а также экологического сельского хозяйства в целом остаются наиболее актуальными и востребованными в современном обществе. В XXI веке возможность потребления безопасных и здоровых продуктов интересует все слои населения. Этот факт подтверждают

проводимые социологические исследования во всем мире. Интерес к этому сегменту рынка набирает обороты, что обеспечивает положительную тенденцию роста спроса на биопroduкцию в обществе [55, 7].

Так, например, по обобщенным данным исследования населения, дефицит полноценных белков составляет 25%, витаминов В – 30–40%, витамин А – 30%. Вызвавшая неподдельное изумление исследователей ситуация с глубочайшим дефицитом витамина С – 70–90% (даже после лета) в настоящее время несколько выровнялась после активно предпринятых мер по дополнительной витаминизации продуктов [56].

Проблемы дефицита здорового питания значительно усугубляются в условиях нашего громадного мегаполиса с его неблагоприятной экологической обстановкой [57, 8].

Как показали исследования коллектива ученых под руководством проф. Антиповой Л.В. (2002–2025), рыба является превосходным источником полноценного животного белка, легкоусвояемого жира, жирорастворимых витаминов, микроэлементов, незаменимых аминокислот и экстрактивных веществ, который может выступать важнейшим фактором питания, определяющим здоровье человека. Необходимо отметить, что рыбные продукты широко используются в повседневном рационе, необходимы в детском и диетическом питании [58]. Средние данные о химическом составе рыбы представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Содержание питательных веществ в различных видах рыб [www.fishing.narod.ru]

Table 1.

Nutrient content of different types of fish [www.fishing.narod.ru]

Продукт	Вода, г	Белки, г	Жиры, г	Энергетическая ценность, ккал
Горбуша	70,5	21,0	7,0	147
Карась	78,9	17,7	1,8	87
Карп	79,1	16,0	3,6	96
Кета	71,3	22,0	5,6	96
Корюшка	79,8	15,5	3,2	138
Лещ	77,7	17,1	4,1	91
Семга	62,9	20,8	15,1	105
Минтай	80,1	15,9	0,7	219
Мойва	75,0	13,4	11,5	70
Окунь речной	79,2	18,5	0,9	157
Осетр	71,4	16,4	10,9	82
Палтус	76,9	18,9	3,0	164
Путассу	81,3	16,1	0,9	103
Сазан	75,3	18,4	5,3	121
Салака	75,4	17,3	5,6	121
Сельдь	62,7	17,7	19,5	242
Скумбрия	71,8	18,0	9,0	153
Сом	75,0	16,8	8,5	144
Ставрида	74,9	18,5	5,0	119
Стерлядь	74,9	17,0	6,1	320
Судак	78,9	19,0	0,8	83
Треска	80,7	17,5	0,6	75
Угорь	53,5	14,5	30,5	333
Хек	79,9	16,6	2,2	86
Щука	70,4	18,8	0,7	82

Пищевая ценность рыбы не ограничивается содержанием в ней высококачественных белков и легкоусвояемых жиров. Рыбные продукты удовлетворяют потребности организма человека в витаминах и минеральных веществах (таблица 2, 3).

Таблица 2.

Минеральный состав рыб, мг на 100г
продукта [54]

Table 2.

Mineral composition of fish, mg per 100 g
of product [54]

Минеральные вещества	Карп	Толстолобик	минтай	хек	треска
Ca	35	30	40	30	25
Mg	25	20	55	35	30
K	265	270	420	335	340
P	210	210	240	240	210
S	180	185	170	200	200
Fe	0,8	0,5	0,8	0,7	0,5
Zn	2,08	2,07	1,12	0,9	1,02
F	0,025	0,035	0,700	0,700	0,007
Cr	0,055	0,050	0,055	0,55	0,055
Co	0,035	-	0,015	0,020	0,030
Ni	0,007	-	0,007	0,007	0,009
I	0,050	-	0,150	0,160	0,135
Mn	0,15	-	0,1	0,12	0,08
Cu	0,130	-	0,130	0,135	0,150
Mo	0,004	-	0,004	0,004	0,004
Na	-	-	40	75	55
Cl	-	-	165	165	165

Мясо рыбы отличается высокой пищевой ценностью, поэтому рыбные блюда широко используются в повседневном рационе, в том числе в детском и диетическом питании. Если телятина переваривается в организме человека за 5 часов, то рыба за 2–3 часа [9, 10, 56]. Ценной составной частью рыб, особенно океанических, является жир. Содержание жира в разных видах рыб колеблется примерно от 1 до 20 процентов. Жир океанических рыб богат жирорастворимыми витаминами А и D [11, 12, 52]. При этом витамина А в рыбе содержится во много раз больше, чем в мясе наземных животных [14, 53, 17]. В мясе рыб содержатся также водорастворимые витамины: витамин С, а также комплекс витаминов группы В: В₁, В₂, В₆, В₁₂, витамины Н и РР, пантотеновая кислота. В рыбе содержится много необходимых для организма человека минеральных элементов, среди которых преобладает фосфор, кальций, калий, натрий, магний, сера. А также железо, медь, марганец, кобальт, цинк, молибден, йод, бром, фтор и другие элементы, имеющие важное значение для организма человека.

Таблица 2.

Содержание витаминов в мышечной ткани
рыб, мг/100г [54]

Table 2.

Vitamin content in fish muscle tissue, mg/100g [54]

Витамин	Карп	Толстолобик	минтай	хек	треска
A	0,021	0,611	0,01	0,01	0,01
E	0,477	0,349	0,3	0,4	0,9
C	1,500	1,757	0,5	0,5	1
PP	2,500	1,503	1,3	1,3	2,3
B ₆	0,168	0,108	0,1	0,1	0,2
B ₁₂	1,489	1,434	-	-	1,6
B ₂	-	0,308	0,11	0,1	0,07
B ₁	0,143	0,102	0,11	0,12	0,09
B ₉	0,0093	0,0092	0,0049	0,01	0,0013
B ₃	0,207	0,201	-	-	-

Трудно оспорить полезность рыбы в рационе питания человека, поэтому вкусные рецепты приготовления рыбных блюд достояние любой национальной кухни, они присутствуют в каждом доме. Люди, употребляющие рыбу один два раза в неделю, живут значительно дольше, при этом они обладают хорошим зрением, крепкими ногтями, густыми волосами, реже имеют проблемы с сердцем и сосудами [50, 14, 20].

Мясо обитателей морей, рек, озёр и прудов содержит в себе белок очень высокого качества, который легко усваивается организмом. Жирные рыбы, например треска, горбуша, кета, лосось или форель богаты аминокислотами, помогающими снижать уровень холестерина. Морские виды особенно славятся содержанием большого количества йода, который входит в состав гормонов щитовидной железы, недостаток его снижает их функции, вызывает болезни [18, 19, 54].

Рыба, живущая в море, благодаря наличию в её мясе полиненасыщенных жирных кислот Омега-3 и Омега-6, отсутствующих в других продуктах, очень полезна [20, 25, 53]. К тому же она богата бромом, йодом, молибденом, фтором, медью, серой, магнием, кобальтом, железом, калием, фосфором и другими минеральными веществами. В ней большое количество витаминов (РР, А, Н, D, гр. В и др.), не меньше чем в овощах и фруктах. Морская рыба, употребляемая регулярно, благоприятно воздействует на центральную нервную систему, в том числе на работу головного мозга. Она поддерживает организм в стрессовых ситуациях, помогает избегать депрессивных состояний, положительным образом влияет на формирование костей в детском возрасте, сохраняет эластичность и упругость кожи, способствует красоте волос и ногтей, хорошо сказывается на работе мочеполовой системы [21, 22].

К недостаткам морской рыбы можно отнести её довольно высокую стоимость, особенно это относится к красным породам. Более доступна рыба с белым мясом, например, камбала, путассу, сельдь, скумбрия, треска, ставрида, мойва, килька и другие. Килькой называют разные виды мелких морских рыб (стайных).

Наиболее полезен не замороженный, а именно свежий продукт, обладающий более высокой пищевой ценностью. Больше всего это касается жителей небольших населённых пунктов, к тому же расположенных далеко от мест улова. Еще один минус – возможная аллергическая реакция после употребления морской рыбы, которая чаще всего происходит у маленьких детей [23, 27, 42].

Рыбы, живущие в реках, озёрах или прудах, по количеству аминокислот значительно уступают обитателям морей и считаются по сравнению с ними менее полезными. Нет в них брома и йода. В пресноводной рыбе мало жиров, но по содержанию белка некоторые породы (например, судак и сазан) опережают куриное и говяжье мясо. Самой полезной является рыба, выловленная до нереста, в то время как в период метания икры её питательные свойства значительно уменьшаются вследствие истощения. К тому же лов рыбы во время метания икры запрещён или ограничен в соответствии с законами и правилами, действующими в той или иной местности [26,54].

Мясо пресноводных обитателей содержит комплекс веществ, среди которых присутствуют витамины А, Е и D, благотворно влияющие на кожу, волосы, костную систему и зубы. Систематическое включение речной рыбы в рацион питания помогает организму лучше усваивать кальций, что особенно полезно в период восстановления костей после переломов и в целях профилактики остеопороза [37, 28, 29].

Как недостаток следует отметить, что среда обитания пресноводных рыб загрязнена сильнее, чем морские просторы. Поэтому вероятность накопления в мясе частиц тяжёлых металлов, пестицидов и прочих вредных веществ гораздо больше. Блюда из речных или озёрных рыб необходимо подвергать тщательной тепловой обработке во избежание заражения гельминтами [33, 32, 37]. Как и морские обитатели, пресноводные способны вызывать аллергию [38, 40].

В настоящее время наибольшей популярностью пользуется красная рыба, относящаяся к семейству лососевые: сёмга, кижуч, чавыча, горбуша, кета, форель и другие. Ценится не только её мясо, но также икра. Например, сёмга полезна при мужском бесплодии. Систематически употребляя эту вкусную рыбу, человек замедляет старение организма, благодаря содержащемуся в её мясе антиоксиданту – селену, нейтрализующему свободные радикалы, которые

способны разрушать структуру клеток [39, 15, 42]. Лососевое мясо содержит большое количество белка и кальция, витамины С, Е, группы В, что способствует нормальному кроветворению и нормализации артериального давления. Форель помогает бороться с болезнью Альцгеймера, атеросклерозом, депрессией, улучшает состояние при дисменорее, устраняет симптомы усталости, придаёт энергию [43, 32, 41].

Полезной пресноводной рыбой является окунь, судак, щука, карась, сазан. В них мало калорий и много витаминов (А, С, РР, Е, группы В и др.), минеральных веществ: кальция, цинка, серы, калия, а также белка, который организм легко усваивает. Мясо щуки обладает антисептическими свойствами, что помогает быстрейшему выздоровлению при различных инфекционных заболеваниях.

Разные рыбы, обитающие в морях, реках, озерах или в прудах, отличаются между собой не только внешним видом, вкусом, ароматом, консистенцией мяса, но и по количеству и качеству содержащихся в них углеводов, белков, жиров, минеральных веществ и витаминов. Но все они в большей или меньшей степени оказывают положительное воздействие на человеческий организм.

Минеральные вещества мяса рыбы очень разнообразны по составу, но по количеству их содержание находится в пределах 1,2–1,5%. Особенно богатый минеральный состав имеет океаническая рыба, так как в морской воде содержатся практически все известные нам минеральные вещества. Рыба избирательно накапливает в своем теле и органах минеральные вещества из среды обитания. Преобладающие минеральные вещества рыбы: макроэлементы – натрий, калий, хлор, кальций, фосфор, магний, сера, микроэлементы, йод, медь, железо, марганец, бром, алюминий, фтор; ультрамикроэлементы: цинк, кобальт, стронций, уран. Минеральные вещества представлены ионами, солями в составе белков, витаминов, ферментов, гормонов. Сложные белки (протеиды) в своем составе имеют фосфор, железо, кальций, магний, калий, натрий, серу и др. Сложные ферменты в составе простатической группы содержат микроэлементы (медь, железо, марганец и др.), что резко активизирует их биохимическую деятельность. Многие витамины, особенно группы В, гормоны также включают микро- и ультрамикроэлементы. Морская рыба особенно богата йодом. Мясу рыб семейства тресковых присущ йодистый привкус, ценимый гастрономами. Люди, постоянно питающиеся морской рыбой, не имеют заболеваний щитовидной железы. Видовой вкус и аромат рыбы во многом выражен минеральным составом [8, 54, 44].

Некоторые виды рыб невысокой потребительской ценности дают прекрасные, ароматные бульоны за счет перехода в них минеральных веществ, само же их мясо мало привлекательно после варки. При варке голов, костной ткани в бульон переходит минеральных веществ больше, чем при варке мышечной ткани [53, 27, 30]. Поэтому экстрактивные, наваристые бульоны получаются при варке необезглавленной потрошеной рыбы. Витамины содержатся в различных частях и органах рыб. Жирорастворимые витамины (А, Д, К) преобладают в тех частях и органах, где накапливаются жиры. Это прежде всего печень. Из печени трески, акул вырабатывают рыбий жир (медицинский) с большим содержанием витаминов. В рыбьем жире содержатся эссенциальные жирные кислоты (линоленовая, арахидоновая), которые в комплексе образуют витамин F. Полагают, что этот витамин является профилактическим средством против онкологических заболеваний, снижает уровень холестерина в печени и обеспечивает эластичность кровеносных сосудов [45]. Из водорастворимых витаминов отмечено достаточное содержание в мышечной ткани витаминов В1 (тиамин) и В2 (рибофлавин). Внутренние органы рыб содержат витамин В12, являющийся кроветворным катализатором, отсутствие которого может привести к злокачественной анемии. Ферменты рыб играют исключительно важную роль в процессах, происходящих в посмертный период во всех тканях и органах рыб, также при различных способах переработки рыбного сырья, особенно при посоле, вялении, холодном копчении, производстве пресервов [46, 37, 47]. В органах и тканях рыб содержатся ферменты всех шести классов по систематической номенклатуре комиссии по ферментам Международного биохимического союза от 1961 года: оксидоредуктазы (окислительно-восстановительные), трансферазы (ферменты переноса), гидролазы (ферменты расщепления с участием воды), липазы (ферменты расщепления без участия воды), изомеразы (ферменты превращений), лигазы (ферменты синтеза). Наибольшее значение в формировании потребительских свойств рыбной продукции имеют окислительно-восстановительные и гидролитические ферменты. Процессы созревания рыбы после гибели (от удушья), а также биохимические процессы созревания соленой и вяленой рыбы протекают с участием прежде всего ферментов этих классов [49]. Окислительно-восстановительные ферменты – самый многочисленный класс, насчитывающий более 220 наименований, они подразделяются на несколько групп. Первая группа – дегидрогеназы, осуществляющие роль переносчиков водорода. Дегидрогеназы являются двухкомпонентными системами,

активной частью (коферментами) которых являются НАД (никотинамид-аденин-динуклеотид) и НАДФ (никотинамид-аденин-динуклеотид-фосфат). В процессе начального созревания рыбы изменениям подвергаются углеводы. При молочнокислом брожении НАД. Н₂ (восстановленный водород кофермент дегидрогеназы) восстанавливает пировиноградную кислоту в молочную. Образующаяся молочная кислота создает кислую среду, неблагоприятную для развития гнилостных микробиологических процессов, белки мышц набухают, застывают, и наступает стадия посмертного окоченения у свежееуснувшей рыбы, что свидетельствует о безупречной свежести рыбы. Аминокислоты являются конечным структурным элементом ферментативного распада белков. Чем больше образуется продуктов распада белков, особенно низкомолекулярных (дипептидов, аминокислот), тем ярче вкус и аромат продукта [50, 58]. В производственной практике процесс созревания рыбы охлажденной, мороженой, соленой, вяленой определяют по количеству образовавшихся аминокислот (по содержанию аминокислотного азота). Считают, что 30% аминокислотного азота (от общего азота, входящего в состав как белков, так и небелкового) характеризуют продукцию как вполне созревшую и свежую. Дальнейшее увеличение этого показателя свидетельствует о перезревании рыбы и последующей порче. При дальнейшем хранении рыбы низкомолекулярные продукты распада белка (прежде всего, аминокислоты) становятся объектом питания микроорганизмов. При этом в зависимости от вида микроорганизмов аминокислоты могут распадаться с образованием различных конечных продуктов метаболизма. Накапливающиеся вещества обладают ядовитыми свойствами и придают рыбе неприятный запах [51, 8]. Протеолитические ферменты осуществляют гидролиз белков значительно активнее, чем подобные ферменты наземных животных, поэтому процесс созревания рыбы протекает значительно быстрее, чем мяса убойных животных. Причем действие протеаз рыб протекает в довольно широком диапазоне pH: от кислой среды (pH 3,5–4,5), где активность максимальная, до щелочной (pH 8), где активность составляет 5–10% активности при pH 3,5–4,5. При естественном для рыбы pH 6,6–7,0, активность ферментов в 310 раз ниже, чем при pH 3,5–4,5. Хлористый натрий (NaCl) даже при концентрации 3% вызывает частичную инактивацию ферментов, при 5%-ной концентрации обеспечивается выраженный ингибирующий эффект. В технологии переработок неразделанной рыбы посолом, холодным копчением, вялением, а также при хранении охлажденной рыбы

необходимо принимать во внимание деятельность ферментов внутренних органов (кишечника, пилорических придатков), представленных пепсином и трипсином, которые по оптимуму pH близки к пищеварительным ферментам наземных животных, однако имеют отличия. Пищеварительные ферменты рыб имеют температурный оптимум значительно ниже, а способность расщеплять белки выше, чем у наземных животных [53,28]. Их активность изменяется в зависимости от сезона, вида рыбы. Действие поваренной соли вызывает ингибирующий эффект, но остаточная активность ферментов внутренностей рыб выше, чем активность протеолитических ферментов мышечной ткани. Это обстоятельство объясняет необходимость детального изучения пищеварительных ферментов рыб, с тем чтобы устанавливать технологический процесс обработки с учетом изменчивости активности протеолитических ферментов в зависимости от различных факторов. Параллельно протеолитическим процессам при созревании рыбы проходит и гидролиз жиров под действием ферментов – липаз по схеме: триглицериды → диглицериды → моноглицериды → свободные жирные кислоты и глицерин [53,57]. Конечные продукты этого гидролиза (свободные жирные кислоты) повышают кислотное число жира, что ведет к его порче, но это не всегда отражается на органолептических показателях. Например, при вялении рыбы жиры подвергаются не только гидролизу, но и окислительным изменениям, но вкус и запах рыбы только улучшаются, т. е. не прослеживается прямая зависимость между распадом жиров и потребительской ценностью продукта [55, 32, 12]. Одновременно с изменениями белков, жиров при созревании рыбных продуктов существенные превращения наблюдаются в углеводной части. Как было отмечено выше, процесс созревания, собственно, и начинается с фосфолиза и гидролиза гликогена рыбы [41,10]. Повышение содержания глюкозы усиливает сладость мяса рыбы и способствует реакциям ее взаимодействия с другими веществами с образованием различных комплексов (например, меланоидинов). Это улучшает вкус рыбы, но в некоторых случаях (при вялении, сушке) вызывает ухудшение товарного вида рыбы (потемнение поверхности

тела). Из фосфатов следует обратить внимание на ферменты, вызывающие гидролиз нуклеотидов (АТФ и др.) с образованием пуриновых (аденина, гуанина и др.) или пиримидиновых (цитозина, урацила, тимина) оснований, сахаров рибоза или дезоксирибоза и фосфорной кислоты [36,53]. Такой распад нуклеотидов увеличивает количество экстрактивных веществ, усиливает вкус и аромат рыбных продуктов. Но одновременно расширяет питательную среду для микроорганизмов, делает продукт менее устойчивым при хранении. Вода в тканях и органах рыбы находится в свободном и связанном состоянии [31, 33, 56]. Свободная вода – это жидкость в межклеточном пространстве, в плазме крови и лимфе, кроме того, удерживаемая механически в макро – и микрокапиллярах за счет сил поверхностного натяжения, кроме того, осмотически удерживаемая в клетках давлением растворов. Имеет место также химически связанная вода, входящая в состав молекулы вещества. Свободная вода является растворителем органических и минеральных веществ, и в ней протекают все биохимические и микробиологические процессы. Это обычная вода: замерзает при 0 °С и кипит при 100 °С, легко отпрессовывается и испаряется при сушке. Связанная вода адсорбционно удерживается в коллоидах (белках, гликогене) силами электрического притяжения. Связанная вода, будучи трудноотделимой, в определенной степени обеспечивает плотность тканей вместе с коллоидами (прежде всего белками). Она не принимает участия в реакциях ферментативного или микробиологического характера и тем самым способствует консервации продукта.

Заключение

Стоит отметить, что сейчас все мировые государства интересуют инвестиции в технологию выращивания рыбы и в ее технологии переработки для создания нового ассортимента рыбных продуктов. А это дает понимание, что рыба является важным продуктом питания, который обеспечивает здоровье организма человека, и играет важную роль в сфере экономического развития во всех странах мира, где производство рыбы и рыбные продукты находятся на высоком уровне.

Литература

- 1 Яркина Н.Н., Логунова Н.А. Устойчивое развитие рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации: факторы и тенденции // Труды ВНИРО. 2023. Т. 192. С. 192–201.
- 2 China National Economic Technological Development Zones & Border Economy Cooperate Districts [Электронный ресурс]. URL: <http://ezone.mofcom.gov.cn/> (дата обращения: 15.07.2025).
- 3 Китайская ассоциация зон развития: офиц. сайт. URL: <http://www.cadz.org.cn/> (дата обращения: 10.07.2025).
- 4 Состояние мирового рыболовства и аквакультуры. Достижение целей устойчивого развития. Рим: ФАО ООН, 2022. 209 с. URL: <https://www.fao.org> (дата обращения: 07.03.2022).
- 5 Пищенко Е.В. Аквакультура России в 2025 году: драйверы роста (краткий обзор) // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2025. № 11. С. 15–25. doi: 10.33920/sel-09-2511-01

- 6 Хохлова Н.Ф. Тенденции развития рыбоводства и рыболовства в России // Вестник Московского финансово-юридического университета. 2021. № 4. С. 109–119.
- 7 Рыболовство: отрасль в упадке. 2021. URL: <https://www.yaga-burundi.com/2021/peche-secteur-regression/> (дата обращения: 03.04.2021).
- 8 Об утверждении Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 26.11.2019 № 2798-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- 9 Баринова В.А., Земцов С.П., Царева Ю.В. Предпринимательство и институты: есть ли связь на региональном уровне в России? // Вопросы экономики. 2018. № 6. С. 96–115.
- 10 Мау В.А. Экономика и политика в 2019–2020 гг.: глобальные вызовы и национальные ответы // Вопросы экономики. 2020. № 3. С. 5–28.
- 11 Максимова С.Н., Швидкая З.П., Панчишина Е.М. Технология консервов из водных биологических ресурсов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2019. 144 с.
- 12 Макоедов А.Н., Матишов Г.Г., Пономарёв Е.Н. Мировые тенденции пользования водными биоресурсами // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 2. С. 179–190. doi: 10.31857/S086958732301005X
- 13 Бочкарёв Н.А. Сиги комплекса *Coregonus lavaretus* (Pisces: Coregonidae) из водоемов Сибири: филогеография и филогения: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2022. 49 с.
- 14 Вишневский В.А. Птицы Москвы и Подмосквья: полный определитель. М.: Фитон XXI, 2017. 320 с.
- 15 Дунаев Е.А., Орлова В.Ф. Змеи. Представители фауны России: карманный справочник. М.: Фитон XXI, 2018. 120 с.
- 16 Павлинов И.Я. Звери России. Справочник-определитель. Часть 2. Хищные, непарнокопытные, Парнокопытные, Китообразные, Сирены. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2019. С. 341–702.
- 17 Fish farms to produce nearly two thirds of global food fish supply by 2030 [Электронный ресурс]. Рим: ФАО ООН. URL: <http://www.fao.org> (дата обращения: 04.04.2025).
- 18 Egna H.S., Boyd C.E. Dynamics of Pond Aquaculture. Boca Raton: CRC Press, 2018. 464 p. URL: <http://insightmaker.com/>
- 19 Joint FAO/NACA/WHO Study Group. Food safety issues associated with products from aquaculture: отчет. Женева: Всемирная организация здравоохранения, 1999. 76 с. (Серия технических докладов ВОЗ; № 883). URL: <http://www.who.int/>
- 20 Государственная программа «Развитие сельского хозяйства и рыболовства в Белгородской области на 2014–2020 годы» (в ред. постановлений Правительства Белгородской области от 24.02.2014 № 55-пп, от 30.06.2014 № 235-пп, от 15.07.2014 № 258-пп). Белгород, 2014.
- 21 Замглавы Росрыболовства: проблема Северного бассейна заключается в неэффективности промысла. URL: <http://www.b-port.com/news/item/198563.html> (дата обращения: 07.07.2020).
- 22 Государственная поддержка предприятий рыбохозяйственного комплекса. URL: http://mrcx.gov-murman.ru/activities/RHK/gpp_rxk/ (дата обращения: 07.07.2025).
- 23 Любительское и спортивное рыболовство Мурманской области. URL: http://mrcx.gov-murman.ru/activities/RHK/fish_orgs/list_sport.php (дата обращения: 04.0.2025).
- 24 Bhat, Z. F., Morton, J. D., Bekhit, A. E. et al. Thermal processing implications on the digestibility of meat, fish and seafood proteins // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2021. – Т. 20. – №. 5. – С. 4511-4548.
- Шаповалова Л. А., Федотова М. В., Мухин В. А. Обоснование требований к актуализации стандарта на консервы из печени, икры и молок рыб «По-мурмански» в целях повышения конкурентоспособности продукции // Труды ВНИРО. – 2023. – Т. 192. – С. 172-180.
- 25 Основные фонды в Мурманской области: статистический сборник. Мурманск: Мурманскстат, 2025. 52 с.
- 26 Промышленное производство в России – 2025: статистический сборник. М.: Росстат, 2025. 347 с.
- 27 Ридигер А.В. Арктика как источник водных биологических ресурсов // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2022. № 4 (8). С. 65–75.
- 28 Балашов В.В., Волвенко И.В., Зиланов В.К. и др. О потреблении рыбной продукции населением России // Рыбное хозяйство. 2025. № 6. С. 65–74.
- 29 World Nutrition Forum 2024, Biomin, Австрия: материалы форума. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/9_15/09_2015_028-030.pdf (дата обращения: 02.09.2024).
- 30 Mukhametzyanov R. et al. The objective need and trend of ensuring the food security in Russia in conditions of import substitution // BIO Web of Conferences. 2021. V. 37. P. 00079. doi: 10.1051/bioconf/20213700079
- 31 Аннотированный каталог круглоротых и рыб континентальных вод России / Под ред. Ю.С. Решетникова. М.: Наука, 1998. 218 с.
- 32 Анянueva Н.Б., Орлов Н.Л., Халиков Р.Г., Даревский И.С., Рябов С.А., Барабанов А.В. Атлас пресмыкающихся Северной Евразии (таксономическое разнообразие, географическое распространение и природоохранный статус). СПб.: Зоологический институт РАН, 2004. 232 с.
- 33 Заделёнов В.А., Дербинева Е.В. Нельма *Stenodus leucichthys nelma* (Pallas, 1773) (Salmoniformes, Coregonidae) реки Енисей: структура популяции, промысел, воспроизводство // Вопросы рыболовства. 2020. Т. 21. № 2. С. 156–168.
- 34 Gao T., Erokhin V. Capturing a complexity of nutritional, environmental, and economic impacts on selected health parameters in the Russian High North // Sustainability. 2020. V. 12. № 5. P. 2151. doi: 10.3390/su12052151
- 35 Атлас пресноводных рыб России: в 2 т. Т. 1 / Под ред. Ю.С. Решетникова. М.: Наука, 2003. 379 с.
- 36 Атлас пресноводных рыб России: в 2 т. Т. 2 / Под ред. Ю.С. Решетникова. М.: Наука, 2003. 253 с.
- 37 Баранов А.А. Птицы Алтай-Саянского экорегиона: пространственно-временная динамика разнообразия: монография. Т. I. Красноярск: Краснояр. гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева, 2012. 64 с.
- 38 Баранов А.А., Ближенцев А.С. Петрофильные птицы южной части Средней Сибири. Красноярск: Краснояр. гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева, 2014. 200 с.
- 39 Баранов А.А., Мельник О.Н. Чайковые птицы Laridae континентальных водоёмов южной части Средней Сибири. Красноярск: Краснояр. гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева, 2014. 175 с.
- 40 Tolkachev S., Teplyakov A. Import substitution in Russia: the need for a system-strategic approach // Russian Social Science Review. 2022. V. 63. № 1-3. P. 15–40.
- 41 Рыбкина И.Д., Курепина Н.Ю., Плуталова Т.Г. Перспективы водопользования на территории бессточной области Обь-Иртышского бассейна Алтайского края // Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации: сборник статей. Барнаул, 2020. С. 127–131. doi: 10.29003/m1692.978-5-317-06490-7/127-131
- 42 Вышегородцев А.А. Рыбы Енисея: справочник. Новосибирск: Наука, 2000. 188 с.

- 43 Вышегородцев А.А., Заделёнов В.А. Промысловые рыбы Енисея: монография. Красноярск: СФУ, 2013. 303 с.
- 44 Гадинов А.Н. Динамика уловов рыбы в р. Енисее от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангары // Проблемы и перспективы использования водных биоресурсов Сибири в XXI веке: материалы всерос. конф. с международным участием (Красноярск, 8–12 декабря 2008 г.). Красноярск: ИПК СФУ, 2009. С. 155–159.
- 45 Городилова С.Н. Эколого-фаунистический анализ земноводных (Amphibia) лесостепи Средней Сибири: дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2010. 191 с.
- 46 Грязнова А.Н. Сравнительная экология береговой и бледной ласточек на юге Центральной Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2019. 177 с.
- 47 Дгебуадзе Ю.Ю. Проблемы инвазий чужеродных организмов // Экологическая безопасность и инвазии чужеродных организмов: материалы Круглого стола Всерос. конф. по экологической безопасности России (Москва, 4–5 июня 2002 г.). М.: ИПЭЭ РАН, 2002. С. 11–14.
- 48 Труба А.С., Труба М.А., Акимов Е.Б. Тенденции трансформации отрасли пресноводной аквакультуры в России: экономический аспект // Вопросы рыболовства. 2025. Т. 26. № 2. С. 177–190.
- 49 Krasnoshtanova N. Sustainable Development of Resource Regions: Challenges for Remote Areas of Siberia // International Conference on Resources, Environment and Regional Sustainable Development in Northeast Asia: Proceedings. Cham: Springer, 2023. P. 311–325. doi: 10.3390/su15129293
- 50 Строганов А.Н., Булатов О.А., Пономарева Е.В. и др. Роль макроэволюционных процессов в формировании таксономической структуры диатомных лососевых // Вопросы рыболовства. 2025. Т. 26. № 3. С. 27–50.
- 51 Балдин Д.П. Содержание минеральных веществ в рыбе // Успехи молодежной науки в агропромышленном комплексе. 2022. С. 16–24.
- 52 Антипова Л. В., Попов Е. С. Рациональное использование прудовых рыб поликультурного выращивания вектор развития производства высококачественных рыбопродуктов // Новые технологии. 2023. Т. 19. №. 3. С. 14-26.
- 53 Tutelyan V.A., Nikityuk D.B., Tarmaeva I.Yu. Formation of the All-Russian Education System in the field of healthy food of the population // Hygiene and Sanitation. 2023. Т. 102. № 10. P. 1012–1018.
- 54 Granato D., Barba F.J., Bursac Kovačević D. et al. Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety // Annual review of food science and technology. 2020. V. 11. № 1. P. 93–118.
- 55 Astashova A., Khomutova E. Problems and Prospects of Aquaculture Development in the Russian Federation // International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry "Interagromash". Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 518–525. doi: 10.1007/978-3-031-21219-2_57
- 56 Kulikov I.M., Minakov I.A. Food security: problems and prospects in Russia // Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development. 2019. V. 19. Issue 4. P. 142–148.

References

- 1 Yarkina N.N., Logunova N.A. Sustainable development of the fishery complex of the Russian Federation: factors and trends. Proceedings of VNIRO. 2023. vol. 192. pp. 192–201. (in Russian)
- 2 China National Economic Technological Development Zones & Border Economy Cooperate Districts. Available at: <http://ezone.mofcom.gov.cn/> (accessed July 15, 2025).
- 3 Chinese Association of Development Zones. Official website. Available at: <http://www.cadz.org.cn/> (accessed July 10, 2025).
- 4 The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome: FAO, 2022. 209 p. Available at: <https://www.fao.org> (accessed March 7, 2022).
- 5 Pishchenko E.V. Russian aquaculture in 2025: growth drivers (brief review). Fish Farming and Fisheries. 2025. no. 11. pp. 15–25. doi: 10.33920/sel-09-2511-01 (in Russian)
- 6 Khokhlova N.F. Trends in the development of fish farming and fishing in Russia. Bulletin of Moscow Financial and Law University. 2021. no. 4. pp. 109–119. (in Russian)
- 7 Fishing: an industry in decline. 2021. Available at: <https://www.yaga-burundi.com/2021/peche-secteur-regression/> (accessed April 3, 2021).
- 8 On approval of the Strategy for the development of the fishery complex of the Russian Federation for the period until 2030: Decree of the Government of the Russian Federation dated November 26, 2019 No. 2798-r. Available from the legal reference system "ConsultantPlus".
- 9 Barinova V.A., Zemtsov S.P., Tsareva Yu.V. Entrepreneurship and institutions: is there a connection at the regional level in Russia? Economic Issues. 2018. no. 6. pp. 96–115. (in Russian)
- 10 Mau V.A. Economy and politics in 2019–2020: global challenges and national responses. Economic Issues. 2020. no. 3. pp. 5–28. (in Russian)
- 11 Maksimova S.N., Shvidkaya Z.P., Panchishina E.M. Technology of canned aquatic biological resources: textbook. St. Petersburg: Lan, 2019. 144 p. (in Russian)
- 12 Makoedov A.N., Matishov G.G., Ponomareva E.N. Global trends in the use of aquatic biological resources. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2023. vol. 93. no. 2. pp. 179–190. doi: 10.31857/S086958732301005X (in Russian)
- 13 Bochkarev N.A. Whitefish of the Coregonus lavaretus complex (Pisces: Coregonidae) from water bodies of Siberia: phylogeography and phylogeny: abstract of dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences. Novosibirsk, 2022. 49 p. (in Russian)
- 14 Vishnevsky V.A. Birds of Moscow and the Moscow region: a complete guide. Moscow: Fiton XXI, 2017. 320 p. (in Russian)
- 15 Dunaev E.A., Orlova V.F. Snakes. Representatives of the fauna of Russia: pocket guide. Moscow: Fiton XXI, 2018. 120 p. (in Russian)
- 16 Pavlinov I.Ya. Animals of Russia. Handbook-guide. Part 2. Carnivores, Odd-toed ungulates, Even-toed ungulates, Cetaceans, Sirenians. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2019. pp. 341–702. (in Russian)
- 17 Fish farms to produce nearly two thirds of global food fish supply by 2030. Rome: FAO. Available at: <http://www.fao.org> (accessed April 4, 2025).
- 18 Egna H.S., Boyd C.E. Dynamics of Pond Aquaculture. Boca Raton: CRC Press, 2018. 464 p.
- 19 Joint FAO/NACA/WHO Study Group. Food safety issues associated with products from aquaculture: report. Geneva: World Health Organization, 1999. 76 p. (WHO Technical Report Series; no. 883).
- 20 State program "Development of agriculture and fish farming in the Belgorod region for 2014–2020" (as amended by the resolutions of the Government of the Belgorod region dated February 24, 2014 No. 55-pp, dated June 30, 2014 No. 235-pp, dated July 15, 2014 No. 258-pp). Belgorod, 2014. (in Russian)

- 21 Deputy Head of Rosrybolovstvo: the problem of the Northern Basin lies in the inefficiency of fishing. Available at: <http://www.b-port.com/news/item/198563.html> (accessed July 7, 2020). (in Russian)
- 22 State support for enterprises of the fishery complex. Available at: http://mrcx.gov-murman.ru/activities/RHK/gpp_rvk/ (accessed July 7, 2025). (in Russian)
- 23 Amateur and sport fishing in the Murmansk region. Available at: http://mrcx.gov-murman.ru/activities/RHK/fish_orgs/list_sport.php (accessed April 4, 2025). (in Russian)
- 24 Bhat Z.F., Morton J.D., Bekhit A.E. et al. Thermal processing implications on the digestibility of meat, fish and seafood proteins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. vol. 20. no. 5. pp. 4511–4548.
- 25 Shapovalova L.A., Fedotova M.V., Mukhin V.A. Substantiation of requirements for updating the standard for canned food from fish liver, roe and milk "Murmansk-style" in order to increase product competitiveness. *Proceedings of VNIRO*. 2023. vol. 192. pp. 172–180. (in Russian)
- 26 Fixed assets in the Murmansk region: statistical collection. Murmansk: Murmanskstat, 2025. 52 p. (in Russian)
- 27 Industrial production in Russia – 2025: statistical collection. Moscow: Rosstat, 2025. 347 p. (in Russian)
- 28 Ridiger A.V. The Arctic as a source of aquatic biological resources. *Arctic 2035: current issues, problems, solutions*. 2022. no. 4 (8). pp. 65–75. (in Russian)
- 29 Balashov V.V., Volvenko I.V., Zilanov V.K. et al. On the consumption of fish products by the population of Russia. *Fisheries*. 2025. no. 6. pp. 65–74. (in Russian)
- 30 World Nutrition Forum 2024, Biomin, Austria: forum materials. Available at: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/9_15/09_2015_028-030.pdf (accessed September 2, 2024).
- 31 Mukhametzyanov R. et al. The objective need and trend of ensuring the food security in Russia in conditions of import substitution. *BIO Web of Conferences*. 2021. vol. 37. p. 00079. doi: 10.1051/bioconf/20213700079
- 32 Annotated catalogue of cyclostomes and fishes of the continental waters of Russia. Ed. by Yu.S. Reshetnikov. Moscow: Nauka, 1998. 218 p. (in Russian)
- 33 Ananjeva N.B., Orlov N.L., Khalikov R.G., Darevsky I.S., Ryabov S.A., Barabanov A.V. Atlas of reptiles of Northern Eurasia (taxonomic diversity, geographical distribution and conservation status). St. Petersburg: Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, 2004. 232 p. (in Russian)
- 34 Zadeleonev V.A., Derbineva E.V. Inconnu *Stenodus leucichthys nelma* (Pallas, 1773) (Salmoniformes, Coregonidae) of the Yenisei River: population structure, fishing, reproduction. *Fisheries Issues*. 2020. vol. 21. no. 2. pp. 156–168. (in Russian)
- 35 Gao T., Erokhin V. Capturing a complexity of nutritional, environmental, and economic impacts on selected health parameters in the Russian High North. *Sustainability*. 2020. vol. 12. no. 5. p. 2151. doi: 10.3390/su12052151
- 36 Atlas of freshwater fishes of Russia: in 2 vols. Vol. 1. Ed. by Yu.S. Reshetnikov. Moscow: Nauka, 2003. 379 p. (in Russian)
- 37 Atlas of freshwater fishes of Russia: in 2 vols. Vol. 2. Ed. by Yu.S. Reshetnikov. Moscow: Nauka, 2003. 253 p. (in Russian)
- 38 Baranov A.A. Birds of the Altai-Sayan ecoregion: spatio-temporal dynamics of diversity: monograph. Vol. 1. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev, 2012. 64 p. (in Russian)
- 39 Baranov A.A., Bliznetsov A.S. Petrophilic birds of the southern part of Central Siberia. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev, 2014. 200 p. (in Russian)
- 40 Baranov A.A., Melnik O.N. Gull birds Laridae of continental water bodies of the southern part of Central Siberia. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev, 2014. 175 p. (in Russian)
- 41 Tolkachev S., Teplyakov A. Import substitution in Russia: the need for a system-strategic approach. *Russian Social Science Review*. 2022. vol. 63. no. 1-3. pp. 15–40.
- 42 Rybkina I.D., Kurepina N.Yu., Plutalova T.G. Prospects for water use in the closed basin area of the Ob-Irtysh basin of the Altai Territory. Land degradation and desertification: problems of sustainable nature management and adaptation: collection of articles. Barnaul, 2020. pp. 127–131. doi: 10.29003/m1692.978-5-317-06490-7/127-131 (in Russian)
- 43 Vyshegorodtsev A.A. Fishes of the Yenisei: guide. Novosibirsk: Nauka, 2000. 188 p. (in Russian)
- 44 Vyshegorodtsev A.A., Zadeleonev V.A. Commercial fishes of the Yenisei: monograph. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013. 303 p. (in Russian)
- 45 Gadinov A.N. Dynamics of fish catches in the Yenisei River from the dam of the Krasnoyarsk HPP to the mouth of the Angara River. Problems and prospects of the use of aquatic biological resources of Siberia in the XXI century: materials of the All-Russian conference with international participation (Krasnoyarsk, December 8–12, 2008). Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publishing House, 2009. pp. 155–159. (in Russian)
- 46 Gorodilova S.N. Ecological and faunistic analysis of amphibians (Amphibia) of the forest-steppe of Central Siberia: dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences. Krasnoyarsk, 2010. 191 p. (in Russian)
- 47 Gryaznova A.N. Comparative ecology of the bank swallow and the pale martin in the south of Central Siberia: abstract of dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences. Krasnoyarsk, 2019. 177 p. (in Russian)
- 48 Dgebuadze Yu.Yu. Problems of invasions of alien organisms. Ecological security and invasions of alien organisms: materials of the Round Table of the All-Russian Conference on Environmental Security of Russia (Moscow, June 4–5, 2002). Moscow: Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, 2002. pp. 11–14. (in Russian)
- 49 Truba A.S., Truba M.A., Akimov E.B. Trends in the transformation of the freshwater aquaculture industry in Russia: economic aspect. *Fisheries Issues*. 2025. vol. 26. no. 2. pp. 177–190. (in Russian)
- 50 Krasnoshtanova N. Sustainable Development of Resource Regions: Challenges for Remote Areas of Siberia. *International Conference on Resources, Environment and Regional Sustainable Development in Northeast Asia: Proceedings*. Cham: Springer, 2023. pp. 311–325. doi: 10.3390/su15129293
- 51 Stroganov A.N., Bulatov O.A., Ponomareva E.V. et al. The role of macroevolutionary processes in the formation of the taxonomic structure of anadromous salmonids. *Fisheries Issues*. 2025. vol. 26. no. 3. pp. 27–50. (in Russian)
- 52 Baldin D.P. Content of mineral substances in fish. *Advances of youth science in the agro-industrial complex*. 2022. pp. 16–24. (in Russian)
- 53 Antipova L.V., Popov E.S. Rational use of pond fish in polyculture farming as a vector for the development of production of high-quality fish products. *New Technologies*. 2023. vol. 19. no. 3. pp. 14–26. (in Russian)
- 54 Tutelyan V.A., Nikityuk D.B., Tarmaeva I.Yu. Formation of the All-Russian Education System in the field of healthy food of the population. *Hygiene and Sanitation*. 2023. vol. 102. no. 10. pp. 1012–1018. (in Russian)

55 Granato D., Barba F.J., Bursac Kovačević D. et al. Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. Annual Review of Food Science and Technology. 2020. vol. 11. no. 1. pp. 93–118.

56 Astashova A., Khomutova E. Problems and Prospects of Aquaculture Development in the Russian Federation. International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry "Interagromash". Cham: Springer International Publishing, 2022. pp. 518–525. doi: 10.1007/978-3-031-21219-2_57

57 Kulikov I.M., Minakov I.A. Food security: problems and prospects in Russia. Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development. 2019. vol. 19. no. 4. pp. 142–148.

Сведения об авторах

Ассумани Идди аспирант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, assumaniiddy2023@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-2046-4896>

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, antipova154@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1416-0297>

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@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5778-6150>

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

Assumani Iddy graduate student, animal products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, assumaniiddy2023@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-2046-4896>

Lyudmila V. Antipova Dr. Sci. (Engin.), professor, animal products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, antipova154@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1416-0297>

Alla Ye. Kutsova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, animal products technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alla-toporkova@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5778-6150>

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 27/10/2025	После редакции 17/11/2025	Принята в печать 08/12/2025
Received 27/10/2025	Accepted in revised 17/11/2025	Accepted 08/12/2025

Использование искусственного интеллекта в бережливом производстве для пивоваренной отрасли

Даниил Р. Кулигин	¹	kuligin470@gmail.com	 0009-0007-3133-4467
Екатерина А. Саввина	¹	katenok2207@ya.ru	 0000-0002-0728-8313
Владислав М. Васечкин	¹	vasechkinvm@gmail.com	 0009-0003-0700-7344
Леонид С. Чесников	¹	leonid.chesnikov@ya.ru	 0009-0002-6124-5426
Екатерина Ю. Желтоухова	¹	katsturova@gmail.com	 0000-0002-7463-9013

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

Аннотация. Рассматриваются возможности применения искусственного интеллекта в системе бережливого производства пивоваренной отрасли с целью сокращения потерь, повышения стабильности качества и роста производительности. Цель работы заключается в определении круга технологических и управленческих задач, решаемых с использованием искусственного интеллекта в рамках концепции бережливого производства. Проанализированы этапы пивоваренного процесса, наиболее чувствительные к отклонениям параметров, включая обработку сырья, брожение, фильтрацию и упаковку. Показано, что ключевое значение имеет этап брожения, для которого интеллектуальные системы обеспечивают непрерывный контроль температуры, кислотности и концентрации сахаров. Установлено, что внедрение алгоритмов машинного обучения позволяет оптимизировать режимы брожения и сократить его продолжительность с 21 до 7 дней без ухудшения показателей качества. Приведена классификация методов машинного обучения и обосновано их применение для прогнозирования окончания брожения, раннего выявления аномалий работы оборудования и автоматизированного контроля качества продукции. Рассмотрена интеграция интеллектуальных решений в иерархию производственных информационных систем уровня планирования ресурсов предприятия, управления производственными операциями и диспетчерского контроля. Показано, что совместное использование инструментов бережливого производства и искусственного интеллекта обеспечивает синергетический эффект за счет снижения потерь сырья, уменьшения простоев и сокращения доли брака. Сделан вывод о целесообразности внедрения искусственного интеллекта на пивоваренных предприятиях различного масштаба в качестве инструмента непрерывного совершенствования и повышения конкурентоспособности.

Ключевые слова: искусственный интеллект; бережливое производство; пивоварение; брожение; качество.

The use of artificial intelligence in lean manufacturing for the brewing industry

Daniil R. Kuligin	¹	kuligin470@gmail.com	 0009-0007-3133-4467
Ekaterina A. Savvina	¹	katenok2207@ya.ru	 0000-0002-0728-8313
Vladislav M. Vasechkin	¹	vasechkinvm@gmail.com	 0009-0003-0700-7344
Leonid S. Chesnikov	¹	leonid.chesnikov@ya.ru	 0009-0002-6124-5426
Ekaterina Y. Zheltoukhova	¹	katsturova@gmail.com	 0000-0002-7463-9013

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

Abstract. The paper examines the application of artificial intelligence within lean manufacturing systems in the brewing industry aimed at loss reduction, quality stabilization, and productivity growth. The objective of the study is to identify technological and managerial tasks that can be effectively solved using artificial intelligence under lean manufacturing principles. Key stages of the brewing process sensitive to parameter deviations are analyzed, including raw material processing, fermentation, filtration, and packaging. Fermentation is identified as the most critical stage, where intelligent systems provide continuous monitoring of temperature, acidity, and sugar concentration. The study demonstrates that the use of machine learning algorithms enables optimization of fermentation regimes and reduction of fermentation time from 21 to 7 days without compromising product quality. A classification of machine learning methods is presented, and their application is justified for predicting fermentation completion, early detection of equipment anomalies, and automated quality control. Integration of artificial intelligence into production information systems covering enterprise resource planning, manufacturing execution, and supervisory control levels is considered. It is shown that combining lean manufacturing tools with artificial intelligence produces a synergistic effect by reducing raw material losses, minimizing downtime, and lowering defect rates. The study concludes that artificial intelligence is a practical tool for continuous improvement and increased competitiveness of brewing enterprises regardless of their production scale.

Keywords: artificial intelligence; lean manufacturing; brewing; fermentation; quality.

Для цитирования

Кулигин Д.Р., Саввина Е.А., Васечкин В.М., Чесников Л.С., Желтоухова Е.Ю. Использование искусственного интеллекта в бережливом производстве для пивоваренной отрасли // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 112–117. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-112-117

For citation

Kuligin D.R., Savvina E.A., Vasechkin V.M., Chesnikov L.S., Zheltoukhova E.Y. The use of artificial intelligence in lean manufacturing for the brewing industry. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 112–117. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-112-117

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

Введение

Бережливое производство – это система, основанная на принципах и методах, обеспечивающих повышение производительности при минимизации различных видов потерь [4]. В пивоваренной отрасли применение бережливых технологий затрагивает все этапы производства – от затиарания и брожения до упаковки и логистики. Использование ИИ в этом контексте позволяет значительно расширить набор инструментов для непрерывных улучшений [5]. Как описывается в ряде статей, внедрение ИИ дает возможность управлять ферментацией в реальном времени (контролируя температуру, уровень сахара, pH и другие параметры), что способствует предотвращению дефектов и обеспечению стабильного качества пива [2, 6]. Современные цифровые решения позволяют также предсказывать окончание брожения и другие ключевые моменты процесса. В совокупности это приводит к снижению затрат и минимизации отходов [3]. Исходя из этого, задача статьи – определить, какие именно управленческие и технологические задачи пивоваренного производства может решать ИИ в рамках принципов бережливого производства

Материалы и методы

Для достижения поставленных целей использовались аналитические и эмпирические методы. В основе исследования лежит анализ данных о производстве пива с применением технологий ИИ, изучение зарубежного опыта. Исследование базируется на информации, полученной из отраслевых отчетов, научных публикаций и практических кейсов.

Настоящая работа предлагает комплексное видение роли ИИ в бережливом производстве пивоваренной отрасли, раскрывая его преимущества для оптимизации процессов, улучшения качества продукции и укрепления позиций на рынке.

Результаты

Применительно к пивоваренному производству ИИ рассматривается как дополнительный инструмент бережливых технологий, усиливающий их эффект. Анализ показывает, что интеграция ИИ позволяет компаниям получать выгоду, аналогичную той, что наблюдается в других отраслях (сокращение времени формирования запасов, ускорение доставки материалов, рост производительности и т. д.) [1]. Для пивоварен это означает оптимизацию планирования рецептур, прогнозирование спроса и своевременную поставку ингредиентов. В основе решения этих задач лежит обработка больших объемов данных: в современных условиях широко используются Big Data, глубокое обучение и методы машинного обучения (Business Intelligence [1].

Машинное обучение (МО) представляет собой анализ данных с помощью алгоритмов, которые обучаются на основе накопленных наблюдений [7]. В процессе работы модели адаптируются к новым данным, обеспечивая точность и согласованность предсказаний [8]. Рассмотрим основные типы МО и их применение к пивоваренному производству:

– Контролируемое обучение. Основано на размеченных наборах данных. Подходит для задач классификации и прогнозирования (например, автоматическая оценка качества сваренного пива или прогноз выхода партии). Алгоритмы присваивают метки объектам данных, что позволяет обучаться на исторических примерах [9]. В пивоварении такой подход может использоваться для автоматизации контроля качества продукции (определение цвета, плотности, содержания алкоголя и др.) по образцам или сенсорным данным [10].

– Неконтролируемое обучение. Не требует заранее размеченных данных. Алгоритмы выявляют скрытые закономерности и кластеры в данных. Этот подход эффективен для мониторинга работы оборудования (ферментеров, охлаждающих систем и т. п.) и раннего обнаружения аномалий (например, необычные колебания температуры или давления). Он применяется для кластеризации данных и выявления скрытых зависимостей, что позволяет прогнозировать возможные отказы оборудования до их появления [11].

– Полуконтролируемое обучение. Сочетает элементы контролируемого и неконтролируемого обучения. Имеются метки для части данных, а остальные данные алгоритм анализирует самостоятельно. Такой подход может быть полезен для оптимизации серийного или мелкосерийного производства пива с целью снижения брака и отходов. Например, даже ограниченное число отобранных по качеству образцов может направлять алгоритм к более точной оценке качества остальных партий сусле или пива [12].

– Обучение с подкреплением. Алгоритм находит оптимальное действие путём проб и ошибок, оценивая полезность каждого шага. Пивоварни могут применять его для оценки различных вариантов улучшения технологических процессов (например, режимов нагрева затиарания или сроков брожения), выбирая те стратегии, которые максимизируют выход качественного продукта [13].

На современном предприятии все задачи управления должны решаться с опорой на мощные информационные системы и решения ИИ. Эталонная иерархия таких систем включает уровни ERP, MES и SCADA.

На стратегическом уровне ERP (Enterprise Resource Planning) формирует главную задачу предприятия и разбивает её на множество частных производственных задач, передаваемых на уровень MES (Manufacturing Execution System). На уровне MES сосредоточены алгоритмы решения этих задач: формируются инструкции, контролируется выполнение, а информация о статусе возвращается на уровень ERP. Это позволяет оперативно корректировать стратегические цели и планировать производство. На нижнем уровне SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition) обеспечивают сбор и отображение данных с датчиков оборудования и выполняют команды MES по управлению производственным процессом. Таким образом, формируется замкнутый цикл управления: ERP ↔ MES ↔ SCADA.

Инструменты бережливого производства, такие как 5S, TPM, JIT (точно вовремя), картирование потока создания ценности, «система вытягивания» (пул) и «пока-ёк» (устранение ошибок), также находят применение в пивоварении. ИИ интегрируется с этими инструментами. Например, в малых пивоварнях календарное планирование выпуска продукции (смешанный запуск различных сортов на одной линии) приобретает особую важность. ИИ может помочь составлять планы варок таким образом, чтобы минимизировать ожидание заказов и увеличить скорость выполнения разных рецептов. Аналогично, в режиме Just-In-Time системы ИИ обеспечивают изготовление партий пива точно к сроку отгрузки, без накопления лишних запасов и простоев.

ИИ эффективно решает задачи сокращения ошибок персонала и уменьшения времени простоев при переналадках оборудования. Технологии компьютерного зрения на базе ИИ позволяют отслеживать перемещения сотрудников и оборудования на производстве, что способствует повышению эффективности использования рабочей силы и повышению безопасности труда [14]. Не менее важны приложения ИИ для контроля качества пива и диагностики состояния оборудования: системы машинного обучения выявляют отклонения рецептуры и оценивают параметры продукта, предотвращая появление брака.

Рисунок 1 демонстрирует сравнительную эффективность традиционных методов и подходов с использованием ИИ на ключевых этапах пивоварения.

- Анализ сырья: системы ИИ позволяют быстрее и точнее анализировать состав и качество сырья, устраняя человеческий фактор.

- Ферментация: традиционные методы контролируют параметры вручную, тогда как ИИ обеспечивает прогнозирование и автоматизацию в реальном времени.

- Фильтрация: с помощью предиктивных моделей ИИ снижаются потери продукта, в отличие от фиксированных настроек оборудования.

- Упаковка: ИИ учитывает экологические и экономические факторы, оптимизируя выбор материалов и процессы упаковки.

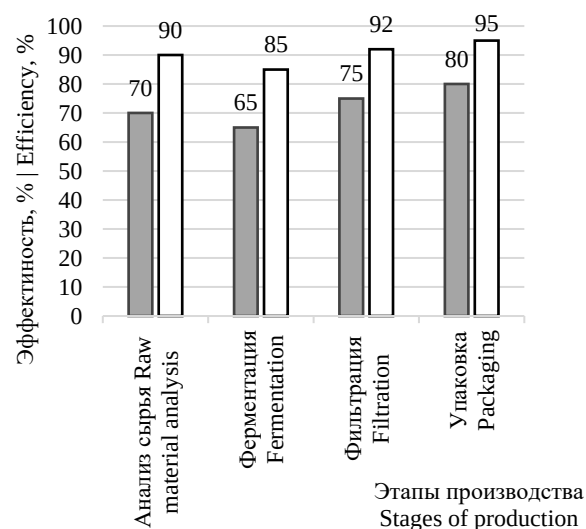


Рисунок 1. Соотношение эффективности традиционных методов и ИИ на разных этапах производства
Figure 1. Correlation of efficiency of traditional methods and AI at different stages of production.

Для глубокого понимания производственных процессов промышленный ИИ «контекстуализирует» данные: он объединяет информацию о текущих технологических параметрах с бизнес-данными (планами, историческими показателями, маркетинговыми прогнозами) и на её основе строит математическую модель процесса [15]. При этом алгоритмы машинного обучения очищают данные от шумов и ложных срабатываний, позволяя точно выявлять целевые показатели для производственных команд [16–18]. Машинное обучение обеспечивает прогнозную аналитику: инженеры-технологи получают заранее предсказания о возможных сбоях или отклонениях (например, о подъёме температуры или увеличении мутности), чтобы своевременно скорректировать процесс и избежать потерь [19].

Наиболее актуальным для контроля будет процесс сбраживания пивного сусла.

Брожение – один из самых ответственных этапов пивоварения. Использование информационных систем и ИИ позволяет оптимизировать процесс брожения, контролируя условия для дрожжей [11].

ИИ-системы могут регулировать температуру брожения, концентрацию сахаров и другие параметры таким образом, чтобы обеспечить оптимальную активность микроорганизмов и ускорить процесс брожения с 21 дня до 7 дней. Тем самым увеличивая выпуск продукции высокого качества (Рисунок 4).

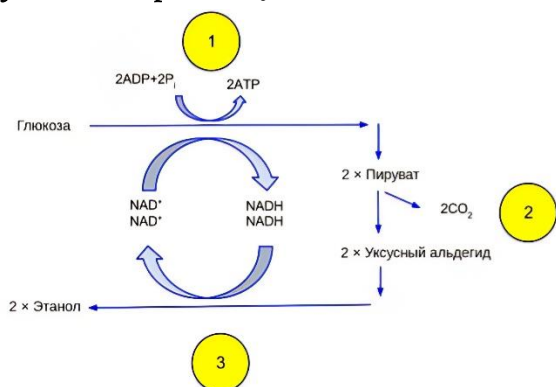


Рисунок 2. Процесс спиртового брожения

Figure 2. Alcoholic fermentation process

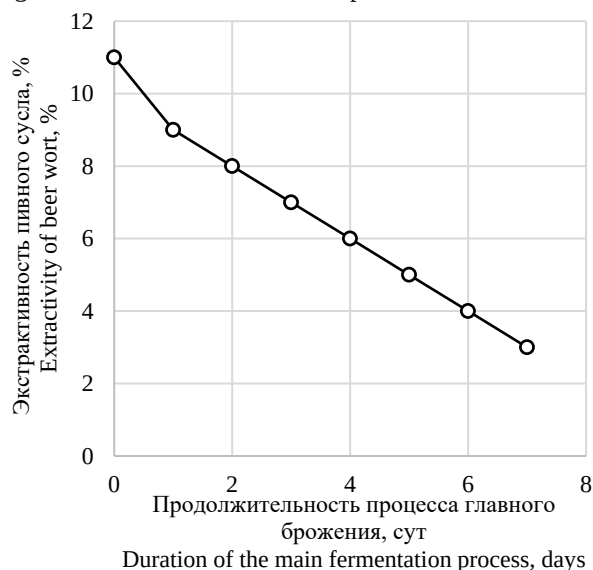


Рисунок 3. Динамика изменения параметров процесса главного брожения

Figure 3. Dynamics of changes in the parameters of the main fermentation process.



Рисунок 4. Динамика изменения параметров процесса главного брожения при использовании ИИ-систем

Figure 4. Dynamics of changes in the parameters of the main fermentation process when using AI systems

Кроме того, алгоритмы ИИ анализируют качество сырья (солода, хмеля, воды), выявляя отклонения от стандартов и возможные примеси. Это повышает качество исходных материалов и минимизирует риски на последующих этапах производства. Предиктивные модели на базе МО обеспечивают точное прогнозирование окончания процесса брожения и позволяют заранее определить критические точки технологической цепочки. Таким образом, интеграция ИИ в информационные системы пивоварен способствует сокращению общего времени производства пива и снижению потерь за счёт более эффективного управления температурными режимами и составом сусла.

В результате предприятия, использующие промышленные ИИ как неотъемлемую часть своих бережливых методик, получают возможность непрерывно совершенствовать производственные процессы и минимизировать отходы [20]. Анализ данных и предиктивное моделирование позволяют инженерам-технологам тестировать различные параметры пивоварения (режимы затирания, дозировки ингредиентов и т. д.) до достижения оптимальных настроек, что прямо влияет на сокращение брака и повышение выхода годного продукта.

Заключение

Центральное место в философии бережливого производства занимает идея непрерывного совершенствования. Готовность к изменениям на пивоваренном предприятии должна поддерживаться постоянно, чтобы при появлении возможностей для улучшения можно было незамедлительно внедрить соответствующие меры. Применение ИИ позволяет своевременно выявлять потенциальные улучшения и автоматически предлагать пути их реализации. При выявлении проблемы производство обычно приостанавливается, члены команды проводят анализ «остановка-запуск», что нарушает принцип непрерывности. Инструменты ИИ дают возможность сократить количество таких остановок или вовсе избежать их.

В текущий момент приложения машинного обучения и ИИ могут эффективно применяться на предприятиях пивоваренной отрасли любого масштаба независимо от используемых технологий. Интеграция ИИ в процессы бережливого производства обеспечивает синергетический эффект: повышается производительность труда, улучшается качество продукции и экономическая эффективность за счёт автоматизации, оптимизации ресурсов и минимизации потерь. Таким образом, сочетание бережливых подходов с возможностями ИИ способствует значительному росту эффективности и конкурентоспособности пивоваренного производства.

Литература

- 1 Анисимов А.Ю., Алексахин А.Н., Алексахина С.А., Алёхин Е.И. Искусственный интеллект в современном обществе: текущее состояние и оценка перспектив развития // CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-sovremennom-obschestve-tekushee-sostoyanie-i-otsenka-perspektiv-razvitiya> (дата обращения: 08.12.2024).
- 2 Васильев А.И. Искусственный интеллект в управлении качеством пива // Пивоварение и безалкогольная промышленность. 2021. № 1. С. 22–28.
- 3 Дементьев К.И. Анализ мирового опыта применения искусственного интеллекта для оптимизации бизнес-процессов предприятий // CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-mirovogo-opyta-primeneniya-iskusstvennogo-intellekta-dlya-optimizatsii-biznes-protsessov-predpriyatiy> (дата обращения: 08.12.2024).
- 4 Дрогин А.В. Искусственный интеллект в пивоварении. URL: <https://drogin.ru/iskusstvennyj-intellekt-v-pivovarenii/> (дата обращения: 08.12.2024).
- 5 Ибрагимова Н.А., Ибрагимов З.З. Эффективное использование искусственного интеллекта в производстве // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2019. С. 639–642.
- 6 Мальцева И.Ф., Шульгина Ю.В. Использование систем искусственного интеллекта в управленческих и производственных процессах // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. С. 220–228.
- 7 Михеев П.Н. Технологии искусственного интеллекта в пищевой промышленности // Инновации и инвестиции. 2023. С. 536–539.
- 8 Монахов Р.Р., Батищев А.В. Применение искусственного интеллекта в собственном бизнесе в сфере информационных технологий // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. С. 514–520.
- 9 Применение технологий искусственного интеллекта в инновационной деятельности промышленных предприятий / Пасечник Д. [и др.] // European Scientific Journal. URL: <https://esj.today/PDF/101ECVN623.pdf> (дата обращения: 10.12.2024).
- 10 Русов А.В. Современные тенденции и использование искусственного интеллекта и машинного обучения в бизнесе и научных исследованиях // Научный журнал. 2023. С. 172–177.
- 11 Скрипников А.В., Фролова Л.Н., Саввина Е.А., Кулигин Д.Р., Васечкин В.М. Цифровизация с использованием AI, как фактор повышения качества и эффективности при производстве спирта // Сборник научных статей и докладов XI Международной научно-практической конференции. 2024. С. 594–600.
- 12 Смирнов С.И. Интеллектуальные системы в пивоварении: от анализа данных до управления производством // Технологии пищевой промышленности. 2021. № 3. С. 12–18.
- 13 Тимчук Е.Г. Применение искусственного интеллекта в пищевой промышленности // Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. Т. 61. № 3. С. 21–42.
- 14 Тимчук Е.Г. Важность искусственного интеллекта и робототехники в пищевой промышленности и производстве напитков // Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. Т. 61. № 4. С. 24–44.
- 15 Хацкелевич А.Н., Рудаков С.А., Егоров Г.А. Применение технологий искусственного интеллекта как один из факторов конкурентоспособности бизнеса в четвёртой промышленной революции // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. 2024. № 1. С. 184–199.
- 16 Anderson T., White R. Machine Learning Applications in Brewing: A Case Study // Journal of Artificial Intelligence in Food Science. 2023. Vol. 7. P. 45–60.
- 17 Beer Organoleptic Optimisation: Utilising Swarm Intelligence and Evolutionary Computation Methods / al-Rifaie M.M., Cavazza M. // arXiv preprint. 2020. arXiv:2004.03438. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.03438> (дата обращения: 11.12.2024).
- 18 Johnson R., Smith K. Artificial Intelligence in Brewing: A Comprehensive Review // Journal of Food Engineering. 2020. Vol. 45. P. 123–135.
- 19 Brown L., Taylor M. AI-Driven Quality Control in Beer Production // International Journal of Brewing Science. 2021. Vol. 12. P. 89–102.
- 20 Lee H., Park J. Application of Neural Networks for Flavor Profiling in Craft Beer // Food Research International. 2022. Vol. 56. P. 210–225.

References

- 1 Anisimov A.Yu., Aleksakhin A.N., Aleksakhina S.A., Alyokhin E.I. Artificial intelligence in modern society: current state and assessment of development prospects. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-sovremennom-obschestve-tekushee-sostoyanie-i-otsenka-perspektiv-razvitiya> (date of access: 08.12.2024). (in Russian)
- 2 Vasilyev A.I. Artificial intelligence in beer quality management. Brewing and Non-Alcoholic Industry. 2021. no. 1. pp. 22–28. (in Russian)
- 3 Dementiev K.I. Analysis of world experience in the application of artificial intelligence for optimizing business processes of enterprises. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-mirovogo-opyta-primeneniya-iskusstvennogo-intellekta-dlya-optimizatsii-biznes-protsessov-predpriyatiy> (date of access: 08.12.2024). (in Russian)
- 4 Drogyn A.V. Artificial intelligence in brewing. Available at: <https://drogin.ru/iskusstvennyj-intellekt-v-pivovarenii/> (date of access: 08.12.2024). (in Russian)
- 5 Ibragimova N.A., Ibragimov Z.Z. Effective use of artificial intelligence in production. Scientific Bulletin: Finance, Banks, Investments. 2019. pp. 639–642. (in Russian)
- 6 Maltseva I.F., Shulgina Yu.V. Use of artificial intelligence systems in management and production processes. Natural and Human Studies. 2024. pp. 220–228. (in Russian)
- 7 Mikheev P.N. Artificial intelligence technologies in the food industry. Innovations and Investments. 2023. pp. 536–539. (in Russian)
- 8 Monakhov R.R., Batishchev A.V. Application of artificial intelligence in one's own business in the field of information technology. Natural and Human Studies. 2024. pp. 514–520. (in Russian)

- 9 Application of artificial intelligence technologies in innovative activities of industrial enterprises / Pasechnik D. et al. European Scientific Journal. Available at: <https://esj.today/PDF/101ECVN623.pdf> (date of access: 10.12.2024). (in Russian)
- 10 Rusov A.V. Modern trends and use of artificial intelligence and machine learning in business and scientific research. Scientific Journal. 2023. pp. 172–177. (in Russian)
- 11 Skripnikov A.V., Frolova L.N., Savvina E.A., Kuligin D.R., Vasechkin V.M. Digitalization using AI as a factor in improving quality and efficiency in alcohol production. Collection of scientific articles and reports of the XI International Scientific and Practical Conference. 2024. pp. 594–600. (in Russian)
- 12 Smirnov S.I. Intelligent systems in brewing: from data analysis to production management. Food Industry Technologies. 2021. no. 3. pp. 12–18. (in Russian)
- 13 Timchuk E.G. Application of artificial intelligence in the food industry. Scientific Works of Dalrybvtuza. 2022. vol. 61. no. 3. pp. 21–42. (in Russian)
- 14 Timchuk E.G. The importance of artificial intelligence and robotics in the food and beverage industry. Scientific Works of Dalrybvtuza. 2022. vol. 61. no. 4. pp. 24–44. (in Russian)
- 15 Khatskelevich A.N., Rudakov S.A., Egorov G.A. Application of artificial intelligence technologies as one of the factors of business competitiveness in the fourth industrial revolution. Bulletin of PNRPU. Socio-economic sciences. 2024. no. 1. pp. 184–199. (in Russian)
- 16 Anderson T., White R. Machine Learning Applications in Brewing: A Case Study. Journal of Artificial Intelligence in Food Science. 2023. vol. 7. pp. 45–60.
- 17 Beer Organoleptic Optimisation: Utilising Swarm Intelligence and Evolutionary Computation Methods / al-Rifaie M.M., Cavazza M. arXiv preprint. 2020. arXiv:2004.03438. Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.03438> (date of access: 11.12.2024).
- 18 Johnson R., Smith K. Artificial Intelligence in Brewing: A Comprehensive Review. Journal of Food Engineering. 2020. vol. 45. pp. 123–135.
- 19 Brown L., Taylor M. AI-Driven Quality Control in Beer Production. International Journal of Brewing Science. 2021. vol. 12. pp. 89–102.
- 20 Lee H., Park J. Application of Neural Networks for Flavor Profiling in Craft Beer. Food Research International. 2022. vol. 56. pp. 210–225.

Сведения об авторах

Даниил Р. Кулигин студент, кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kuligin470@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-3133-4467>

Екатерина А. Саввина к.т.н., доцент, кафедра корпоративных информационных систем и программирования, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, katennok2207@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0728-8313>

Владислав М. Васечкин студент, кафедра корпоративных информационных систем и программирования, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vasechkinvm@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-0700-7344>

Леонид С. Чесников студент, кафедра информационных технологий, моделирования и управления, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, leonid.chesnikov@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-6124-5426>

Екатерина Ю. Желтоухова к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, katsturova@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7463-9013>

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

Daniil R. Kuligin student, fermentation and sugar production technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuligin470@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-3133-4467>

Ekaterrina A. Savvina Cand. Sci. (Engin), associate professor, corporate information systems and programming department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, katennok2207@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0728-8313>

Vladislav M. Vasechkin student, corporate information systems and programming department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, vasechkinvm@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-0700-7344>

Leonid S. Chesnikov student, information technology, modeling and management department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, leonid.chesnikov@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-6124-5426>

Ekaterrina Y. Zheltoukhova Cand. Sci. (Engin), associate professor, food processing machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, katsturova@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7463-9013>

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 10/11/2025	После редакции 26/11/2025	Принята в печать 10/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 26/11/2025	Accepted 10/12/2025

Использование комбинированной закваски из микроорганизмов *Aspergillus oryzae* и *Saccharomyces cerevisiae* для получения соевого соуса методом естественного брожения

Максим М. Чернов ¹	maxim2015.chernov@ya.ru	 0009-0009-5139-8665
Петр Е. Баланов ¹	balanov@itmo.ru	 0000-0002-0610-9248
Ирина В. Смотраева ¹	smotraeva@itmo.ru	 0000-0003-1255-832X

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО, ул. Ломоносова д.9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия

Аннотация. Актуальность получения соевого соуса определяется особым интересом к продуктам из сои, способным заменить белок животного происхождения. Для получения соуса методом брожения традиционно применяются грибы *Aspergillus oryzae*. Исследования последних лет показали, что использование комбинаций микроорганизмов позволяет сократить сроки ферментации и повысить пищевую ценность продукта. Цель работы – разработка рецептуры соуса соевого с использованием комбинированной закваски из грибов *Aspergillus oryzae* и дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Объектом изучения стали образцы соевого соуса, приготовленные с использованием комбинированной закваски в разных количествах. В процессе ферментации проводились визуальные наблюдения и измерялось содержание растворимых сухих веществ рефрактометрическим методом и содержание этанола ареометром. Оптимальное количество закваски было определено путем изучения физико-химических параметров (показатель pH, массовая доля сухих веществ, титруемая кислотность и антиоксидантная активность) и органолептических (внешний вид, консистенция, вкус, аромат и общая оценка вкуса и аромата) полученных образцов. На основе научных источников предполагалось, что добавление дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* позволит сократить время ферментации. Наблюдения в процессе брожения подтвердили первоначальную гипотезу о сокращении периода ферментации при совместном использовании дрожжей и грибов. В данном исследовании он составил 30 дней. Показатель pH, титруемая кислотность, содержание сухих веществ соуса соответствуют ГОСТу Р 58434 Соусы соевые. Полученные образцы имеют высокую антиоксидантную активность 10,46 ммоль/л, что мы связываем с использованием дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Наилучшую оценку по органолептическим показателям получил образец, где количество закваски составило 3% от ферментируемого сырья (15 граммов). По результатам работы можно сделать вывод о перспективности совместного использования *Aspergillus oryzae* и *Saccharomyces cerevisiae* для приготовления соуса соевого.

Ключевые слова: соевый соус, метод естественного брожения, *Aspergillus oryzae*, *Saccharomyces cerevisiae*.

Using a combined starter of *Aspergillus oryzae* and *Saccharomyces cerevisiae* microorganisms to produce soy sauce by natural fermentation

Maxim M. Chernov ¹	maxim2015.chernov@ya.ru	 0009-0009-5139-8665
Petr E. Balanov ¹	balanov@itmo.ru	 0000-0002-0610-9248
Irina V. Smotraeva ¹	smotraeva@itmo.ru	 0000-0003-1255-832X

¹ National Research University ITMO, 9 Lomonosov Street, Saint Petersburg, 191002, Russia

Abstract. The development of soy sauce is actual by the growing interest in soy products, which can replace animal protein. *Aspergillus oryzae* are traditionally used to produce sauce by fermentation method. Recent research has approved that using combinations of microorganisms can reduce fermentation time and improve the nutritional value of the product. The aim of this study is to develop a soy sauce recipe using a combined starter of *Aspergillus oryzae* and *Saccharomyces cerevisiae*. The objects of the study are: soy sauce samples prepared using the different quantities of combined starter. During the fermentation there were carried out the following measurements: visual observations of the quantity of soluble solids by refractometry method and the ethanol content by a hydrometer. The optimal amount of starter was determined by studying the physicochemical parameters (pH, soluble solids content, titratable acidity, and antioxidant activity) and organoleptic properties (appearance, consistency, taste, aroma, and overall taste and aroma assessment) of the obtained samples. Based on scientific literature, it was suggested that the addition of *Saccharomyces cerevisiae* to start the fermentation process would possibly reduce the period of fermentation. Observations during fermentation confirmed the hypothesis. In this investigation the period of fermentation lasted 30 days. The pH, titratable acidity, and solids content of the sauce is related with GOST R 58434 "Soy Sauces." The obtained samples have high antioxidant activity of 10.46 mmol/L, which we explain by the use of *Saccharomyces cerevisiae*. The sample containing 3% of the total amount (15 grams) of starter has received the best organoleptic rating. The results highlighted the potential of the combined use of *Aspergillus oryzae* and *Saccharomyces cerevisiae* for making soy sauce.

Keywords: food biotechnology, soy sauce, natural fermentation method, *Aspergillus oryzae*, *Saccharomyces cerevisiae*.

Для цитирования

Чернов М.М., Баланов П.Е., Смотраева И.В. Использование комбинированной закваски из микроорганизмов *Aspergillus oryzae* и *Saccharomyces cerevisiae* для получения соевого соуса методом естественного брожения // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 118–124. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-118-124

For citation

Chernov M.M., Balanov P.E., Smotraeva I.V. Using a combined starter of *Aspergillus oryzae* and *Saccharomyces cerevisiae* microorganisms to produce soy sauce by natural fermentation. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 118–124. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-118-124

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

Введение

В настоящее время популярность соевого соуса растет в связи с особым интересом к продуктам из сои, способным заменить белок животного происхождения. Он является низкокалорийным продуктом, содержит целый комплекс витаминов, в том числе группы В и достаточное количество макро и микроэлементов, а также аминокислоты, в том числе те, которые организм не способен синтезировать самостоятельно, а может усвоить только с пищей [1]. Благодаря уникальному сочетанию вкусов соленого, сладкого и вкуса умами соевый соус заменяет соль, делая его особенно привлекательным для тех, кому ее употребление необходимо ограничить. По данным BusinesStat, производство и потребление соевого соуса в России растет на 1,0–3,3% в год. Увеличение производства соевого соуса с 2020 по 2024 год составило 5%. По прогнозам динамика роста производства соевого соуса составит 5,7% на ближайшие 10 лет. Ферментированные продукты в настоящее время переживают поистине второе рождение [2]. Для получения соевого соуса необходимо разложить белки, содержащиеся в сое, на аминокислоты. Поставленная задача может быть реализована двумя путями: естественное брожение и кислый гидролиз. Метод ферментации требует значительных временных затрат, однако, позволяет получить соевый соус более привлекательный по своим органолептическим свойствам и богатый аминокислотами за счет естественного разложения сои, чем продукт, полученный с помощью гидролиза с применением сильных минеральных кислот [3]. Для приготовления соуса смесь сои и пшеницы инокулируют плесневыми грибами рода *Aspergillus*, процесс брожения занимает от 6 месяцев до года. *Aspergillus oryzae* хорошо известны своими исключительными свойствами. Они вырабатывают ферменты, такие как β -гликозидаза, пектиназа и целлюлаза, способствующие гидролизу белков и амилолитические ферменты, которые расщепляют сложные углеводы до моносахаридов и олигосахаридов, что формирует вкус конечного продукта за счет выработки низкомолекулярных азотсодержащих соединений [4]. Использование других микроорганизмов, например высшего съедобного гриба-ксилотрофа вешенки, в качестве ферментирующего агента позволяет сократить процесс ферментации до 20–25 суток [5]. Исследования последних лет показали, что для производства соевого соуса более эффективно применять несколько видов микроорганизмов [6–8]. Использование комбинаций микроорганизмов

позволяет увеличить активность ферментов, расщепляющих белки и углеводы, что ведет к увеличению содержания флавоноидов и свободных аминокислот и позволяет снизить сроки ферментации [9, 10]. Использование дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* имеет свои преимущества. Плесневые грибы *Saccharomyces cerevisiae* устойчивы к снижению pH раствора и высокой концентрации соли. Их применение увеличивает антиоксидантную активность конечного продукта. А также приводит к увеличению вторичных аминокислот и летучих вкусовых веществ, что улучшает органолептические свойства продукта. Кроме того, из-за расщепления сахара, эти микроорганизмы снижают pH продукта, что подавляет рост нежелательных микроорганизмов [11]. Совместное использование *Aspergillus oryzae* и *Saccharomyces cerevisiae* является перспективным для повышения биологической ценности продукта вследствие взаимообогащения компонентного состава дрожжей и грибов [11]. Грибы *Aspergillus oryzae* расщепляют крахмал до моносахаридов и олигосахаридов, которые в свою очередь употребляются дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* с накоплением широкого спектра метаболитов, формирующих базовые свойства соуса: консистенцию, кислотность, аромат, вкус. Таким образом, для данного вида продукции *Saccharomyces cerevisiae* и *Aspergillus oryzae* находятся в симбиотической связи [12]. Органолептические показатели соуса соевого формируют вкусовые аминокислоты, летучие соединения, пептиды и сахара, состав и количество которых зависит от комбинаций молочнокислых бактерий и дрожжей, участвующих в процессе ферментации [6–8].

Цель работы – разработка рецептуры соуса соевого с использованием комбинированной закваски из грибов *Aspergillus oryzae* и дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*.

Материалы и методы

В качестве исходного сырья были использованы соевые бобы сорта «Грэй», производитель ФГВНУ ФНЦ ВНИИ Сои соответствующие показателям ГОСТ 17109–88. При выборе соевых бобов учитывалось количественное содержание в них белков, масел и углеводов. Содержание белков – 40,8%, содержание масел – 19,4%, содержание углеводов – 13,3%. В качестве пшеничного компонента использовали булгур (ГОСТ 276–2021), принимая во внимание способ обработки его цельных зерен, позволяющий сохранить большую часть питательных веществ

и витаминов пшеницы [13]. Возможность использования булгура была подтверждена экспериментально [14]. Соотношение сои и булгура в данном исследовании составило 4:1. Использование меньшего количества углеводов негативно влияет на качество процесса брожения и органолептические свойства конечного продукта, а увеличение процентного содержания углеводного компонента сильно замедляет процесс ферментации [15]. Использовалась соль поваренная пищевая мелкого помола по ГОСТ 51674. Для ферментации соевого соуса была применена комбинированная закваска. Анализ литературы позволил предположить, что необходимым и достаточным является соотношение дрожжей и бактерий, взятых в пропорции 1:1 [9, 11, 12, 16]. Были использованы сухие, стабилизированные дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* производителя Gloripan и стабилизированные сухие дрожжи *Aspergillus oryzae* (Китай) в количествах 3, 4 и 5% от общей массы ферментируемого продукта.

Исходное сырье подвергали входному контролю. Соевые бобы перебирали и сортировали по цвету и цельности. Целые желтые бобы отбирали, а зеленые и дробленые отсеивали из общей массы. Булгур отбирали по цвету и наличию шелухи: подходящая крупа должна быть золотисто-желтой без шелухи. После прохождения проверки сою и пропаренную пшеничную крупу булгур промывали по отдельности под струей теплой воды комнатной температуры для удаления загрязнений. Далее отобранные бобы замачивали на 10 ч в воде комнатной температуры в массовом соотношении 1:3, затем добавляли булгур и перемешивали. Сырье равномерно распределяли в металлическом стакане и нагревали на водяной бане до температуры 90 °С и выдерживали в течение 4 ч. Образцы дробили до пастообразного состояния в роторном измельчителе ARS HOME A-100, российского производства, производитель – ARS HOME и охлаждали до температуры 25 °С. Остывшую смесь разделяли на три равные части. В каждый из трех образцов добавляли соответственно 3, 4 и 5%, что составило 15, 20 и 25 г закваски из *Saccharomyces cerevisiae* и *Aspergillus oryzae* и 50 г. соли для предотвращения развития нежелательной микрофлоры. Смесь подвергалась ферментации в течение 30 дней. По окончании процесса добавляли воду, нагретую до температуры 25 °С и фильтровали с помощью бумажных фильтров для удаления осадка. Далее смесь нагревали в течение 120 минут для удаления микрофлоры, возникшей в период ферментации. Для улучшения органолептических свойств

в процессе нагревания добавляли 50 г. белого сахара, охлаждали до 25 °С и выдерживали в течение 2 суток.

В период ферментации проводились визуальные наблюдения и измерения содержания и растворимых сухих веществ рефрактометрическим методом. Полученные образцы исследовались по следующим показателям: показатель pH, содержание растворимых сухих веществ, титруемая кислотность, антиоксидантная активность. Все измерения проводились в трехкратной повторяемости.

Определение показателя pH было произведено в соответствии с ГОСТ 12688–2016. По точному значению величины pH можно предсказать возможные отклонения в органолептических свойствах продукта за счет присутствия посторонних веществ в белке [17]. Массовая доля сухих растворенных веществ определялась рефрактометрическим методом по ГОСТ 2173–2013. Определение титруемой кислотности производилось по ГОСТ 6687.4–860. Определение антиоксидантной активности проходило в соответствии с ГОСТ 54037–2010. После фильтрации в соусе не должно содержаться твердых включений, их отсутствие и прозрачность определяли визуально.

Органолептический анализ производился в соответствии с ГОСТ 6658–2016 дегустационной комиссией по пятибалльной шкале от 1 до 5 (1 – практически отсутствует, 2 – слабо выражен, 3 – средне выражен; 4 – сильно выражен; 5 – очень сильно выражен) по показателям: внешний вид, консистенция, вкус, аромат и общая оценка вкуса и аромата.

Результаты и обсуждение

Во время эксперимента проводились визуальные наблюдения. Изначально соевые бобы имеют желтую окраску. В процессе ферментации наблюдается постепенное потемнение. Полное потемнение идет не слишком быстро, однако видимое отличие образца по цвету от смеси сои с булгуром наблюдается уже в первые два дня ферментации. На второй день образцы приобретают более равномерную темно-желтую окраску, что показывает, что вся смесь подвергается ферментативным процессам. Запах кваса и хлеба проявляется уже после третьего дня выдержки при комнатной температуре. Значит, структура углеводов достаточно легко расщепляется под действием комбинации дрожжей и бактерий.

В процессе эксперимента с шагом в три дня измерялась массовая доля сухих веществ. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Физико-химические показатели соевого соуса
в процессе ферментации

Table 1.
Physico-chemical parameters of soy sauce during
the fermentation process

Длительность ферментации (в днях) Duration of fermentation (days)	Образец 1 (3% закваски) Sample 1 (3% of starter)	Образец 2 (4% закваски) Sample 2 (4% of starter)	Образец 3 (5% закваски) Sample 3 (5% of starter)
0	12,2	12,2	12,2
3	12	11,9	11,8
6	11,8	11,7	11,5
9	11,7	11,3	11,2
12	11,5	11	10,8
15	11,4	10,7	10,6
18	11,3	10,5	10,3
21	11,1	10,3	10,1
24	11	10,2	9,8
27	10,9	10	9,7
30	10,8	9,8	9,5

Анализ таблицы показал, что наиболее активно процесс ферментации во всех трех образцах проходил в первые две недели, третья неделя – замедление процесса. В Образце № 1 количество растворимых сухих веществ после ферментации составило 10,8%, что соответствует ГОСТ Р58434–2019 Соевые соусы, согласно которому их содержание должно быть не менее 10%, тогда как в двух других оно меньше необходимого. Также в процессе ферментации измеряли процентное содержание этанола. Динамика изменения содержания этанола в образце № 1 в процессе ферментации показана на рисунке 1.

Этанол – один из основных спиртов, вырабатываемых в процессе брожения путем преобразования сахаров. *Saccharomyces cerevisiae* превращает сахара в этанол в процессе ферментации [19]. Анализ диаграммы показал, что наиболее интенсивно этанол выделяется в первые три недели. На 7 сутки содержание этанола

составляет 0,2%, на 14 сутки – 0,5% возрастает на 21 сутки до 0,8% и практически не изменяется на 28 день и составляет 0,9%, что свидетельствует о замедлении процесса и позволяет предположить, что процесс ферментации практически завершен. Естественное уменьшение содержания этанола происходит на 31 сутки после нагрева и после выдержки в течение 2-х суток. Динамика изменения содержания этанола коррелируется с динамикой изменения содержания сухих веществ и позволяет предположить, что ферментация закончилась на четвертой неделе. Об этом же свидетельствовали и визуальные наблюдения: темно-коричневый цвет и достаточно выраженный хлебный аромат.

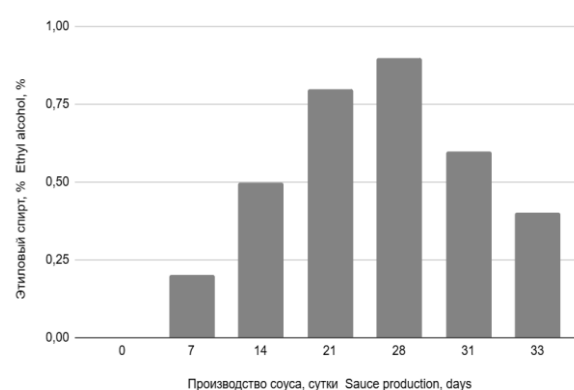


Рисунок 1. Динамика изменения содержания этанола в соевом соусе в процессе ферментации (образец № 1)

Figure 1. Dynamics of changes in ethanol content in soy sauce during fermentation (sample 1)

После высокотемпературной обработки при 75 °С в течение 2-х часов, фильтрации и отстаивания в течении 2-х суток при комнатной температуре, полученные образцы исследовали по физико-химическим показателям. Результаты представлены в таблице 2.

Физико-химические показатели соевого соуса

Physico-chemical parameters of soy sauce

Показатель Indicator	Значение показателей в зависимости от процентного содержания закваски Values of indicators depending on the quantity of sater		
	Образец 1 (3% закваски) Sample 1 (3% of starter)	Образец 2 (4% закваски) Sample 2 (4% of starter)	Образец 3 (5% закваски) Sample 3 (5% of starter)
pH	4,81	4,84	4,87
массовая доля растворимых сухих веществ, % the mass fraction of soluble solids, %	10,8	9,8	9,5
титруемая кислотность, см ³ 1N NaOH/100 см ³ titratable acidity, cm ³ 1N NaOH/100 cm ³	4,5	4,48	4,46
антиоксидантная активность, ммоль/л antioxidant activity, mmol/l	10,46	10,47	10,48

Таблица 2.

Table 2.

Все образцы имеют хороший показатель антиоксидантной активности 10,46–10,48 ммоль/л, что мы связываем с использованием дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* [12]. Показатель титруемой кислотности и значение pH соответствуют ГОСТ 58434–2019, устанавливающему основные характеристики для соусов соевых.

Массовая доля растворимых сухих чуть ниже нормы в образцах 2 и 3. В 1 образце она находится в пределах, заданных ГОСТом – 10,8%. Органолептический анализ проводился методом дегустации. Характеристика представлена в таблице 3.

Таблица 3.

Органолептические показатели соуса соевого

Table 3.

Organoleptic properties of soy sauce					
Показатели Indicators		Оценка Score			Комментарии Comments
		Образец № 1 Sample № 1 3% (15 г.)	Образец № 2 Sample № 2 4% (20 г.)	Образец № 3 Sample № 3 5% (25 г.)	
Внешний вид Form		4,5	4,5	4,5	Без включений No inclusions
Консистенция Consistency		4,5	4,5	4,5	Однородная homogeneous
Вкус Taste	умами umami	3,5	3,7	3,9	
	соленый salty	2,7	2,0	2,4	
	кислый acidic	1,0	2,0	2,4	
	сладкий sweet	1,5	2,0	2,2	
Аромат Flavor	хлебный bread	4,3	3,9	3,6	
Общая оценка вкуса и аромата Total assessment of taste and aroma		4,2	4,0	3,8	Соус приятный на вид и на вкус с ярко выраженным хлебным ароматом The sauce is pleasant to look at and taste with a distinct bread aroma

Образцы представляют собой однородную непрозрачную жидкость темно-коричневого цвета, без включений. Вкус не резкий, слабосоленый, с наиболее выраженным вкусом умами. Дегустационной комиссией был отмечен выраженный хлебный аромат, другие ароматы практически неуловимы и не образуют букет. Внешний вид был оценен на 4,5 балла. Образец № 1, в котором процентное соотношение закваски составило 3%, обладает наиболее привлекательными характеристиками: выраженным вкусом умами и хлебным ароматом. На основании анализа физико-химических и органолептических показателей был выбран Образец № 1. Рецепт соевого соуса представлена в таблице 4.

Таблица 4.

Рецептура соевого соуса

Table 4.

Recipe for soy sauce

Сырье Raw material	Масса сырья, г Weight of raw materials, g
соевые бобы soy beans	400
пшеничная крупа булгур bulgur wheat grain	100
комбинированная закваска combined starter	15
соль поваренная пищевая мелкого помола finely ground table salt	50
сахар белый, кусковой white lump sugar	50
вода питьевая drinking water	385

Закключение

Разработана рецептура соуса соевого с использованием комбинации из грибов *Aspergillus oryzae* и дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. На основании анализа трех образцов определено оптимальное количество закваски в соотношении 3% к общей массе ферментируемого сырья. Его органолептические свойства были оценены как 4,2 в пятибалльной системе, а физико-химические свойства соответствуют ГОСТ и имеет хороший показатель антиоксидантной активности – 10,46 ммоль/л. В процессе эксперимента подтверждена гипотеза о том, что добавление дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* позволяет сократить срок ферментации до 30 дней. Данное исследование подтверждает возможность использования комбинаций грибов *Aspergillus oryzae* и дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* для ферментации сои, но требует продолжения исследований с использованием разного процентного соотношения бактерий и грибов и комбинаций других микроорганизмов, таких как *Zygosaccharomyces rouxii*, *Wickerhamiella versatilis* совместно с *Aspergillus oryzae*. Следующим этапом работы должна стать разработка и применение методики культивирования дрожжей для дальнейшего их использования в производстве соевого соуса совместно с грибами *Aspergillus oryzae*.

Литература

- 1 Еремина А.В., Лопалева Н.Л. Анализ вкусовых, питательных и биологических свойств соевого соуса естественного брожения // Молодежь и наука. 2022. № 12. С. 1–6.
- 2 Шайхова Г.И., Тураев Ф.Ш. Современное состояние проблемы использования специализированных продуктов с обогащением сои // Новый день в медицине. 2022. № 10. С. 57–63.
- 3 Серб Е.М., Римарева Л.В., Таджибова П.Ю., Погорельская Н.С. и др. Особенности биоконверсии соевого сырья в ферментированных продуктах // Биотехнология: состояние и перспективы развития: сб. тр. М.: Изд-во Экспо-биохим-технологии, 2021. Т. 19. С. 320–322. doi: 10.37747/2312–640X-2021–19–320–322
- 4 Пат. № 2448526, RU, A23L1/238. Способ получения соевого соуса // Комолых В.О., Комолых О.М., Комолых Р.В.; Заявл. 07.08.2–10; Опубл. 27.04.2012. URL: <https://allpatents.ru/patent/2448526.html>
- 5 Liu Y., Chen H., Liu C., Li Q., Niu C. Prediction, biochemical characterization and application of key proteolytic enzymes from *Aspergillus oryzae* BL18 in soy sauce fermentation // Food Research International. 2025. V. 211. P. 116382. doi: 10.1016/j.foodres.2025.116382
- 6 Zhang X., Liu Z., Kang B., Huang Y., Fu C., Li W., Wu Q., Liu Z., Li D., Wang C., Xu N. Effect of *Lactobacillus plantarum* or *Enterococcus faecalis* as co-inoculants with *Aspergillus oryzae* in koji making on the physicochemical properties of soy sauce // Journal of Food Science. 2022. V. 87. Is. 2. P. 714–727. doi: 10.1111/1750-3841.16035
- 7 Wang J., Xie Z., Feng Y., Huang M., Zhao M. Co-culture of *Zygosaccharomyces rouxii* and *Wickerhamiella versatilis* to improve soy sauce flavor and quality // Food Control. 2024. V. 155. P. 110044. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.110044
- 8 Sassi S., Wan-Mohhtar W., Jamaludin N., Ilham Z. Recent progress and advances in soy sauce production technologies: A review // Journal of Food Processing and Preservation. 2021. V. 45. Is. 11. P. e15799. doi: 10.1111/jfpp.15799
- 9 Song N., Xia H., Qiao Y., Zhang H., Yao L., Yang S., Chen X., Dai J. Differential analysis of ergosterol function in response to high salt and sugar stress in *Zygosaccharomyces rouxii* // FEMS Yeast Research. 2022. V. 22. No. 1. P. foac040. doi: 10.1093/femsyr/foac040
- 10 Wang J., Zhao M., Xie N., Huang M., Feng Y. Community structure of yeast in fermented soy sauce and screening of functional yeast with potential to enhance the soy sauce flavor // International Journal of Food Microbiology. 2022. V. 370. P. 109652. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109652
- 11 Zhao Y., Liu S., Han X., Zhou Z., Mao J. Combined effects of fermentation temperature and *Saccharomyces cerevisiae* strains on free amino acids, flavor substances, and undesirable secondary metabolites in huangjiu fermentation // Food Microbiology. 2022. V. 108. P. 104091. doi: 10.1016/j.fm.2022.104091
- 12 Серб Е.М., Юраскина Т.В., Римарева Л.В., Таджибова П.Ю., Соколова Е.Н., Волкова Г.С. Микробная биомасса – биоресурс для получения функциональных пищевых ингредиентов (обзор) // Технология и техника пищевых продуктов. 2023. № 3. С. 426–444. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2446
- 13 Агапкин А.М. Особенности пищевой ценности, ассортимент и нормирование качества пшеничных круп (Кус-Кус, Полба, Булгур, Фрике) // Инновационные технологии. 2021. № 3. С. 48–51.
- 14 Чернов М.М. Использование экстрактов бурых водорослей при приготовлении соевых соусов методом ферментации // Пищевая индустрия: инновационные процессы, продукты и технологии: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию Технол. ин-та. 2024. С. 640–645.
- 15 Diez-Simon C., Eichelsheim C., Mumm R., Hall R.D. Chemical and sensory characteristics of soy sauce: A review // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2020. V. 68. No. 42. P. 11612–11630. doi: 10.1021/acs.jafc.0c04274
- 16 Тарашкевич Е.Ю., Палагина М.В., Черевач Е.И., Фищенко Е.С. Разработка рецептуры соевых соусов с использованием экстрактов из растительного сырья дальневосточного региона // Пищевая промышленность. 2019. № 11. С. 60–63. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10179
- 17 Нарожнева А.О., Салищева О.В. Определение изoeлектрической точки белка // Пищевые инновации и биотехнологии. 2017. С. 108–109.
- 18 Хоконов А.Б., Хоконова М.Б. Биохимические процессы при вторичном брожении яблочных соков и хранении игристых вин // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2022. № 3. С. 138–144. doi: 10.55196/2411-3492-2022-3-37-138-144
- 19 Давыденко С.Г., Меледина Т.В., Андреева А.В. Исследование морфофизиологических свойств дрожжей, перспективных для производства этанола // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 1. С. 63–69. doi: 10.20914/2310-1202-2024-1-63-69
- 20 Zhou X., Guo T., Hadiatullah H., Zhang Y., Zhao G., Tai G., Zhang W., Fan D. Metabolic behavior of *Aspergillus oryzae* in salt-reduced soy sauce and its regulation for the brewing process // Food Bioscience. 2024. V. 59. P. 104206. doi: 10.1016/j.fbio.2024.104206
- 21 Hong K.Q., Fu X.M., Lei F.F., Li X.R., Chen F., Liao L., Wang Z. Selection of salt-tolerance and ester-producing mutant *Saccharomyces cerevisiae* to improve flavour formation of soy sauce during co-fermentation with *Torulopsis globosa* // Foods. 2023. V. 12. No. 18. P. 3449. doi: 10.3390/foods12183449

References

- 1 Eremina A.V., Lopaeva N.L. Analysis of the taste, nutritional and biological properties of naturally fermented soy sauce. Youth and Science. 2022. no. 12. pp. 1–6. (in Russian).
- 2 Shaikhova G.I., Turaev F.Sh. Current state of the problem of using specialized products with soy enrichment. New Day in Medicine. 2022. no. 10. pp. 57–63. (in Russian).
- 3 Serba E.M., Rimareva L.V., Tadzhibova P.Yu., Pogorzelskaya N.S. et al. Features of bioconservation of soybean raw materials in fermented products. Biotechnology: state and development prospects: collection of works. Moscow: Publishing House Expo-biokhim-tehnologii, 2021. vol. 19. pp. 320–322. doi: 10.37747/2312–640X 2021–19–320–322 (in Russian).
- 4 Patent no. 2448526, RU, A23L1/238. Method for producing soy sauce. Komolykh V.O., Komolykh O.M., Komolykh R.V. / Filed 07.08.2010; Publ. 27.04.2012. Available at: <https://allpatents.ru/patent/2448526.html> (in Russian).
- 5 Liu Y., Chen H., Liu C., Li Q., Niu C. Prediction, biochemical characterization and application of key proteolytic enzymes from *Aspergillus oryzae* BL18 in soy sauce fermentation. Food Research International. 2025. vol. 211. p. 116382. doi: 10.1016/j.foodres.2025.116382.

- 6 Zhang X., Liu Z., Kang B., Huang Y., Fu C., Li W., Wu Q., Liu Z., Li D., Wang C., Xu N. Effect of *Lactobacillus plantarum* or *Enterococcus faecalis* as co-inoculants with *Aspergillus oryzae* in koji making on the physicochemical properties of soy sauce. *Journal of Food Science*. 2022. vol. 87. iss. 2. pp. 714–727. doi: 10.1111/1750-3841.16035.
- 7 Wang J., Xie Z., Feng Y., Huang M., Zhao M. Co-culture of *Zygosaccharomyces rouxii* and *Wickerhamiella versatilis* to improve soy sauce flavor and quality. *Food Control*. 2024. vol. 155. p. 110044. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.110044.
- 8 Sassi S., Wan-Mohtar W., Jamaludin N., Ilham Z. Recent progress and advances in soy sauce production technologies: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. vol. 45. iss. 11. p. e15799. doi: 10.1111/jfpp.15799.
- 9 Song N., Xia H., Qiao Y., Zhang H., Yao L., Yang S., Chen X., Dai J. Differential analysis of ergosterol function in response to high salt and sugar stress in *Zygosaccharomyces rouxii*. *FEMS Yeast Research*. 2022. vol. 22. no. 1. p. foac040. doi: 10.1093/femsyr/foac040.
- 10 Wang J., Zhao M., Xie N., Huang M., Feng Y. Community structure of yeast in fermented soy sauce and screening of functional yeast with potential to enhance the soy sauce flavor. *International Journal of Food Microbiology*. 2022. vol. 370. p. 109652. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109652.
- 11 Zhao Y., Liu S., Han X., Zhou Z., Mao J. Combined effects of fermentation temperature and *Saccharomyces cerevisiae* strains on free amino acids, flavor substances, and undesirable secondary metabolites in huangjiu fermentation. *Food Microbiology*. 2022. vol. 108. p. 104091. doi: 10.1016/j.fm.2022.104091.
- 12 Serba E.M., Yuraskina T.V., Rimareva L.V., Tadzhibova P.Yu., Sokolova E.N., Volkova G.S. Microbial biomass is a bioresource for obtaining functional food ingredients (review). *Technology and technique of food production*. 2023. no. 3. pp. 426–444. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2446 (in Russian).
- 13 Agapkin A.M. Features of nutritional value, assortment and quality regulation of wheat cereals (Couscous, Spelt, Bulgur, Freekeh). *Innovative Technologies*. 2021. no. 3. pp. 48–51. (in Russian).
- 14 Chernov M.M. Use of brown algae extracts in the preparation of soy sauces by fermentation method. *Food Industry: innovative processes, products and technologies: collection of materials of the international scientific-practical conference dedicated to the 20th anniversary of the Technological Institute*. 2024. pp. 640–645. (in Russian).
- 15 Diez-Simon C., Eichelsheim C., Mumm R., Hall R.D. Chemical and sensory characteristics of soy sauce: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020. vol. 68. no. 42. pp. 11612–11630. doi: 10.1021/acs.jafc.0c04274.
- 16 Tarashkevich E.Yu., Palagina M.V., Cherevach E.I., Fishchenko E.S. Development of a formulation for soy sauces using extracts from plant raw materials of the Far Eastern region. *Food Industry*. 2019. no. 11. pp. 60–63. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10179 (in Russian).
- 17 Narozhneva A.O., Salishcheva O.V. Determination of the isoelectric point of a protein. *Food Innovations and Biotechnology*. 2017. pp. 108–109. (in Russian).
- 18 Khokonov A.B., Khokonova M.B. Biochemical processes during secondary fermentation of apple juices and storage of sparkling wines. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022. no. 3. pp. 138–144. doi: 10.55196/2411-3492-2022-3-37-138-144 (in Russian).
- 19 Davydenko S.G., Meledina T.V., Andreeva A.V. Study of the morphological and physiological properties of yeast promising for ethanol production. *Bulletin of VSUET*. 2024. vol. 86. no. 1. pp. 63–69. doi: 10.20914/2310-1202-2024-1-63-69 (in Russian).
- 20 Zhou X., Guo T., Hadiatullah H., Zhang Y., Zhao G., Tai G., Zhang W., Fan D. Metabolic behavior of *Aspergillus oryzae* in salt-reduced soy sauce and its regulation for the brewing process. *Food Bioscience*. 2024. vol. 59. p. 104206. doi: 10.1016/j.fbio.2024.104206.
- 21 Hong K.Q., Fu X.M., Lei F.F., Li X.R., Chen F., Liao L., Wang Z. Selection of salt-tolerance and ester-producing mutant *Saccharomyces cerevisiae* to improve flavour formation of soy sauce during co-fermentation with *Torulopsis globosa*. *Foods*. 2023. vol. 12. no. 18. p. 3449. doi: 10.3390/foods12183449.

Сведения об авторах

Максим М. Чернов аспирант, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, ул. Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, maxim2015.chernov@ya.ru
 <https://orcid.org/0009-0009-5139-8665>

Петр Е. Баланов к.т.н., доцент, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, ул. Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, balanov@itmo.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0610-9248>

Ирина В. Смотраева к.т.н., доцент, факультет биотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, ул. Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, smotraeva@itmo.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-1255-832X>

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

Maxim M. Chernov graduate student, Faculty of Biotechnology, National Research University ITMO, Lomonosov, 9, Saint-Petersburg, 191002, Russia, maxim2015.chernov@ya.ru
 <https://orcid.org/0009-0009-5139-8665>

Petr E. Balanov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Faculty of Biotechnology, National Research University ITMO, Lomonosov, 9, Saint-Petersburg, 191002, Russia, balanov@itmo.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0610-9248>

Irina V. Smotraeva Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Faculty of Biotechnology, National Research University ITMO, Lomonosov, 9, Saint-Petersburg, 191002, Russia, smotraeva@itmo.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-1255-832X>

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 13/11/2025	После редакции 28/11/2025	Принята в печать 15/12/2025
Received 13/11/2025	Accepted in revised 28/11/2025	Accepted 15/12/2025

Разработка и обоснование рецептуры вареной колбасы функциональной направленности с комплексом растительных ингредиентов

Владимир И. Манжесов	¹	mavik62_62@mail.ru	 0000-0002-0468-8821
Артур А. Айрапетян	¹	hayrapetyan.arthurl1@mail.ru	 0000-0001-8053-4317
Светлана Ю. Чурикова	¹	sveta-ch-vz@ya.ru	 0000-0001-9210-9852
Татьяна С. Ковалева	²	tatianakovaleva2501@ya.ru	 0000-0002-3531-3811

1 Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия

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

Аннотация. Актуальность представленного исследования обусловлена устойчивой тенденцией роста потребительского спроса на мясные продукты функционального назначения, обладающие улучшенным составом и профилактическими свойствами. Цель работы – разработка и комплексная оценка качества вареной колбасы, обогащенной композицией растительных компонентов. В качестве обогатителей использованы льняная мука, кедровые орехи и семена пажитника, что позволило целенаправленно скорректировать нутриентный профиль продукта. В ходе исследований была оптимизирована технологическая стадия внесения влаги, установившая, что добавление 15% воды к массе сырья обеспечивает максимальные значения влагосвязывающей (93,5%) и влагоудерживающей способности, а также оптимальные органолептические характеристики. Проведен сравнительный анализ экспериментального образца с контрольным (колбаса «Подмосковная») и существующими аналогами. Установлено, что разработанный продукт характеризуется повышенной массовой долей белка (19,0%) и пищевых волокон (1,0%), сбалансированным аминокислотным составом (биологическая ценность 85,0%, коэффициент сбалансированности аминокислотного состава 0,85). За счет введения растительной композиции достигнуто значительное увеличение содержания эссенциальных микронутриентов: витаминов (А, В₂, В₅, РР, С) и минеральных элементов (железо, калий, кальций, магний), доля которых в 100 г. продукта составляет от 15 до 120% от адекватного уровня суточного потребления. Микробиологические показатели готового продукта соответствуют установленным гигиеническим нормативам. Результаты работы свидетельствуют о перспективности применения предложенной рецептуры для создания мясных продуктов функционально-профилактического назначения.

Ключевые слова: функциональные мясные продукты, вареная колбаса, растительные ингредиенты, льняная мука, пажитник, кедровый орех, пищевая ценность, аминокислотный скор, влагосвязывающая способность, обогащение, микронутриенты.

Development and substantiation of a recipe for functional cooked sausage with a complex of plant ingredients

Vladimir I. Manzhesov	¹	mavik62_62@mail.ru	 0000-0002-0468-8821
Arthur A. Hayrapetyan	¹	hayrapetyan.arthurl1@mail.ru	 0000-0001-8053-4317
Svetlana Y. Churikova	¹	sveta-ch-vz@ya.ru	 0000-0001-9210-9852
Tatiana S. Kovaleva	²	tatianakovaleva2501@ya.ru	 0000-0002-3531-3811

1 Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurin str., Voronezh, 394087, Russia

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

Abstract. The relevance of this study stems from the steadily growing consumer demand for functional meat products with improved composition and preventative properties. The objective of this study was to develop and comprehensively evaluate the quality of cooked sausage enriched with a composition of plant components. Flaxseed flour, pine nuts, and fenugreek seeds were used as enriching agents, allowing for targeted adjustment of the product's nutrient profile. During the study, the moisture addition process was optimized, establishing that adding 15% water to the raw material mass ensures maximum moisture-binding capacity (93.5%) and moisture-holding capacity, as well as optimal organoleptic characteristics. A comparative analysis of the experimental sample with a control (Podmoskovnaya sausage) and existing analogues was conducted. The developed product was found to be characterized by an increased mass fraction of protein (19.0%) and dietary fiber (1.0%), a balanced amino acid composition (biological value 85.0%, amino acid balance coefficient 0.85). Due to the introduction of the plant composition, a significant increase in the content of essential micronutrients was achieved: vitamins (A, B₂, B₅, PP, C) and minerals (iron, potassium, calcium, magnesium), the proportion of which in 100 g of the product ranges from 15 to 120% of the adequate daily intake level. Microbiological indicators of the finished product comply with established hygienic standards. The results of the study indicate the potential of using the proposed recipe for the creation of meat products for functional and prophylactic purposes.

Keywords: functional meat products, cooked sausage, plant ingredients, flaxseed meal, fenugreek, pine nuts, nutritional value, amino acid score, water-binding capacity, fortification, micronutrients.

Для цитирования

Манжесов В.И., Айрапетян А.А., Чурикова С.Ю., Ковалева Т.С. Разработка и обоснование рецептуры вареной колбасы функциональной направленности с комплексом растительных ингредиентов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 125–130. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-125-130

For citation

Manzhesov V.I., Airapetyan A.A., Churikova S.Yu., Kovaleva T.S. Development and substantiation of a recipe for functional cooked sausage with a complex of plant ingredients. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 125–130. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-125-130

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

Введение

Вареные колбасные изделия традиционно занимают одну из ключевых позиций в потребительской корзине населения Российской Федерации, что объясняется их универсальностью, удобством использования и сложившимися пищевыми привычками. Согласно данным статистики, более 55% россиян употребляют колбасные изделия ежедневно, что подчеркивает их значимость в структуре питания [1]. В связи с этим, модификация рецептов традиционных продуктов с целью улучшения их потребительских свойств и придания функциональной направленности является одной из приоритетных задач современной пищевой индустрии.

В контексте современных тенденций в области здорового питания, характеризующихся повышенным вниманием к снижению калорийности и обогащению эссенциальными нутриентами, классические рецепты вареных колбас зачастую не отвечают запросам сознательных потребителей [2]. Перспективным направлением в решении данной проблемы является разработка комбинированных продуктов, в которых мясное сырье рационально сочетается с ингредиентами растительного происхождения [3, 4]. Такой подход позволяет не только повысить пищевую и биологическую ценность за счет введения пищевых волокон, витаминов, минеральных веществ и полиненасыщенных жирных кислот, но и позитивно влияет на структурно-механические характеристики фарша и готового продукта [5].

Цель работы – разработка рецептуры и технологии производства вареной колбасы функциональной направленности с использованием комплекса растительных компонентов (льняной муки, кедровых орехов и семян пажитника), а также комплексная оценка ее органолептических, физико-химических, микробиологических показателей и биологической ценности.

Материалы и методы

Сырье и рецептура. Для приготовления экспериментальных образцов использовалось следующее сырье: говядина жилованная первого сорта (ООО «Мясной двор»), мясо курицы (филе бедра, ОАО «Птицефабрика Сибирская»), мука льняная (ТМ «Житница здоровья»), орехи кедровые очищенные (ООО «Алтайские кедр»), семена пажитника (ТМ «Приправка»), соль поваренная пищевая помола № 1, нитрит натрия (E250), сахар-песок, перец черный молотый. Рецептурный состав экспериментального образца представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Рецептурный состав экспериментального образца вареной колбасы

Table 1.

Recipe composition of an experimental sample of cooked sausage

Компонент Ingredients	Масса, г Mass, g	Массовая доля, % Mass fraction, %
Говядина (жилованная 1 сорт) Beef (trimmed, grade 1)	700	56,0
Мясо курицы Chicken meat	325	26,0
Мука льняная Flax meal	100	8,0
Кедровые орехи Pine nuts	50	4,0
Семена пажитника Fenugreek seeds	42,5	3,4
Соль поваренная пищевая Table salt	28	2,24
Нитрит натрия Sodium nitrite	0,06	0,0045
Сахар-песок Granulated sugar	3,13	0,25
Перец черный молотый Ground black pepper	1,25	0,1

Технология производства. Процесс производства осуществлялся по традиционной технологической схеме для вареных колбас, включающей подготовку сырья, измельчение, составление фарша, шприцевание, осадку, термическую обработку (обжарка, варка) и охлаждение. Критическим контролируемым параметром являлось количество воды, вносимой в фарш на стадии куттерования. Для оптимизации этого параметра были изготовлены серии образцов с добавлением 5; 10; 15; 20 и 25% воды от массы мясного и растительного сырья.

Методы анализа. Контрольный образец – вареная колбаса «Подмосковная» куриная. Органолептическую оценку проводили по разработанной профилограмме с балльной оценкой по таким показателям, как внешний вид, консистенция, цвет на разрезе, запах и вкус. Физико-химические показатели (массовая доля влаги, белка, жира, углеводов, пищевых волокон, поваренной соли, золы) определяли стандартными методами в соответствии с ГОСТ [6, 7]. Влагосвязывающую (ВСС) и влагоудерживающую (ВУС) способности фарша и готового продукта оценивали методом прессования и центрифугирования соответственно [8]. Энергетическую ценность рассчитывали по стандартным коэффициентам пересчета (Атульф). Аминокислотный состав определяли на аминокислотном анализаторе, показатели качества белка (аминокислотный скор, коэффициент утилитарности, биологическую ценность) рассчитывали в сравнении с эталонным белком ФАО/ВОЗ [9]. Содержание витаминов и минеральных элементов определяли методами ВЭЖХ и атомно-эмиссионной спектроскопии. Микробиологический анализ проводили в соответствии с требованиями ТР ТС 034/2013 [10].

Результаты и их обсуждение

Оптимизация рецептуры по содержанию влаги. Результаты исследования влияния количества вносимой воды на функционально-технологические свойства фарша представлены на рисунок 1.

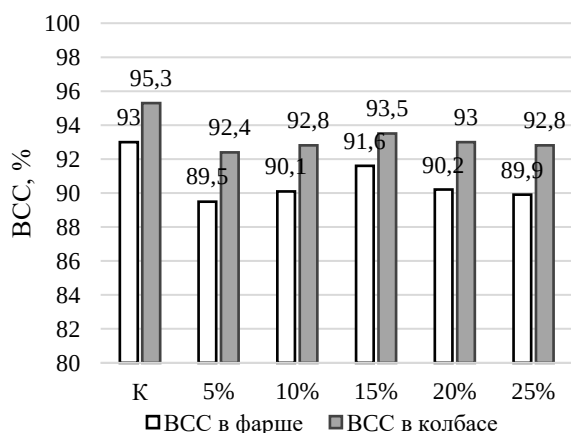


Рисунок 1. Влагосвязывающая способность
Figure 1. Moisture-binding capacity

Было установлено, что с увеличением доли воды с 5 до 15% БСС фарша возрастала, достигая максимума 93,5% при 15% влаги. Дальнейшее увеличение доли воды до 25% приводило к снижению БСС и ВУС, что объясняется превышением гидратационной емкости белково-волоконистой матрицы фарша. Образец с 15% добавленной воды характеризовался оптимальной, плотной и сочной консистенцией, в то время как при 20 и 25% консистенция становилась рыхлой и водянистой.

Пищевая и энергетическая ценность. Сравнительный анализ пищевой ценности экспериментального и контрольного образцов показал существенные улучшения (таблица 2).

Таблица 2.
Сравнительная характеристика пищевой ценности на 100 г продукта

Table 2.
Comparative characteristics of nutritional value per 100 g of product

Показатель Indicator	Контроль Control	Эксперимент Experiment	Изменение Diff
Белки, г Protein, g	16,7 ± 0,2	19,0 ± 0,2	+13,7
Жиры, г Fat, g	13,6 ± 0,2	12,85 ± 0,2	-5,5
Углеводы, г Carbohydrates, g	1,7 ± 0,2	4,13 ± 0,2	+142,9
Пищевые волокна, г Dietary fiber, g	0,5 ± 0,2	1,0 ± 0,2	+100,0
Энергетическая ценность, ккал Energy value, kcal	185,0	200,2	+8,2

Как следует из данных таблицы, в экспериментальном образце достигнуто повышение содержания белка на 13,7% и пищевых волокон в 2 раза, при незначительном снижении массовой доли жира. Увеличение доли углеводов обусловлено их наличием в растительных компонентах.

Обогащение микронутриентами. Введение композиции растительных ингредиентов позволило существенно повысить витаминную и минеральную ценность продукта (таблица 3).

Особого внимания заслуживает тот факт, что 100 г продукта полностью покрывают суточную потребность в витамине А и витамине В₅, а также практически полностью – в витамине В₂.

Оценка качества белка. Анализ аминокислотного состава и расчет интегральных показателей качества белка выявил положительное влияние растительной композиции (таблица 4).

Таблица 3.
Содержание отдельных витаминов и минеральных веществ в экспериментальном образце (в% от рекомендуемой суточной нормы потребления в 100 г. продукта)

Content of individual vitamins and minerals in the experimental sample
(in % of the recommended daily intake per 100 g of product)

Витамины Vitamins	% от РСН	Степень значимости* Degree of importance*	Мин. в-ва Minerals	% от РСН	Степень значимости* Degree of importance*
А	120,0	Очень высокое Very High	Fe	26,10	Высокое High
В5	103,2		Mn	20,00	
В2	93,3		Mg	17,60	
РР	51,0	Высокое High	К	15,64	Повышенное Increased
С	28,0		Ca	15,20	

Примечание: Очень высокое: > 80% от РСН; Высокое: 20–80% от РСН*; Повышенное: 10–20% от РСН*

Сравнительная характеристика показателей качества белка

Comparative characteristics of protein quality indicators

Показатель Indicator	Контроль Control	Эксперимент Experiment	Изменение Diff
Биологическая ценность, % Biological value, %	81,0	85,0	+4,0
Коэффициент сбалансированности аминокислотного состава (КСАС) Amino acid balance coefficient (AABC)	0,81	0,85	+0,04
Коэффициент разбалансированности аминокислот (КРАС) Amino acid imbalance coefficient (AIC)	0,19	0,15	-0,04
Показатель чистой утилизации белка (ЧУБ), % Net protein utilization index (NPRI), %	86,0	89,95	+3,95

Увеличение биологической ценности и КСАС, а также снижение КРАС свидетельствуют о более сбалансированном аминокислотном профиле и повышенной утилитарной ценности белка экспериментального образца. Лимитирующей аминокислотой в разработанной колбасе является треонин.

Органолептические и микробиологические показатели. По всем органолептическим характеристикам (внешний вид, консистенция, цвет, вкус, запах) экспериментальный образец не уступал контрольному и соответствовал требованиям, предъявляемым к вареным колбасам высшего сорта. Результаты микробиологических исследований подтвердили безопасность продукта: показатели КМАФАнМ (1×10^2 КОЕ/г), БГКП, сульфитредуцирующие клостридии, *S. aureus* и патогенные микроорганизмы соответствовали нормам ТР ТС 034/2013 [10].

Сравнение с существующими аналогами.

Проведенный анализ известных технических решений в области производства мясорастительных колбас (патенты РФ №№ 2099953, 2171605, 2245662) выявил ряд системных недостатков. В большинстве аналогов используется сырье с высоким содержанием жира (жирная свинина, говядина), что повышает калорийность и делает продукт непригодным для диетического питания лиц с ожирением [11]. Кроме того, применяемые растительные добавки (морская капуста, яблочный порошок) часто не обеспечивают комплексного обогащения широким спектром микронутриентов или обладают нежелательными свойствами (кислый pH). Предлагаемая

в данном исследовании рецептура лишена указанных недостатков, поскольку основана на использовании нежирного мясного сырья и специально подобранной композиции растительных ингредиентов с высокой нутритивной плотностью [12–14]

Заключение

В результате проведенных исследований разработана и научно обоснована рецептура вареной колбасы функциональной направленности. Установлено, что внесение композиции из льняной муки (8,0%), кедровых орехов (4,0%) и семян пажитника (3,4%) позволяет получить продукт с высокой пищевой и биологической ценностью. Оптимизирована технологическая стадия внесения влаги, определено, что добавление 15% воды к массе сырья обеспечивает наилучшие функционально-технологические и органолептические свойства.

Комплексная оценка готового продукта показала его преимущества по сравнению с традиционным аналогом: повышенное содержание белка (19,0%) и пищевых волокон (1,0%), сбалансированный аминокислотный состав (КСАС = 0,85, БЦ = 85,0%) и значительный вклад в покрытие суточной потребности в ряде витаминов (А, В2, В5, РР, С) и минеральных веществ (железо, калий, кальций, магний). Разработанная колбаса соответствует требованиям безопасности и может быть рекомендована для широкого круга потребителей в рамках рационального и функционального питания [15].

Литература

- 1 Анализ потребительского рынка мясной продукции в РФ в 2022–2023 гг. / РОМИР. 2023. URL: <https://romir.ru/> (дата обращения: 15.10.2025).
- 2 Тутельян В.А., Никитюк Д.Б., Жилинская Н.В. Научные основы здорового питания: современные представления и перспективные направления // Вопросы питания. 2020. Т. 89. № 4. С. 5–13.
- 3 Лисица А.В., Жерновков А.В., Потеряйко С.И. Научные и практические аспекты создания комбинированных мясных продуктов с растительными наполнителями // Мясная индустрия. 2021. № 5. С. 22–26.
- 4 Durović S., Pavlić B., Šorgić S. et al. Functional Meat Products: A Review // Food Reviews International. 2022. Vol. 38. No. 1. P. 1–21.
- 5 Fellendorf S., O'Sullivan M., Kerry J.P. Impact of using replacers on the physicochemical, sensory and nutritional quality of processed meat products // Current Opinion in Food Science. 2021. Vol. 40. P. 1–8.
- 6 Козин А.В., Абрамова Л.С., Гусева Е.С. и др. Установление метрологических параметров методики измерений массовой доли белка методом Кьельдаля в пищевой рыбной продукции // Пищевые системы. 2021. Т. 239. № 3. С. 233–238.
- 7 Сергеева А.С. Актуальные вопросы определения содержания жира в пищевых продуктах и продовольственном сырье (обзор) // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20. № 1. С. 59–84.
- 8 Зимняков В.М., Зимняков А.В., Курочкин А.А. и др. Состояние, проблемы и перспективы производства мяса в России // Техника и технологии в животноводстве. 2024. № 2. С. 4–10.
- 9 Singh N., Jain P., Ujwal M. et al. Escalate protein plates from legumes for sustainable human nutrition // Frontiers in Nutrition. 2022. Vol. 9. Article 977986. doi: 10.3389/fnut.2022.977986
- 10 ТР ТС 034/2013. О безопасности мяса и мясной продукции. М.: Евразийская экономическая комиссия, 2013. 87 с.
- 11 Зыкова А.А., Иванников Е.В. Анализ патентной ситуации в области производства мясорастительных консервов функционального назначения // Пищевая промышленность. 2022. № 8. С. 18–22.
- 12 Raole V.M., Raole V.V. Flaxseed and seed oil: Functional food and dietary support for health // EAS Journal of Nutrition and Food Sciences. 2022. Vol. 4. No. 2. P. 68–77.
- 13 Ravi R., Wang J. Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) seed: A review of its nutritional composition and health benefits // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 112. P. 287–300.

- 14 Ryan E., Galvin K., O'Connor T.P. et al. Fatty acid profile, tocopherol, squalene and phytosterol content of walnuts, almonds, peanuts, hazelnuts and the macadamia nut // International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2006. Vol. 57. No. 3-4. P. 219–228.
- 15 Храмов А.Г., Онищенко Н.И. Функциональные пищевые продукты: теория и реальность. СПб.: Профессия, 2020. 416 с.
- 16 Дерканосова А.А., Курчаева Е.Е., Куцова А.Е., Косенко И.С. Разработка варено-копченых колбасных изделий с использованием растительных белково-углеводных комплексов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 87. № 3. С. 153–161. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-153-161
- 17 Васюкова А.Т., Меджидова М.Э., Михеева А.Н., Куликова Е.А. Функциональные рецептуры с суспензиями, обогащенными микронутриентами // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2023. № 1 (39). С. 124–135.
- 18 Bal-Prylypko L., Serdyuk M., HOLEMBOVSKA N. et al. Justification of the technology of sausage products using plant functional ingredients // Scientific Journal 'Animal Science & Food Technologies'. 2025. Vol. 16. No. 3. P. 86–99. doi: 10.31548/animal.3.2025.86
- 19 Kurčubić V.S., Petrović L.S., Džinić N.R. et al. Design and Development of Healthier and Functional Meat Products // Healthier Food: Design and Development of Foods with Improved Functional and Nutritional Properties. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. P. 1–124. doi: 10.1007/978-3-031-96610-1_1
- 20 Galieva Z.A., Salikhova G.G., Mikolaychik I.N. et al. Spicy functional additive in the production of sausages // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 613. Article 012037. doi: 10.1088/1755-1315/613/1/012037
- 21 Kaldarbekova M., Serikkyzy M., Khakimzhanova G. et al. Optimization of the formulation of functional cooked sausage // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 5. No. 11 (137). P. 38–48. doi: 10.15587/1729-4061.2025.341379
- 22 Sirini N., Munekata P.E., Lorenzo J.M. et al. Development of healthier and functional dry fermented sausages: Present and future // Foods. 2022. Vol. 11. No. 8. Article 1128. doi: 10.3390/foods11081128

References

- 1 Analysis of the consumer market of meat products in the Russian Federation in 2022–2023. ROMIR. 2023. Available at: <https://romir.ru/> (accessed: 15.10.2023) (in Russian).
- 2 Tutelyan V.A., Nikityuk D.B., Zhilinskaya N.V. Scientific foundations of healthy nutrition: current concepts and promising directions. Problems of Nutrition. 2020. vol. 89. no. 4. pp. 5–13. (in Russian).
- 3 Lisitsa A.V., Zhernovkov A.V., Poteryayko S.I. Scientific and practical aspects of creating combined meat products with plant-based fillers. Meat Industry. 2021. no. 5. pp. 22–26. (in Russian).
- 4 Durović S., Pavlić B., Šorgić S. et al. Functional Meat Products: A Review. Food Reviews International. 2022. vol. 38. no. 1. pp. 1–21. doi: 10.1080/87559129.2020.1860076.
- 5 Fellendorf S., O'Sullivan M., Kerry J.P. Impact of using replacers on the physicochemical, sensory and nutritional quality of processed meat products. Current Opinion in Food Science. 2021. vol. 40. pp. 1–8. doi: 10.1016/j.cofs.2020.12.004.
- 6 Kozin A.V., Abramova L.S., Guseva E.S. et al. Establishment of metrological parameters of the method for measuring the mass fraction of protein by the Kjeldahl method in fish food products. Food Systems. 2021. vol. 239. no. 3. pp. 233–238. (in Russian).
- 7 Sergeeva A.S. Topical issues of determining fat content in food products and food raw materials (review). Standards. Reference Materials. 2024. vol. 20. no. 1. pp. 59–84. (in Russian).
- 8 Zimnyakov V.M., Zimnyakov A.V., Kurochkin A.A. et al. State, problems and prospects of meat production in Russia. Technology and Technology in Animal Husbandry. 2024. no. 2. pp. 4–10. (in Russian).
- 9 Singh N., Jain P., Ujwal M. et al. Escalate protein plates from legumes for sustainable human nutrition. Frontiers in Nutrition. 2022. vol. 9. article 977986. doi: 10.3389/fnut.2022.977986.
- 10 TR TS 034/2013. On the safety of meat and meat products. Moscow: Eurasian Economic Commission, 2013. 87 p. (in Russian).
- 11 Zykova A.A., Ivannikov E.V. Analysis of the patent situation in the field of production of meat-vegetable canned functional products. Food Industry. 2022. no. 8. pp. 18–22. (in Russian).
- 12 Raole V.M., Raole V.V. Flaxseed and seed oil: Functional food and dietary support for health. EAS Journal of Nutrition and Food Sciences. 2022. vol. 4. no. 2. pp. 68–77.
- 13 Ravi R., Wang J. Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) seed: A review of its nutritional composition and health benefits. Trends in Food Science & Technology. 2021. vol. 112. pp. 287–300. doi: 10.1016/j.tifs.2021.04.003.
- 14 Ryan E., Galvin K., O'Connor T.P. et al. Fatty acid profile, tocopherol, squalene and phytosterol content of walnuts, almonds, peanuts, hazelnuts and the macadamia nut. International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2006. vol. 57. no. 3-4. pp. 219–228. doi: 10.1080/09637480500516623.
- 15 Khramtsov A.G., Onipchenko N.I. Functional food products: theory and reality. Saint Petersburg: Profession, 2020. 416 p. (in Russian).
- 16 Derkonosova A.A., Kurchaeva E.E., Kutsova A.E., Kosenko I.S. Development of cooked-smoked sausage products using plant protein-carbohydrate complexes. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 153–161. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-153-161 (in Russian).
- 17 Vasyukova A.T., Medzhidova M.E., Mikheeva A.N., Kulikova E.A. Functional formulations with suspensions enriched with micronutrients. Bulletin of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov. 2023. no. 1 (39). pp. 124–135. (in Russian).
- 18 Bal-Prylypko L., Serdyuk M., HOLEMBOVSKA N. et al. Justification of the technology of sausage products using plant functional ingredients. Scientific Journal 'Animal Science & Food Technologies'. 2025. vol. 16. no. 3. pp. 86–99. doi: 10.31548/animal.3.2025.86.
- 19 Kurčubić V.S., Petrović L.S., Džinić N.R. et al. Design and Development of Healthier and Functional Meat Products. Healthier Food: Design and Development of Foods with Improved Functional and Nutritional Properties. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. pp. 1–124. doi: 10.1007/978-3-031-96610-1_1.

20 Galieva Z.A., Salikhova G.G., Mikolaychik I.N. et al. Spicy functional additive in the production of sausages. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. vol. 613. article 012037. doi: 10.1088/1755-1315/613/1/012037.

21 Kaldarbekova M., Serikkyzy M., Khakimzhanova G. et al. Optimization of the formulation of functional cooked sausage. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. vol. 5. no. 11 (137). pp. 38–48. doi: 10.15587/1729-4061.2025.341379.

22 Sirini N., Munekata P.E., Lorenzo J.M. et al. Development of healthier and functional dry fermented sausages: Present and future. Foods. 2022. vol. 11. no. 8. article 1128. doi: 10.3390/foods11081128.

Сведения об авторах

Владимир И. Манжесов д.с.-х.н., профессор, зав.кафедрой, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, mavik62_62@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0468-8821>

Артур А. Айрапетян к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, hayrapetyan.arthur1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8053-4317>

Светлана Ю. Чурикова к.с.-х.н., доцент, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, sveta-ch-vz@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9210-9852>

Татьяна С. Ковалева к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tatianakovaleva2501@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3531-3811>

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Vladimir I. Manzhesov Dr. Sci. (Agric.), professor, technology for storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurin str., Voronezh, 394087, Russia, mavik62_62@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0468-8821>

Arthur A. Hayrapetyan Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, technology for storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurin str., Voronezh, 394087, Russia, hayrapetyan.arthur1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8053-4317>

Svetlana Y. Churikova Cand. Sci. (Agric.), associate professor, technology for storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurin str., Voronezh, 394087, Russia, sveta-ch-vz@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9210-9852>

Tatiana S. Kovaleva Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, fermentation and sugar production technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tatianakovaleva2501@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3531-3811>

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 10/11/2025	После редакции 28/11/2025	Принята в печать 15/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 28/11/2025	Accepted 15/12/2025

Исследование накопления органических кислот в хлебопекарных пшеничных заквасках типа 1 и в опарах длительного брожения

Ирина М. Жаркова¹ zharir@mail.ru  0000-0001-8662-4559
Данил С. Иванчиков¹ ivanchikov_99@mail.ru  0000-0001-9814-6005

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

Аннотация. Роль органических кислот в технологии хлебопекарного производства сложна и многогранна. Они синтезируются дрожжами и молочнокислыми бактериями в процессе брожения (ферментации) опар, заквасок и теста. Разнообразие и количество образуемых органических кислот зависит от состава полуфабриката, присутствующих штаммов микроорганизмов, условий ферментации (влажность полуфабрикатов, температура брожения и др.). Цель исследования - оценка спектра и уровня накопления органических кислот в основных полуфабрикатах ремесленного хлебопечения - хлебопекарных пшеничных заквасках типа 1 и в опарах длительного брожения. Объектами исследования служили пшеничные закваски типа 1 и опары длительного брожения (жидкие с DY200 и густые с DY160). Опары длительного брожения готовили по типу европейских пулиш и бига. Закваски выводили «с нуля» и после стабилизации биотехнологических показателей переводили на модифицированную питательную смесь, содержащую томатную сыворотку и / или амарантовую муку. Отбор заквасок для исследования осуществляли после 9 месяцев непрерывного ведения их на модифицированной питательной смеси. Органические кислоты (молочную, уксусную, яблочную, винную, янтарную, лимонную) определяли с помощью метода высокоэффективной жидкостной хроматографии на приборе Shimadzu LC-2030C 3D Plus. Полученные результаты способствуют лучшему пониманию роли опар и заквасок типа 1 в формировании органолептических и физико-химических характеристик хлебобулочных изделий. Отмечены зависимости качественного и количественного состава органических кислот от рецептурного состава полуфабрикатов хлебопекарного производства и режимов их приготовления. Для установления взаимосвязи между накоплением в заквасках типа 1 с томатной сывороткой и / или амарантовой мукой и качественным составом микробиома заквасок требуется проведение дополнительных исследований.

Ключевые слова: закваска типа 1, опара длительного брожения, органические кислоты, коэффициент брожения, томатная сыворотка, амарантовая мука.

Study of organic acid accumulation in type 1 wheat sourdoughs and long-fermentation type 0 sourdoughs

Irina M. Zharkova¹ zharir@mail.ru  0000-0001-8662-4559
Danil S. Ivanchikov¹ ivanchikov_99@mail.ru  0000-0001-9814-6005

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

Abstract. The role of organic acids in bakery technology is complex and multifaceted. They are synthesized by yeast and lactic acid bacteria during the fermentation of starters, sourdoughs, and dough. The variety and quantity of organic acids produced depend on the composition of the semi-finished product, the microbial strains present, and the fermentation conditions (semi-finished product moisture content, fermentation temperature, etc.). The aim of this study was to evaluate the spectrum and level of organic acid accumulation in the main semi-finished products of artisanal type 1 wheat sourdoughs and long-fermented type 0 sourdoughs. The subjects of the study were type 1 wheat sourdoughs and long-fermented type 0 sourdoughs (liquid with a DY200 and thick with a DY160). Long-fermented type 0 sourdoughs were prepared similar to European poolish and biga. The starters were grown from scratch and, after stabilization of their biotechnological parameters, were transferred to a modified nutrient mixture containing tomato serum and/or amaranth flour. The starters were selected for study after nine months of continuous growth on the modified nutrient mixture. Organic acids (lactic, acetic, malic, tartaric, succinic, and citric) were determined using high-performance liquid chromatography on a Shimadzu LC-2030C 3D Plus instrument. The obtained results contribute to a better understanding of the role of type 1 sourdoughs and type 0 sourdoughs in shaping the organoleptic and physicochemical characteristics of bakery products. Dependences between the qualitative and quantitative composition of organic acids on the recipes for semi-finished bakery products and their preparation conditions are noted. Further research is required to establish the relationship between the accumulation of organic acids in type 1 sourdoughs containing tomato serum and/or amaranth flour and the qualitative composition of the sourdoughs microbiome.

Keywords: type 1 sourdough, long-fermentation type 0 sourdoughs, organic acids, fermentation coefficient, tomato serum, amaranth flour.

Для цитирования

Жаркова И.М., Иванчиков Д.С. Исследование накопления органических кислот в хлебопекарных пшеничных заквасках типа 1 и в опарах длительного брожения // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 131–138. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-131-138

For citation

Zharkova I.M., Ivanchikov D.S. Study of organic acid accumulation in type 1 wheat sourdoughs and long-fermentation type 0 sourdoughs. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 131–138. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-131-138

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

Введение

Наиболее распространенным биологическим разрыхлителем при производстве пшеничных хлебобулочных изделий в настоящее время служат прессованные дрожжи. При этом существуют технологии, предусматривающие использование пшеничных заквасок [1], которые в большей степени распространены в секторе рустикального хлебопечения. Хлебопекарные дрожжи и молочнокислые бактерии составляют основные группы технологической микрофлоры хлебопекарного производства. Наряду с эфирами,

альдегидами, кетонами и другими соединениями они синтезируют органические кислоты: летучие (масляная, муравьиная, пропионовая, уксусная) и нелетучие (винная, малоновая, молочная, лимонная, изолимонная, фумаровая, яблочная, янтарная и другие). Роль этих органических кислот не ограничивается лишь снижением уровня pH или ростом титруемой кислотности полуфабрикатов (опары, закваски, тесто) в процессе брожения. Их влияние более сложное и комплексное не только на полуфабрикаты, но и на готовую продукцию (рисунок 1).

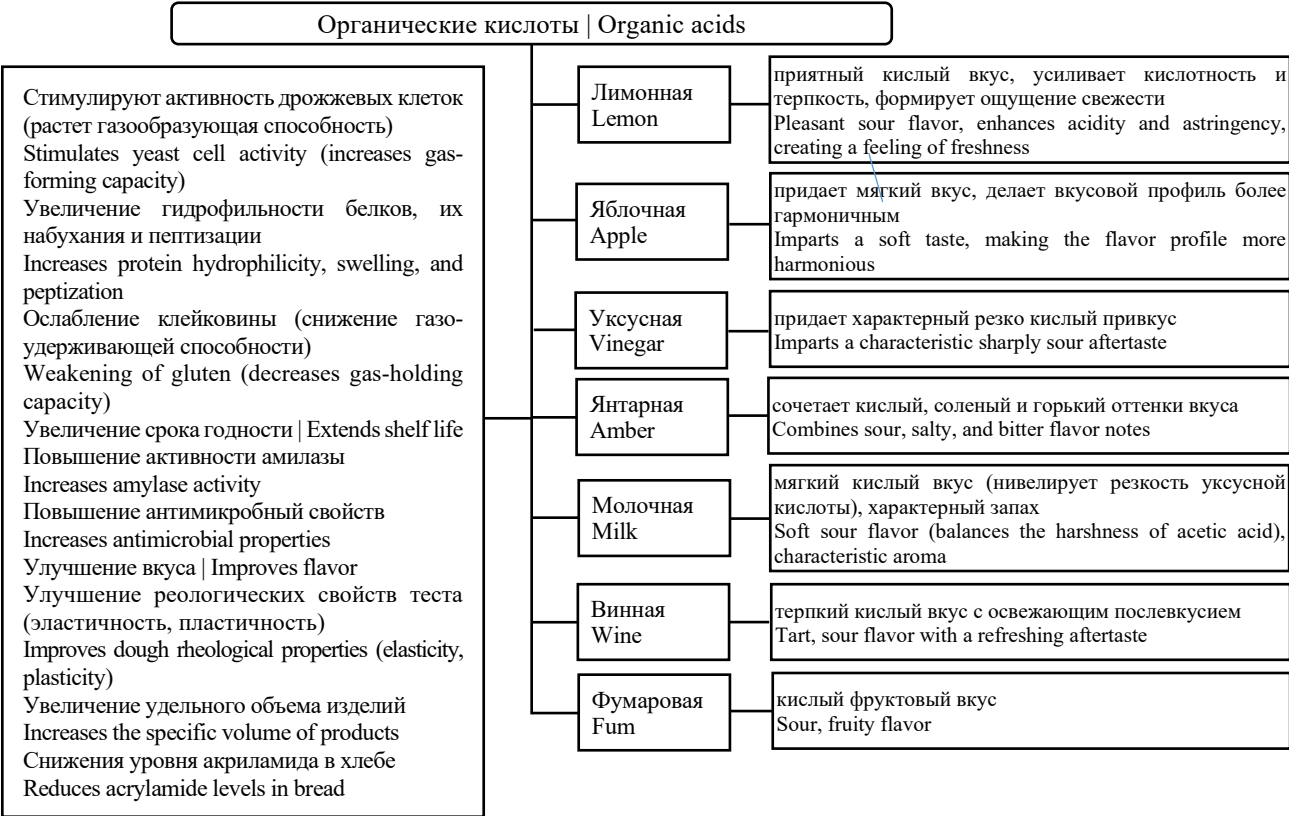


Рисунок 1. Роль органических кислот в технологии пшеничного хлеба

Figure 1. The role of organic acids in wheat bread technology

Органические кислоты оказывают влияние на реологические свойства теста, активность амилазы, участвуют в формировании вкуса, аромата хлеба и структуры его мякиша, проявляя антимикробные свойства, способствуют повышению микробиологической чистоты продукции [2–5]. На потребительские характеристики хлеба существенное влияние оказывает соотношение молочной и летучих кислот. Su X. с соавт. показали, что, обеспечивая накопление в хлебе определенного уровня и соотношения органических кислот, можно корректировать качество продукции. Добиться лучших характеристик удельного объема хлеба и эластичности мякиша исследователям удалось при следующем

содержании органических кислот в хлебе: 0,1% уксусной, 0,4% молочной, 0,3% лимонной, 0,3% яблочной и 0,3% фумаровой [6].

Chen A. с соавт. [2] проанализировали 20 коммерческих штаммов дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* и установили, что по способности синтезировать лимонную, яблочную и уксусную кислоты они различаются в 2,35 раза. При этом синтез лимонной кислоты был относительно стабильным, а содержание яблочной и лимонной кислот в образцах хлеба отличалось в 3,99 и 1,99 соответственно.

Механизм влияния органических кислот на процесс структурообразования в тесте предложен Galal A.M. еще в 1978 году [7]:

органические кислоты снижают рН и протонируют анионы глютаминовой кислоты, что приводит к повышению положительного заряда макромолекул белка. Это приводит к увеличению внутри- и межмолекулярного отталкивания в белковых макромолекулах и ослаблению структурной прочности клейковины. В результате таких конформационных изменений белков снижается продолжительность замеса теста и величина энергозатрат на оптимальное развитие структуры.

В отношении способности органических кислот снижать образование акриламида в хлебе существуют противоречивые данные. С одной стороны, установлено, что кислая среда препятствует реакции аспарагина с карбонильными группами восстанавливающих сахаров, тем самым препятствуя образованию промежуточных продуктов реакции Майяра, с другой, есть результаты исследований, в которых внесение химических подкислителей не влияло на количество акриламида в хлебе. [8]. Механизм влияния молочнокислых бактерий на уровень акриламида в хлебе включает физическую абсорбцию акриламида в клеточную стенку бактерий и выработку L-аспарагиназы [9].

В работе Wang Y. с соавт. [10] показано, что органические кислоты, образующиеся в процессе брожения закваски, способствуют повреждению крахмальных гранул. Следовательно, крахмальные гранулы становятся более податливыми действию амилаз, что, в свою очередь, приведет к накоплению сахаров, необходимых для жизнедеятельности молочнокислых бактерий и дрожжей.

Органические кислоты также играют важную роль в метаболизме углерода и энергетическом обмене микроорганизмов – представителей технологической микрофлоры, в осуществлении ими синтетических и диссимиляционных процессов.

Цель работы – оценка спектра и уровня накопления органических кислот в основных полуфабрикатах ремесленного хлебопечения – хлебопекарных пшеничных заквасках типа 1 и в опарах длительного брожения.

Объекты и методы

Объектами исследования служили пшеничные закваски типа 1 и опары длительного брожения (жидкие с DY200 и густые с DY160).

Жидкую и густую опары длительного брожения готовили по типу европейских пулиш и бига, для этого в качестве биологического разрыхлителя и источника технологической микрофлоры применяли прессованные хлебопекарные дрожжи в дозировке 0,5% к массе муки.

Перед использованием прессованные дрожжи смешивали с рецептурным количеством воды, затем добавляли пшеничную муку высшего сорта. Брожение жидкой опары (ОЖ) осуществляли при температуре 25–27 °С, а густой (ОГ) – при 17–18 °С в течение 12 ч.

Выведение контрольной закваски типа 1 (жидкой и густой) «с нуля» начинали с приготовления продукта брожения, для чего смешивали муку пшеничную хлебопекарную высшего сорта и воду питьевую, смесь инкубировали при температуре 25–27 °С для жидких заквасок и при 17–18 °С – для густых. По истечении 48 ч продукт брожения освежали двукратным (для жидкой закваски) или равным (для густой закваски) количеством питательной смеси. Такие освежения проводили через каждые 12 ч на протяжении 16 суток до получения заквасок с биотехнологическими характеристиками, пригодным для выпечки хлеба. На 17-е сутки контрольные образцы жидкой и густой закваски при возобновлении перевели на модифицированную питательную смесь, которую использовали для поддержания заквасок в активном состоянии в течение 9 месяцев. По истечении 9 месяцев отбирали образцы заквасок для исследования и замораживали для транспортировки в специализированную лабораторию. Всего вели 4 жидких закваски (Ж) и 4 густых (Г) закваски, различающихся составом питательной смеси, взятой для возобновления: Ж1 и Г1 – контрольные закваски из муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта и воды; Ж2 и Г2 – введено 35% томатной сыворотки взамен воды; Ж3 и Г3 – введена амарантовая мука (ТУ 10.61.22–024–77872064–2022) взамен 50% пшеничной муки; Ж4 и Г4 – введено 25% томатной сыворотки взамен воды и 25% амарантовой муки взамен пшеничной муки.

Органические кислоты (молочную, уксусную, яблочную, винную, янтарную, лимонную) определяли с помощью метода высокоэффективной жидкостной хроматографии на приборе Shimadzu LC-2030C 3D Plus.

Результаты и их обсуждение

Синтез органических кислот в процессе брожения полуфабрикатов хлебопекарного производства дает важную информацию об эффективности метаболизма молочнокислых бактерий и дрожжей. Результаты анализа показали присутствие в полуфабрикатах различных сочетаний органических кислот (рисунок 2).

В обеих опарах были выявлены уксусная и яблочная кислоты, а в густой опаре присутствовала также янтарная кислота. Общее содержание кислот в густой опаре ОГ составило 0,143%, что в 3,76 раза больше, чем в жидкой опаре ОЖ. Различие в количестве уксусной кислоты составило 1,5 раза, тогда как яблочной –

2,6 раза. Полученные данные свидетельствуют, что использование густой опары длительного брожения будет способствовать получению продукции с более выраженным вкусом.

В заквасках отмечена противоположная ситуация – суммарное количество органических кислот в жидких заквасках составило 0,720–1,097%, тогда как в густых – 0,420–0,546%. Т. е. в жидких заквасках синтез органических кислот протекал в 1,7–2,0 раза активнее, чем в густых заквасках. В отличие от опар, ни в одном из образцов заквасок не была обнаружена яблочная кислота. В жидких заквасках присутствовали лишь три кислоты – молочная, уксусная и янтарная, тогда как в густой закваске ГЗ дополнительно обнаружена винная кислота, а в заквасках Г2 и Г4 – лимонная. Известно, что лимонная кислота препятствует развитию нежелательной, в том числе гнилостной микрофлоры, практически не влияя на активность дрожжей [11]. Лимонная кислота присутствовала в образцах густых заквасок, в состав питательной

смеси которых вводили томатную сыворотку. Вероятно, ее наличие в заквасках обусловлено присутствием в составе томатной сыворотки. Ранее нами было установлено, что в зависимости от сортовой принадлежности томатов содержание лимонной кислоты в томатной сыворотке колеблется от 4,46 мг/дм³ до 7,10 мг/дм³ [12]. При этом отсутствие лимонной кислоты в жидких заквасках с томатной сывороткой (образцы Ж2 и Ж4), возможно, связано с ее потреблением дрожжевыми клетками [13] или *Lactiplantibacillus plantarum* [14], что требует дополнительного изучения. Наличие лимонной кислоты способствует улучшению вкуса хлеба, его текстурных характеристик [14].

По данным [7] в хорошо выброженном полуфабрикате содержится в среднем 0,2–0,4% уксусной кислоты и 0,4–0,6% молочной кислоты. К такому уровню из проанализированных нами образцов наиболее близка жидкая закваска Ж2, тогда как в остальных образцах количество этих кислот существенно ниже.

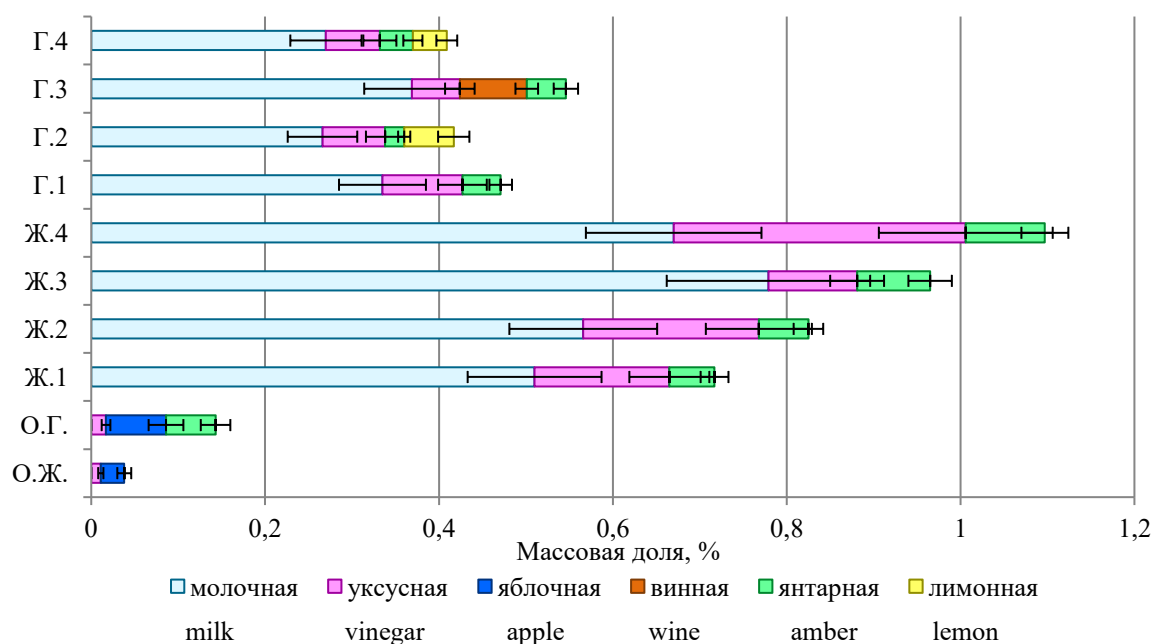


Рисунок 2. Характеристика органических кислот в образцах пшеничных заквасок типа 1 и опар

Figure 2. Characterization of organic acids in samples of type 1 wheat sourdoughs and doughs

Для количественной характеристики вкусовых особенностей хлебопекарных полуфабрикатов, в первую очередь заквасок, применяют коэффициент ферментации (FQ) или коэффициент брожения. Этот коэффициент показывает молярное соотношение между молочной и уксусной кислотами:

$$FQ = \frac{m_{\text{мол. к.}} / M_{\text{мол. к.}}}{m_{\text{укс. к.}} / M_{\text{укс. к.}}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{мол. к.}}$, $m_{\text{укс. к.}}$ – масса соответственно молочной и уксусной кислоты (г/100 г закваски), $M_{\text{мол. к.}}$, $M_{\text{укс. к.}}$ – молекулярная масса соответственно молочной и уксусной кислоты (а. е. м.) [15].

Коэффициент ферментации связан со свойствами молочнокислых бактерий, доминирующих в процессе брожения заквасок, и заметно варьируется в зависимости от баланса между гомо- и гетероферментирующими лактобактериями. В свою очередь, этот баланс зависит также от экзогенных и эндогенных факторов, которые преобладают во время брожения закваски (например, концентрация сбраживаемого сахара и кислорода, DY, продолжительность брожения, температура) [15]. Считается, то более гармоничным вкус хлеба ощущается при диапазоне FQ от 3 до 5 [1].

В исследовании Jin J. с соавт. продемонстрировано, что в закваске, содержащей *P. pentosaceus* и *S. cerevisiae*, FQ составил 2,08–2,86, при этом хлеб обладал сбалансированными сенсорными характеристиками [16].

Характеристика коэффициента брожения проанализированных заквасок типа 1 представлена в виде гистограммы на рис. 3. Наибольшая вариабельность коэффициента брожения отмечена в группе жидких заквасок – в образце Ж3 (содержит амарантовую муку) FQ составил 5,1,

тогда как в образце Ж4, содержащем комбинацию амарантовой муки и томатной сыворотки – лишь 1,3 (минимальное значение среди всех проанализированных образцов). Густые закваски Г1, Г2 и Г4 были более стабильны по этому показателю FQ составил 2,4–2,9, при этом резко выделялся образец Г3 (аналогично группе жидких заквасок) – FQ составил 4,5, что ниже значения в образце Ж3 лишь на 0,6 единиц.

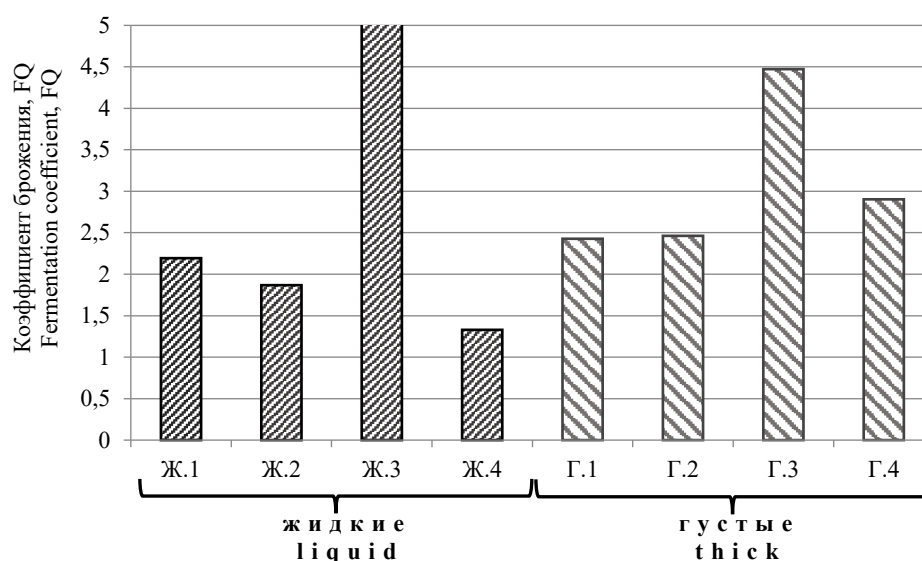


Рисунок 3. Характеристика коэффициента брожения в образцах пшеничных заквасок типа 1

Figure 3. Characterization of the fermentation coefficient in samples of type 1 wheat sourdoughs

Известно, что осуществление брожения заквасок при более высоких температурах способствует преимущественному образованию молочной кислоты [17]. В нашем случае жидкие закваски велись при более высокой температуре, чем густые и накопление молочной кислоты в них было в 1,9–2,1 раза больше, чем густых. В связи с этим можно было бы предположить, что и FQ во всех образцах жидких заквасок будет выше, чем густых. Однако этого не произошло из-за высокого накопления в образцах Ж1, Ж2 и Ж4 уксусной кислоты. Уксусная кислота оказывает влияние не только вкус и запах хлеба, но и на реологические свойства теста. В исследовании Ramos Magalhães A.E. с соавт. введение 2% уксусной кислоты к массе муки в тесте привело к сокращению времени образования теста до 44% и снижению стабильности до 20% [18]. Уксусная кислота может способствовать деполимеризации белка в тесте: снижение pH активирует эндогенные протеазы муки, а увеличение суммарного заряда белков в кислой среде вызывает разворачивание белковых глобул и больший доступ к эндогенным

протеолитическим ферментам. При исследовании с помощью конфокальной микроскопии образцов теста с добавлением уксусной кислоты авторы [18] наблюдали образованием более открытой и менее связанной клейковинной сети, а на этапе исследования *in vitro* переваривания хлеба отметили снижение содержания иммуногенного глиадина, выявленное с помощью электрофореза в полиакриламидном геле (SDS-PAGE).

Кроме участия в формировании вкусового профиля хлеба, янтарная кислота обладает рядом важных биологических свойств. Так, она выступает ингибитором свободно-радикальных процессов перекисного окисления липидов, улучшает энергетический обмен в клетке, оказывает гиполипидемическое действие, снижает симптомы воспалительных и аллергических реакций, облегчает гормональную перестройку организма во время беременности, поддерживает активность иммунной системы [19]. В образцах жидких заквасок содержание янтарной кислоты составило 0,052–0,091%, что в 2,36–2,02 раза выше, чем в образцах густых заквасок. При этом среди образцов жидких заквасок различие

составило 1,75 раза и отмечено возрастание количества янтарной кислоты по мере модификации питательной смеси – максимальное количество в образце Ж4 (питательная смесь содержит томатную сыворотку и амарантовую муку). Среди густых заквасок какая-либо взаимосвязь между составом питательной смеси и количеством янтарной кислоты не обнаружена. В образце густой опары ОГ содержание янтарной кислоты было на уровне жидкой закваски Ж2.

Заключение

Полученные результаты способствуют лучшему пониманию роли опар и заквасок типа 1 в формировании органолептических и физико-химических характеристик хлебоулучшителей. Отмечены зависимости качественного и количественного состава органических кислот

от рецептурного состава полуфабрикатов хлебопекарного производства и режимов их приготовления. Для установления взаимосвязи между накоплением в заквасках типа 1 с томатной сывороткой и/или амарантовой мукой и качественным составом микробиома заквасок требуется проведение дополнительных исследований.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00275, <https://rscf.ru/project/24-26-00275/>.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «Амарант Технология» за многолетнее сотрудничество и предоставление образцов амарантовой муки для исследований.

Литература

- 1 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
- 2 Chen A., Pan C., Chen J. Comparative Analysis of Bread Quality Using Yeast Strains from Alcoholic Beverage Production // *Microorganisms*. 2024. Vol. 12. No. 12. Article 2609. doi: 10.3390/microorganisms12122609
- 3 Червоткина Д.Р., Борисова А.В. Антимикробные препараты природного происхождения: обзор свойств и перспективы применения // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. № 2. С. 254–267. doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-254-267
- 4 Mohsen S.M., Aly M.H., Attia A.A., Osman D.B. Effect of Sourdough on Shelf Life, Freshness and Sensory Characteristics of Egyptian Balady Bread // *Journal of Applied Environmental Microbiology*. 2016. Vol. 4. No. 2. P. 39–45.
- 5 Shi Y., Pu D., Zhou X., Zhang Y. Recent Progress in the Study of Taste Characteristics and the Nutrition and Health Properties of Organic Acids in Foods // *Foods*. 2022. Vol. 11. No. 21. Article 3408. doi: 10.3390/foods11213408
- 6 Su X., Wu F., Zhang Y., Yang N., Chen F., Jin Z., Xu X. Effect of Organic Acids on Bread Quality Improvement // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 278. P. 267–275. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.025
- 7 Пшенишнюк Г.Ф. Влияние органических кислот и соли на процесс структурообразования, реологические свойства теста и качество хлеба // *Известия вузов. Пищевая технология*. 1990. № 2-3. С. 39–42.
- 8 Seyedzadeh-Hashemi S., Khanniri E., Khorshidian N., Mohammadi M. Mitigation of acrylamide in bread: Insights into formulation and technological approaches // *Food Chemistry*. 2025. Vol. 498. Part 2. Article 147164. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.147164
- 9 Mollakhalili-Meybodi N., Khorshidian N., Nematollahi A., Arab M. Acrylamide in bread: a review on formation, health risk assessment, and determination by analytical techniques // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. No. 13. P. 15627–15645. doi: 10.1007/s11356-021-12775-3
- 10 Wang Y., Wang X., Li M., Li L., Ma S. Multi-scale changes of starch in type I sourdough fermentation system induced by wheat bran dietary fiber: from thermal properties, crystal structure, and in vitro digestibility behavior // *Food Research International*. 2025. Vol. 222. Part 2. Article 117697. doi: 10.1016/j.foodres.2025.117697
- 11 Пат. 2169761 Российская Федерация, МПК C12N1/16, A21D8/04. Способ повышения качества хлебопекарных дрожжей / Парфенова В.В., Голобокова Л.П., Дальхеева К.Г., Красовска И.В., Красовская И.В., Коптелова Л.Я., Макарова Г.В.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технологический университет. № 99127384/13; заявл. 31.12.1999; опубл. 27.06.2001, Бюл. № 18.
- 12 Zharkova I.M., Ivanchikov D., Efremov D.P., Plotnikova I.V., Ageeva N.M., Kozhanova L.V. Evaluation of Phytochemical Composition of Tomato Serum as a Promising Ingredient for the Production of Healthy Food Products // *Current Research in Nutrition and Food Science*. 2025. Vol. 13. No. 2. P. 733–748. doi: 10.12944/CRNFSJ.13.2.13
- 13 Mujdeci G.N., Ozbaz Z.Y. Technological and enzymatic characterization of the yeasts isolated from natural fermentation media of Gemlik olives // *Journal of Applied Microbiology*. 2021. Vol. 131. No. 2. P. 801–818. doi: 10.1111/jam.14979
- 14 Păucean A., Șerban L.R., Chiș M.S., Mureșan V., Pușcaș A., Man S.M., Pop C.R., Socaci S.A., Igual M., Ranga F., Alexa E., Berbecea A., Pop A. Nutritional composition, in vitro carbohydrates digestibility, textural and sensory characteristics of bread as affected by ancient wheat flour type and sourdough fermentation time // *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 22. Article 101298. doi: 10.1016/j.fochx.2024.101298
- 15 Gobbetti M., Gänzle M. (Eds.) *Handbook on Sourdough Biotechnology*. New York: Springer, 2013. P. 105–154. doi: 10.1007/978-1-4614-5425-0_5
- 16 Jin J., Nguyen T.T.H., Humayun S., Park S.H., Oh H., Lim S., Mok I.K., Choi Y.H., Kim D., Kim S.B., Kim M. Characteristics of sourdough bread fermented with *Pediococcus pentosaceus* and *Saccharomyces cerevisiae* and its bio-preservative effect against *Aspergillus flavus* // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 345. Article 128787. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128787
- 17 De Vuyst L., Van Kerrebroeck S., Leroy F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation // *Advances in Applied Microbiology*. 2017. Vol. 100. P. 49–160. doi: 10.1016/bs.aambs.2017.02.003

18 Ramos Magalhães A.E., Landim Neves M.I., Dos Reis Gasparetto B., Oliveira Júnior F.D., Ribas Fonseca L., Joy Steel C., Lopes da Cunha R. Organic acids in bread-making affecting gluten structure and digestibility // Food Research International. 2023. Vol. 174. Part 1. Article 113520. doi: 10.1016/j.foodres.2023.113520

19 Евглевский А.А., Рыжкова Г.Ф., Евглевская Е.П., Ванина Н.В., Михайлова И.И., Денисова А.В., Ерыженская Н.Ф. Биологическая роль и метаболическая активность янтарной кислоты // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 9. С. 67–69.

20 Sahoo K.K., Datta S., Nayak A., Mohanty B., Gouda G., Pradhan S.R., Samantaray S., Mohapatra P.K., Shaw B.P. Biological production of succinic acid: state of the art and future perspectives // Industrial Microbiology and Biotechnology. 2022. P. 427–461. doi: 10.1007/978-981-16-5214-1_15

References

1 Zharkova I.M., Roslyakov Yu.F., Ivanchikov D.S. Starters of spontaneous (natural) fermentation: technological features and role in modern bakery production. Technique and technology of food production. 2023. vol. 53. no. 3. pp. 525–544. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2455 (in Russian).

2 Chen A., Pan C., Chen J. Comparative Analysis of Bread Quality Using Yeast Strains from Alcoholic Beverage Production. Microorganisms. 2024. vol. 12. no. 12. article 2609. doi: 10.3390/microorganisms12122609.

3 Chervotkina D.R., Borisova A.V. Antimicrobial preparations of natural origin: review of properties and prospects of application. News of universities. Applied chemistry and biotechnology. 2022. vol. 12. no. 2. pp. 254–267. doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-254-267 (in Russian).

4 Mohsen S.M., Aly M.H., Attia A.A., Osman D.B. Effect of Sourdough on Shelf Life, Freshness and Sensory Characteristics of Egyptian Balady Bread. Journal of Applied Environmental Microbiology. 2016. vol. 4. no. 2. pp. 39–45.

5 Shi Y., Pu D., Zhou X., Zhang Y. Recent Progress in the Study of Taste Characteristics and the Nutrition and Health Properties of Organic Acids in Foods. Foods. 2022. vol. 11. no. 21. article 3408. doi: 10.3390/foods11213408.

6 Su X., Wu F., Zhang Y., Yang N., Chen F., Jin Z., Xu X. Effect of Organic Acids on Bread Quality Improvement. Food Chemistry. 2019. vol. 278. pp. 267–275. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.025.

7 Pshenishnyuk G.F. Influence of organic acids and salt on the process of structure formation, rheological properties of dough and bread quality. News of universities. Food technology. 1990. no. 2-3. pp. 39–42. (in Russian).

8 Seyedzadeh-Hashemi S., Khanniri E., Khorshidian N., Mohammadi M. Mitigation of acrylamide in bread: Insights into formulation and technological approaches. Food Chemistry. 2025. vol. 498. part 2. article 147164. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.147164.

9 Mollakhalili-Meybodi N., Khorshidian N., Nematollahi A., Arab M. Acrylamide in bread: a review on formation, health risk assessment, and determination by analytical techniques. Environmental Science and Pollution Research. 2021. vol. 28. no. 13. pp. 15627–15645. doi: 10.1007/s11356-021-12775-3.

10 Wang Y., Wang X., Li M., Li L., Ma S. Multi-scale changes of starch in type I sourdough fermentation system induced by wheat bran dietary fiber: from thermal properties, crystal structure, and in vitro digestibility behavior. Food Research International. 2025. vol. 222. part 2. article 117697. doi: 10.1016/j.foodres.2025.117697.

11 Patent no. 2169761, Russian Federation, IPC C12N1/16, A21D8/04. Method for improving the quality of baker's yeast. Parfenova V.V., Golobokova L.P., Dalheeva K.G., Krasovska I.V., Krasovskaya I.V., Koptelova L.Ya., Makarova G.V.; applicant and patent holder Voronezh State Technological University. no. 99127384/13; filed 31.12.1999; publ. 27.06.2001, Bull. no. 18. (in Russian).

12 Zharkova I.M., Ivanchikov D., Efremov D.P., Plotnikova I.V., Ageeva N.M., Kozhanova L.V. Evaluation of Phytochemical Composition of Tomato Serum as a Promising Ingredient for the Production of Healthy Food Products. Current Research in Nutrition and Food Science. 2025. vol. 13. no. 2. pp. 733–748. doi: 10.12944/CRNFSJ.13.2.13.

13 Mujdeci G.N., Ozbas Z.Y. Technological and enzymatic characterization of the yeasts isolated from natural fermentation media of Gemlik olives. Journal of Applied Microbiology. 2021. vol. 131. no. 2. pp. 801–818. doi: 10.1111/jam.14979.

14 Păucean A., Șerban L.R., Chiș M.S., Mureșan V., Pușcaș A., Man S.M., Pop C.R., Socaci S.A., Igual M., Ranga F., Alexa E., Berbecea A., Pop A. Nutritional composition, in vitro carbohydrates digestibility, textural and sensory characteristics of bread as affected by ancient wheat flour type and sourdough fermentation time. Food Chemistry: X. 2024. vol. 22. Article 101298. doi: 10.1016/j.fochx.2024.101298.

15 Gobbetti M., Gänzle M. (Eds.) Handbook on Sourdough Biotechnology. New York: Springer, 2013. pp. 105–154. doi: 10.1007/978-1-4614-5425-0_5.

16 Jin J., Nguyen T.T.H., Humayun S., Park S.H., Oh H., Lim S., Mok I.K., Choi Y.H., Kim D., Kim S.B., Kim M. Characteristics of sourdough bread fermented with *Pediococcus pentosaceus* and *Saccharomyces cerevisiae* and its bio-preservative effect against *Aspergillus flavus*. Food Chemistry. 2021. vol. 345. article 128787. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128787.

17 De Vuyst L., Van Kerrebroeck S., Leroy F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation. Advances in Applied Microbiology. 2017. vol. 100. pp. 49–160. doi: 10.1016/bs.aambs.2017.02.003.

18 Ramos Magalhães A.E., Landim Neves M.I., Dos Reis Gasparetto B., Oliveira Júnior F.D., Ribas Fonseca L., Joy Steel C., Lopes da Cunha R. Organic acids in bread-making affecting gluten structure and digestibility. Food Research International. 2023. vol. 174. part 1. article 113520. doi: 10.1016/j.foodres.2023.113520.

19 Evglevsky A.A., Ryzhkova G.F., Evglevskaya E.P., Vanina N.V., Mikhailova I.I., Denisova A.V., Eryzhenskaya N.F. Biological role and metabolic activity of succinic acid. Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2013. no. 9. pp. 67–69. (in Russian).

20 Sahoo K.K., Datta S., Nayak A., Mohanty B., Gouda G., Pradhan S.R., Samantaray S., Mohapatra P.K., Shaw B.P. Biological production of succinic acid: state of the art and future perspectives. Industrial Microbiology and Biotechnology. 2022. pp. 427–461. doi: 10.1007/978-981-16-5214-1_15.

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 магистрант, 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

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 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 master 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

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 14/11/2025	После редакции 28/11/2025	Принята в печать 12/12/2025
Received 14/11/2025	Accepted in revised 28/11/2025	Accepted 12/12/2025

Исследование влияния свободных и инкапсулированных клеток пробиотического штамма *Weizmannia coagulans* на свойства пробиотического кисломолочного продукта и оценка их выживаемости в имитированных условиях ЖКТ

Анна А. Толкачева	¹	anna-biotech@yandex.ru	 0000-0003-0725-6482
Нина А. Пряхина	¹	nekrasovaninelya@yandex.ru	 0000-0003-0434-3839
Ольга В. Зверева	¹	bond.vrn15@yandex.ru	 0000-0002-7051-9858
Екатерина В. Богданова	¹	ek-v-b@yandex.ru	 0000-0001-5053-2273
Юлия П. Кузнецова	¹	teplovamart@mail.ru	 0009-0001-6701-3039
Михаил Ю. Сыромятников	¹	mihan.vrn@mail.ru	 0000-0001-9028-0613
Ольга С. Корнеева	¹	korneeva-olgas@yandex.ru	 0000-0002-2863-0771

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

Аннотация. Создание пробиотических кисломолочных продуктов, дополнительно обогащенных пробиотиками, способных сохранять свою жизнеспособность при хранении готового продукта и в агрессивных условиях желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), является актуальной задачей. В ходе данного исследования методом эмульсии были изготовлены капсулы из альгината, пектина, к-каррагинана, дополнительно покрытые хитозаном, с включенными в них клетками пробиотического штамма *Weizmannia coagulans*. Были приготовлены образцы пробиотического кисломолочного продукта с клетками *W. coagulans* в свободной и капсулированной форме и проанализированы физико-химические, микробиологические и сенсорные характеристики готового продукта. При проверке жизнеспособности капсул в готовом продукте, в имитированных условиях ЖКТ было установлено, что капсулированные клетки показали высокую степень выживаемости в сравнении со свободными. Для капсул из смеси альгинат-пектин (А-П) она составила $9,92 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$, для капсул из смеси альгинат-пектин-каррагинан (А-П-К) $10,33 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$, выживаемость свободных клеток упала до значения $2,17 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$. Капсулированные и свободные клетки пробиотика при хранении кисломолочного продукта оказали значительное влияние на различные характеристики готового продукта. Наблюдалась тенденция к повышению титруемой кислотности, к снижению вязкости и увеличению синерезиса. Жизнеспособность свободных клеток пробиотика в течение 21го дня хранения снизилась на $7,13 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$, тогда как выживаемость капсулированных клеток упала всего на $1,35 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$ для А-П капсул и на $2,92 \text{ Log}_{10} \text{ КОЕ/мл}$ для А-П-К капсул. Внесение свободных и капсулированных клеток незначительно повлияло на сенсорные характеристики готового продукта по истечении всего срока хранения. Результаты показали, что инкапсуляция пробиотиков значительно повышает выживаемость бактерий как в готовом продукте при хранении, так и в имитированных условиях ЖКТ.

Ключевые слова: инкапсуляция, пробиотики, кисломолочный продукт, альгинат натрия, пектин, каррагинан, хитозан, реологические характеристики, сенсорные характеристики, имитированные условия ЖКТ.

A study of the effect of free and encapsulated cells of the probiotic strain *Weizmannia coagulans* on the properties of a probiotic fermented milk product and an assessment of their survival under simulated gastrointestinal conditions

Anna A. Tolkacheva	¹	anna-biotech@yandex.ru	 0000-0003-0725-6482
Nina A. Pryakhina	¹	nekrasovaninelya@yandex.ru	 0000-0003-0434-3839
Olga V. Zvereva	¹	bond.vrn15@yandex.ru	 0000-0002-7051-9858
Ekaterina V. Bogdanova	¹	ek-v-b@yandex.ru	 0000-0001-5053-2273
Yulia P. Kuznetsova	¹	teplovamart@mail.ru	 0009-0001-6701-3039
Mikhail Y. Syromyatnikov	¹	mihan.vrn@mail.ru	 0000-0001-9028-0613
Olga S. Korneeva		korneeva-olgas@yandex.ru	 0000-0002-2863-0771

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

Для цитирования

Толкачева А.А., Пряхина Н.А., Зверева О.В., Богданова Е.В., Кузнецова Ю.П., Сыромятников М.Ю., Корнеева О.С. Исследование влияния свободных и инкапсулированных клеток пробиотического штамма *Weizmannia coagulans* на свойства пробиотического кисломолочного продукта и оценка их выживаемости в имитированных условиях ЖКТ // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 139–148. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-139-148

For citation

Tolkacheva A.A., Pryakhina N.A., Zvereva O.V., Bogdanova E.V., Kuznetsova Yu.P., Syromyatnikov M.Yu., Korneeva O.S. A study of the effect of free and encapsulated cells of the probiotic strain *Weizmannia coagulans* on the properties of a probiotic fermented milk product and an assessment of their survival under simulated gastrointestinal conditions. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 139–148. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-139-148

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

Abstract. The creation of probiotic fermented milk products, additionally enriched with probiotics, capable of maintaining their viability during storage of the finished product and under the harsh conditions of the gastrointestinal tract (GIT) is a pressing issue. In this study, capsules of alginate, pectin, and κ -carrageenan, additionally coated with chitosan, were produced using an emulsion method, encapsulating cells of the probiotic strain *Weizmannia coagulans*. Samples of the probiotic fermented milk product containing free and encapsulated *W. coagulans* cells were prepared, and the physicochemical, microbiological, and sensory characteristics of the finished product were analyzed. When testing the viability of the capsules in the finished product under simulated GIT conditions, it was found that encapsulated cells demonstrated a high survival rate compared to free cells. For capsules made of an alginate-pectin mixture (A-P), it was $9.92 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$, for capsules made of an alginate-pectin-carrageenan mixture (A-P-C), $10.33 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$, the viability of free cells dropped to $2.17 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$. Encapsulated and free probiotic cells during storage of a fermented milk product had a significant impact on various characteristics of the finished product. A tendency towards an increase in titratable acidity, a decrease in viscosity, and an increase in syneresis was observed. The viability of free probiotic cells during 21 days of storage decreased by $7.13 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$, while the viability of encapsulated cells dropped by only $1.35 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$ for A-P capsules and by $2.92 \text{ Log}_{10} \text{ CFU/ml}$ for A-P-C capsules. The addition of free and encapsulated cells had little effect on the sensory characteristics of the finished product at the end of its shelf life. The results showed that probiotic encapsulation significantly increased bacterial survival both in the finished product during storage and under simulated gastrointestinal conditions.

Keywords: encapsulation, probiotics, fermented milk product, sodium alginate, pectin, carrageenan, chitosan, rheological characteristics, sensory characteristics, simulated gastrointestinal conditions.

Введение

В связи с повсеместным распространением культуры здорового образа жизни, а также повышением потребительской грамотности в вопросах нутрициологии, наблюдается повышенный интерес к функциональным пищевым продуктам, обладающим доказанным положительным воздействием на здоровье человека. Особое место в этой категории занимают пробиотические кисломолочные продукты, содержащие живые культуры пробиотических микроорганизмов. Пробиотики способны корректировать нарушения кишечного микробиома, возникшие из-за приема антибиотиков, стресса или неправильного питания, могут снижать уровень холестерина, поддерживать иммунитет организма и улучшать усвоение минералов [1]. Для эффективной работы пробиотиков, их жизнеспособность в потребляемом продукте должна быть не ниже 10^7 КОЕ на миллилитр или грамм потребляемого продукта [2]. Сохранность пробиотических культур в кисломолочных продуктах зависит от множества факторов: условий производства продукта, обработки и хранения [3]. При этом жизнеспособность пробиотических штаммов при прохождении через агрессивную среду желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) имеет принципиальное значение, поскольку именно этот фактор определяет их оздоровительный эффект [4].

Существуют различные методы доставки пробиотиков непосредственно в отдел толстого кишечника, где должно происходить их дальнейшее размножение [5]. Технология инкапсулирования в последнее время привлекает все больше внимания. Заключение клеток в различные матрицы-носители помогает преодолеть кислотные условия желудка и сохранить жизнеспособность клеток [6]. На эффективность инкапсуляции влияет множество факторов: метод, условия инкапсулирования, используемые носители, а также сам вид пробиотических бактерий [7]. Эмульсионный метод

позволяет получить микрокапсулы достаточного мелкого размера, при этом выживаемость микроорганизмов составляет более 80%, легко масштабируется и, следовательно, подходит для применения в промышленности [8].

Биоматериал, используемый в качестве матрицы-носителя, должен обладать способностью к гелеобразованию, быть нетоксичным, экономичным и доступным. Данными свойствами обладают следующие биоматериалы: альгинат натрия, пектин и κ -каррагинан [9–12]. Многочисленными научными исследованиями доказана высокая эффективность инкапсуляции и хорошая выживаемость пробиотических бактерий при использовании данных биоматериалов [13]. Наличие второго слоя биоматериала при изготовлении капсул влияет на эффективность доставки капсул до нужного отдела кишечника, где должно происходить высвобождение клеток пробиотиков. В качестве второго слоя часто используется хитозан [14]. Молекулы хитозана имеют положительный заряд, тогда как полисахариды первого слоя капсул обладают отрицательным зарядом, что повышает прочность капсул [15].

При выборе пробиотической культуры для технологии инкапсуляции ключевыми факторами являются выживаемость в процессе капсулирования и доказанная эффективность штамма. В предыдущем исследовании нашей научной группой были подробно изучены пробиотические свойства штамма *W. coagulans*, относящегося к семейству *Bacillaceae* [16].

Пробиотические кисломолочные продукты обладают целым комплексом полезных свойств для здоровья человека и представляют собой ценный функциональный продукт питания [17]. Данный продукт популярен и может содержать в своем составе большое количество полезных микроорганизмов. Дополнительное обогащение кисломолочного продукта пробиотиками может оказывать влияние на его сенсорные и физико-химические показатели [18]. В процессе хранения и ферментации pH кисломолочного

продукта может снижаться, что может негативно влиять на бактерии-пробиотики, находящиеся в виде свободных клеток. Свободные клетки также не могут противостоять жестким условиям ЖКТ и погибают [19]. В связи с чем, актуальной задачей является создание кисломолочных продуктов с дополнительным обогащением инкапсулированными клетками пробиотических микроорганизмов, которые благодаря защитному биополимеру, будут эффективно доставляться в толстый кишечник человека. Основные задачи данного исследования включают изготовление капсул с двойным слоем с использованием различных доступных полисахаридов, обогащение ими кисломолочного продукта и оценку их выживаемости в условиях хранения готового продукта и в имитированных условиях ЖКТ, оценку некоторых физико-химических, сенсорных и реологических показателей обогащенного кисломолочного продукта.

Материалы и методы

В работе использовали пробиотическую культуру *Weizmannia coagulans* и обычную культуру, традиционно применяемую в заквасках для кисломолочных продуктов, *Streptococcus thermophilus*. Обе культуры выделены коллективом авторов из природных источников и депонированы в научном музее кафедры биохимии и биотехнологии ФГБОУ ВО ВГУИТ.

Для изготовления капсул использовали альгинат натрия (Qingdao Nanshan Seaweed, Китай), низкоэтерифицированный амидированный пектин (НЭА), к-каррагинан (ООО Вектор, Россия), хитозан (Sigma-Aldrich, США), хлорид кальция (CDH, Индия), Твин 80 (Ленреактив, Россия), подсолнечное масло. Для производства кисломолочного продукта использовали восстановленное обезжиренное стерилизованное молоко. Для культивирования микроорганизмов использовали MRS агар и агар *Streptococcus Thermophilus Isolation* (Himedia, Индия).

Культивирование пробиотической культуры *W. coagulans* проводили в течение 24 ч при 37° С в предварительно отстерилизованном 10% восстановленном молоке. Начальную концентрацию клеток *W. coagulans* до инкапсуляции устанавливали путем глубинного посева на агаризованную среду MRS.

Изготовление капсул с пробиотической культурой *W. coagulans* проводили по ранее описанной методике методом эмульсии, использовали различные сочетания полисахаридов: альгината натрия, пектина и к-каррагинана, дополнительно покрывали вторым слоем хитозана [20]. Капсулы были лиофилизированы и использованы для приготовления пробиотического кисломолочного продукта (Таблица 1).

Таблица 1.

Состав капсул с культурой *W. coagulans*

Table 1.

Composition of the obtained capsules

Капсулы Capsules	Состав капсул/capsule composition			
	1 слой капсул 1 layer of capsules			2 слой капсул 2 layer of capsules
	Компонент 1	Компонент 2	Компонент 3	Компонент
А-П	2% альгинат натрия	3% пектин	-	1% хитозан
А-П-К	2% альгинат натрия	3% пектин	2% к-каррагинан	1% хитозан

Кисломолочный продукт производили согласно способу, описанному Головач [21]. Обезжиренное восстановленное молоко стерилизовали при температуре 121 °С в течение 11 минут, охлаждали до 45 °С. Каждый образец инокулировали культурой *S. thermophilus* (1% по объёму). Пробиотический кисломолочный продукт производили путем добавления свободных клеток или инкапсулированных культуры *W. coagulans*. Было приготовлено четыре различных образца:

1. Контроль. Кисломолочный продукт, содержащий 1% по объёму инокулята *S. thermophilus*. (свS контроль)

2. Кисломолочный продукт, содержащий 1% по объёму инокулята *S. thermophilus*, и 0,5% по объёму свободных клеток *W. coagulans*. (свS+свW)

3. Кисломолочный продукт, содержащий 1% по объёму инокулята *S. thermophilus*,

0,5% по объёму клеток *W. coagulans* инкапсулированных в А-П. (свS+кW+А-П)

4. Кисломолочный продукт, содержащий 1% по объёму инокулята *S. thermophilus*, 0,5% по объёму клеток *W. coagulans* инкапсулированных в А-П-К. (свS+кW+А-П-К)свS, свW – свободные клетки культур *S. thermophilus*, *W. Coagulans* кW – капсулированные клетки культуры *W. coagulans*

Все партии разливали в колбы и инкубировали при температуре 42–45 °С на протяжении 6 ч до образования сгустков. Затем часть колб анализировали, остальные хранили в течение 21 дня при 4 °С ± 1.

Для имитации условий ЖКТ сока использовали физиологический раствор. Его кислотность корректировали до значения pH 2,0 с помощью 0,01 М раствора HCl. Полученный раствор стерилизовали в течение 15 минут

при 121 °С. В стерильный раствор дополнительно вносили желудочный фермент пепсин концентрацией 15 мг/л. Отбирали по 1 мл каждого образца полученного кисломолочного продукта и вносили в раствор, имитирующий условия желудка, инкубировали в течении 2 часов при 37 °С. Полученные пробы высевали на среде MRS глубинным способом и культивировали при 37 °С. Подсчет клеток проводили через 42 часа, результаты выражали в Log₁₀ КОЕ/мл.

Сенсорный анализ пробиотических кисломолочных продуктов проводили по ГОСТ 31981–2013 «Йогурты. Общие технические условия» [22].

Количественный учет пробиотических микроорганизмов в кисломолочном продукте при хранении проводили по методике, описанной Frakolaki et al. [18]. Образцы отбирали и анализировали из каждой партии через несколько промежутков времени после производства: 0, 7, 14, 21 день. Образцы кисломолочного продукта разбавляли до 100 мл физиологическим раствором, смешивали в гомогенизаторе и глубинно высевали на MRS агар, инкубировали при 37 °С (45 °С для учета *S. thermophilus*) в течение 48 часов. После инкубации проводили подсчет жизнеспособных пробиотических клеток, с последующим пересчетом на логарифмическое значение колониеобразующих единиц на 1 мл продукта (Log₁₀ КОЕ/мл).

Титруемую кислотность определяли по ГОСТ 31976–2012 [23].

Вязкость определяли с помощью вискозиметра AND A&D Company Limited (Япония) в 50 мл образца кисломолочного продукта при комнатной температуре.

Синерезис определяли методом центрифугирования, описанным Головач [24]. Степень синерезиса рассчитывали по формуле (1):

$$CC = \frac{V_c}{V_{np}} \times 100, \quad (1)$$

где CC – степень синерезиса, %; V_c – объем, выделившейся при центрифугировании сыворотки, мл; V_{np} – объем пробы в центрифужной пробирке, мл.

Все эксперименты были выполнены в трёх повторностях (n = 3). Полученные результаты были выражены как среднее значение ± стандартное отклонение. Дисперсионный анализ (ANOVA) был выполнен с пост-тестом Тьюки, различия считались статистически значимыми при p<0,05, и с использованием программного обеспечения Statistica 8.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

Результаты и обсуждение

1. Оценка жизнеспособности инкапсулированных и свободных клеток в имитированных условиях ЖКТ

Для достижения желаемого эффекта от пробиотиков очень важна жизнеспособность клеток в условиях ЖКТ [25]. Как видно из рисунка 1, спустя 2 часа инкубации в растворе, имитирующем условия желудка, наблюдалось снижение жизнеспособности свободных клеток с 13,13 до значения 2,17 Log₁₀ КОЕ/мл, в то же время инкапсулированные клетки показали высокую выживаемость в этих условиях. Образцы пробиотического кисломолочного продукта с использованием инкапсулированных клеток показали незначительное снижение числа жизнеспособных клеток: на 1,17 логарифмических единиц образец свS+кW+A-П, и на 1,74 логарифмических единицы образец свS+кW+A-П-К. Сравнение количества жизнеспособных свободных и инкапсулированных клеток *W. coagulans* показало значительное различие (p<0,05), что говорит о влиянии капсуляции на выживаемость пробиотических бактерий. Полученные результаты коррелируют с ранее полученными зарубежными данными [26].

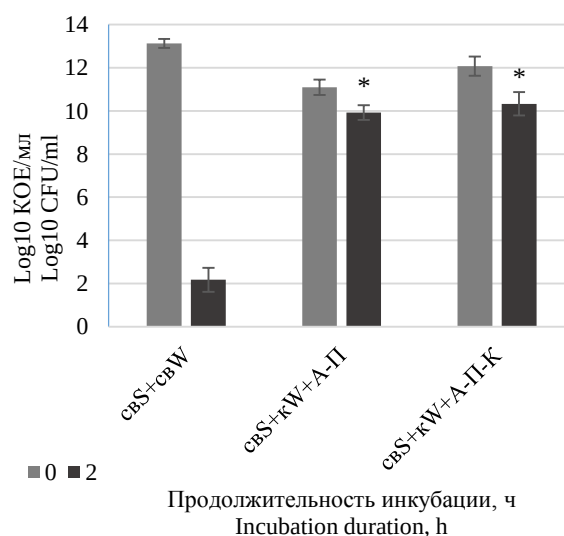


Рисунок 1. Жизнеспособность инкапсулированных и свободных клеток *W. coagulans* в разных образцах пробиотических кисломолочных продуктов после двух часов воздействия условий, имитирующих желудок. * – статистически значимые результаты по отношению к образцу кисломолочного продукта свS+свW (p<0,05)

Figure 1. Viability of encapsulated and free *W. coagulans* cells in different probiotic fermented milk product samples after two hours of exposure to artificial conditions simulating the stomach. * – statistically significant results in relation to the fermented milk product sample freeS+freeW (p<0.05)

2 Сенсорный анализ образцов пробиотического кисломолочного продукта.

Сенсорный анализ образцов кисломолочного продукта, содержащих свободные и инкапсулированные клетки *W. coagulans* проводился сразу после приготовления образцов и спустя 21 сутки хранения при 4 °С. Результаты представлены в таблице 2. Все образцы полученных кисломолочных продуктов сразу после приготовления были молочно-белого цвета, имели достаточно однородную консистенцию

и обладали приятным кисломолочным вкусом и запахом. По истечении 21 дня хранения в образце свS+кW+А-П, содержащем капсулы из смеси альгината и пектина, вкус приобрел сладковатый оттенок. Вкус образца свS+кW+А-П-К с капсулами из альгината пектина и каррагинана стал кисловатым. Изменений остальных показателей отмечено не было. Схожие результаты получили и другие исследователи Kailasapathy и Pour [27, 28].

Таблица 2.

Органолептическая характеристика кисломолочных продуктов

Table 2.

Organoleptic characteristics of fermented milk product

Показатель Indicator	Образец Sample							
	готовый				21 день			
	свS (контроль)	свS+свW	свS+кW+А-П	свS+кW+А-П-К	свS (контроль)	свS+свW	свS+кW+А-П	свS+кW+А-П-К
Внешний вид и консистенция Appearance and consistency	Однородная, с ненарушенным сгустком, с незначительным отделением сыворотки Homogeneous, with an intact clot, with slight separation of serum				Однородная, с ненарушенным сгустком, с незначительным отделением сыворотки Homogeneous, with an intact clot, with slight separation of serum			
Вкус и запах Taste and smell	Чистый, приятный, кисло-молочный	Чистый, кисло-молочный	Чистый, приятный, кисло-молочный	Чистый, приятный, кисло-молочный	Запах приятный, вкус кисло-молочный	Запах и вкус кисло-молочный	Запах кисломолочный, вкус кисломолочный и немного сладковатый	Запах приятный, кисло-молочный, вкус кисловатый
Цвет Color	Однородный, молочно-белый Homogeneous, milky white				Однородный, молочно-белый Homogeneous, milky white			

3 Оценка числа жизнеспособных клеток в кисломолочном продукте при хранении

На протяжении всего процесса хранения происходит изменение ряда физико-химических показателей кисломолочного продукта. Заквасочная культура для кисломолочного продукта *S. thermophilus* даже при охлаждении может продуцировать молочную кислоту вследствие ферментации лактозы, что приводит к снижению pH или к увеличению титруемой кислотности [29]. Как видно из рисунка 2, титруемая кислотность всех образцов кисломолочного продукта возрастает в течение 21 дня хранения и находится в пределах 92–110 °Т и отвечает нормам ГОСТ 31981–2013. Повышение кислотности кисломолочного продукта оказывает влияние на жизнеспособность клеток пробиотиков, это видно на рисунке 3.

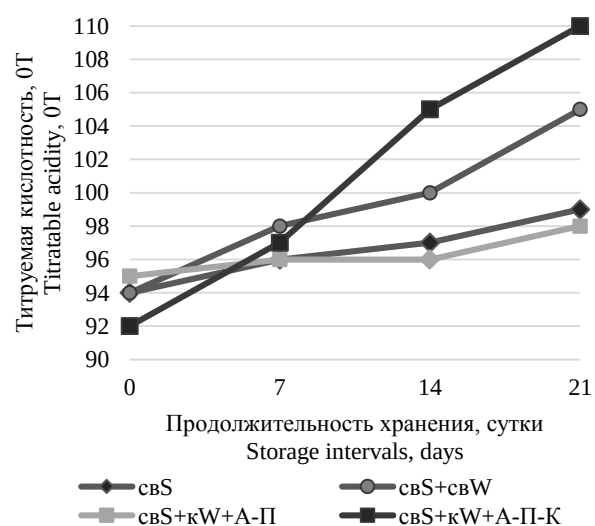


Рисунок 2. Динамика титруемой кислотности образцов кисломолочного продукта в течение 21 дня хранения при 4 °С

Figure 2. Titratable acidity of fermented milk product samples during 21 days of storage at 4 °C

Свободные клетки *W. coagulans* показали более быстрое снижение жизнеспособности до значения 6,10 Log₁₀ КОЕ/мл. Напротив, кисломолочные продукты с капсулированными клетками показали лучшее сохранение числа жизнеспособных клеток, которое к 21 дню хранения составило 9,74 (свS+кW+A-П) и 9,15 (свS+кW+A-П-К) Log₁₀ КОЕ/мл. Повышенная сохранность инкапсулированных культур объясняется тем, что матрица-носитель эффективно защищает клетки от вредного действия кислотности кисломолочного продукта и окислительных процессов [30]. Данные о жизнеспособности свободных и капсулированных клеток культуры *W. coagulans* в других литературных источниках на сегодняшний день отсутствуют.

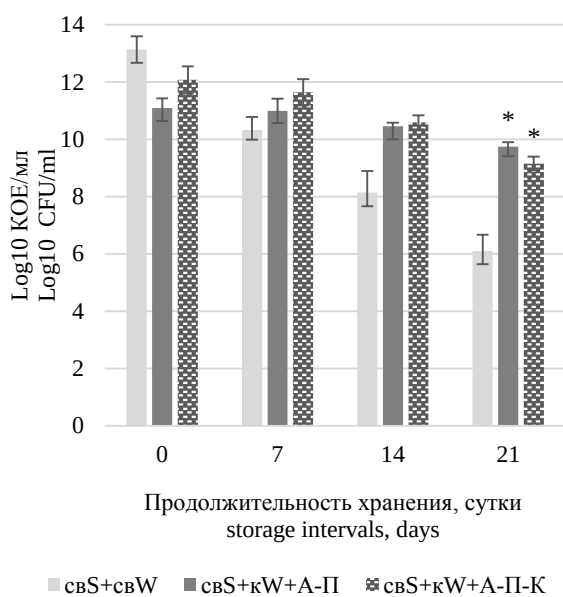


Рисунок 3. Жизнеспособность свободных и инкапсулированных клеток *W. coagulans* в кисломолочном продукте в течение периода хранения (0, 7, 14, 21 день). * – статистически значимый результат по отношению к свободным неинкапсулированным клеткам ($p < 0,05$)

Figure 3. Viability of free and encapsulated *W. coagulans* cells in fermented milk product during storage intervals (0, 7, 14, 21 days). * – statistically significant result in relation to free non-encapsulated cells ($p < 0.05$)

4 Влияние добавления свободных и капсулированных клеток *W. coagulans* на реологические характеристики кисломолочного продукта.

К реологическим характеристикам кисломолочного продукта относят вязкость и синерезис, именно эти показатели определяют консистенцию готового продукта [31]. Вязкость влияет на стабильность и вкус кисломолочного

продукта [32]. Во всех образцах приготовленного кисломолочного продукта наблюдалось снижение вязкости. Наиболее высокая вязкость наблюдалась в контрольном образце, содержащем только свободные клетки *S. thermophilus*, предположительно это связано с выработкой экзополисахаридов (ЭПС), хотя данный показатель не измерялся в данном исследовании. В образце с добавлением свободных клеток *W. coagulans* наблюдалось наименьшее значение вязкости кисломолочного продукта за счет образования кислот, влияющих на структуру образца (рисунок 4).

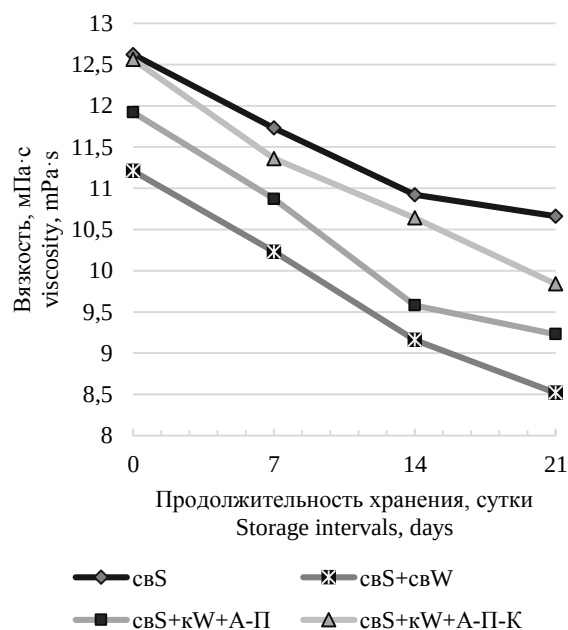


Рисунок 4. Вязкость образцов пробиотического кисломолочного продукта в течение периода хранения (0, 7, 14, 21 день)

Figure 4. Viscosity of probiotic yogurt samples during storage intervals (0, 7, 14, 21 days)

Было установлено, что во всех образцах кисломолочного продукта отмечалось увеличение синерезиса к концу срока хранения (рисунок 5). Высокие показатели синерезиса, вероятно, обусловлены ростом кислотности в результате метаболической активности культуры *S. thermophilus* во время хранения. Наибольшие значения синерезиса наблюдались в образце (свS+свW), это может быть связано с преобразованием твердых веществ кисломолочного продукта в различные метаболиты обоими видами бактерий. Роиш с соавторами также сообщали о более высоких значениях синерезиса в образцах, содержащих свободные клетки в сравнении с капсулированными [28].

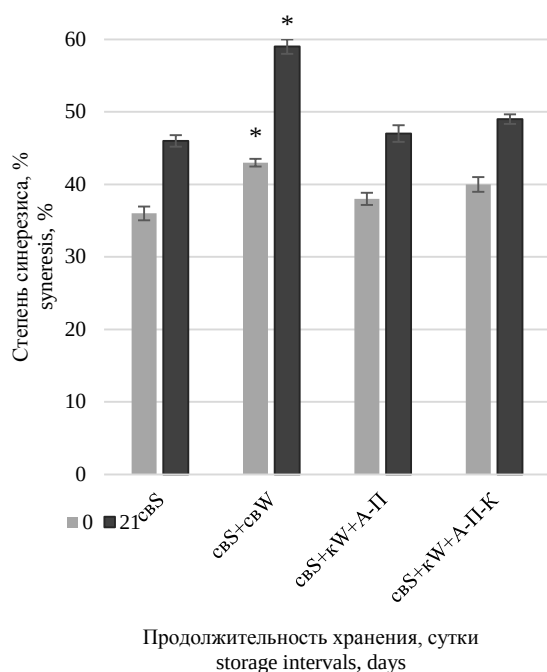


Рисунок 5. Степень синерезиса образцов пробиотического кисломолочного продукта в течение периода хранения (0, 7, 14, 21 день). * – статистически значимый результат по отношению к образцам svS, svS+кW+A-П, svS+кW+A-П-К ($p<0,05$)

Figure 5. Syneresis of probiotic yogurt samples during storage intervals (0, 7, 14, 21 days). * – statistically significant result in relation to samples svS, svS+кW+A-P, svS+кW+A-P-K ($p<0.05$)

Заключение

В ходе исследования было установлено, что капсулированные клетки пробиотической культуры *W. coagulans*, содержащиеся в кисломолочном продукте, показали высокую выживаемость в имитированных условиях ЖКТ в сравнении со свободными клетками. Жизнеспособность пробиотических капсулированных клеток образцов svS+кW+A-П и svS+кW+A-П-К в ходе хранения на протяжении 21 дня снижалась незначительно в сравнении с образцом, содержащим свободные клетки пробиотика, которые оказались более восприимчивы к снижению кислотности кисломолочного продукта. Добавление как капсулированных, так и свободных клеток пробиотика значительно не повлияло на сенсорные показатели готового продукта как сразу после приготовления, так и на конец срока хранения. Добавление капсулированных клеток в сравнении со свободными оказывало значительное влияние на реологические свойства и текстурные характеристики готового кисломолочного продукта. Настоящее исследование может быть полезным для молочной промышленности и поможет сохранить выживаемость пробиотиков на высоком уровне как в готовом продукте, так и после попадания в ЖКТ.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZGW-2024-0003)

Литература

- 1 Binda S., Hill C., Johansen E. et al. Criteria to qualify microorganisms as "probiotic" in foods and dietary supplements // *Frontiers in Microbiology*. 2020. V. 11. P. 1662. doi: 10.3389/fmicb.2020.01662
- 2 Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria: report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation (Córdoba, Argentina, 1-4 October 2001). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001. 56 p.
- 3 Younas S., Murtaza M.A., Manzoor M.S. et al. Effect of probiotic incorporation on physicochemical attributes of yogurt during storage and influence on cholesterol assimilation // *Journal of Food Science*. 2024. V. 89. № 2. P. 1243–1251. doi: 10.1111/1750-3841.16898
- 4 Cichońska P., Kowalska E., Ziarno M. The Survival of Psychobiotics in Fermented Food and the Gastrointestinal Tract: A Review // *Microorganisms*. 2023. V. 11. № 4. P. 996. doi: 10.3390/microorganisms11040996
- 5 Li C., Wang Z.X., Xiao H., Wu F.G. Intestinal delivery of probiotics: materials, strategies, and applications // *Advanced Materials*. 2024. V. 36. № 32. P. e2310174. doi: 10.1002/adma.202310174
- 6 Rodrigues F.J., Cedran M.F., Bicas J.L., Sato H.H. Encapsulated probiotic cells: relevant techniques, natural sources as encapsulating materials and food applications – narrative review // *Food Research International*. 2020. V. 137. P. 109682. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109682
- 7 Pupa P., Apiwatsiri P., Sirichokchatchawan W. et al. The efficacy of three double-microencapsulation methods for preservation of probiotic bacteria // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. P. 13753. doi: 10.1038/s41598-021-93263-z
- 8 Yoha K.S., Nida S., Dutta S. et al. Targeted delivery of probiotics: perspectives on research and commercialization // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2022. V. 14. № 1. P. 15–48. doi: 10.1007/s12602-021-09791-7
- 9 Xie A., Zhao S., Liu Z. et al. Polysaccharides, proteins, and their complex as microencapsulation carriers for delivery of probiotics: A review on carrier types and encapsulation techniques // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. V. 242. P. 124784. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124784
- 10 Mala T., Anal A.K. Protection and controlled gastrointestinal release of bromelain by encapsulating in pectin-resistant starch-based hydrogel beads // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. V. 9. P. 757176. doi: 10.3389/fbioe.2021.757176
- 11 Frakolaki G., Giannou V., Tzia C. Encapsulation of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through emulsification coupled with external gelation for the development of synbiotic systems // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023. V. 15. № 5. P. 1424–1435. doi: 10.1007/s12602-022-09993-7

- 12 Beldarrain-Iznaga T., Villalobos-Carvajal R., Sevillano-Armesto E., Leiva-Vega J. Functional properties of *Lactobacillus casei* C24 improved by microencapsulation using multilayer double emulsion // *Food Research International*. 2021. V. 141. P. 110136. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110136
- 13 Pech-Canul Á., Ortega D., García-Triana A. et al. A brief review of edible coating materials for the microencapsulation of probiotics // *Coatings*. 2020. V. 10. № 3. P. 197. doi: 10.3390/coatings10030197
- 14 Drozdowska M., Piasna-Słupecka E., Such A. et al. Design and in vitro activity of furcellaran/chitosan multilayer microcapsules for the delivery of glutathione and empty model multilayer microcapsules based on polysaccharides // *Materials*. 2024. V. 17. № 9. P. 2047. doi: 10.3390/ma17092047
- 15 Ta L.P., Bujna E., Antal O. et al. Effects of various polysaccharides (alginate, carrageenan, gums, chitosan) and their combination with prebiotic saccharides (resistant starch, lactosucrose, lactulose) on the encapsulation of probiotic bacteria *Lactobacillus casei* 01 strain // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. V. 183. P. 1136–1144. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.04.170
- 16 Сыромятников М.Ю., Шабунин С.В., Козликина А.С. Анализ устойчивости и антагонистической активности пробиотических микроорганизмов, выделенных из молока и молозива коров // *Ветеринарный фармакологический вестник*. 2024. № 1 (26). С. 109–120. doi: 10.17238/issn2541-8203.2024.1.109
- 17 Pyo Y., Kwon K.H., Jung Y.J. Probiotic functions in fermented foods: anti-viral, immunomodulatory, and anti-cancer benefits // *Foods*. 2024. V. 13. № 15. P. 2386. doi: 10.3390/foods13152386
- 18 Frakolaki G., Kekes T., Lympaki F. et al. Use of encapsulated *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through extrusion or emulsification for the production of probiotic yogurt // *Journal of Food Process Engineering*. 2021. V. 45. № 4. P. e13792. doi: 10.1111/jfpe.13792
- 19 Zhang Y., Zhao M., Li Y. et al. Potential probiotic properties and complete genome analysis of *Limosilactobacillus reuteri* LRA7 from dogs // *Microorganisms*. 2024. V. 12. № 9. P. 1811. doi: 10.3390/microorganisms12091811
- 20 Mandal S., Hati S. Microencapsulation of bacterial cells by emulsion technique for probiotic application // *Cell Microencapsulation: Methods and Protocols (Methods in Molecular Biology, vol. 1479)* / Ed. by E. Opara. New York: Humana Press, 2017. P. 283–294. doi: 10.1007/978-1-4939-6364-5_22
- 21 Головач О.С., Бабицкая М.А., Жабанос Н.К., Фурик Н.Н. Оценка реологических характеристик образцов молока, сквашенного штаммами-продуцентами экзополисахаридов (ЭПС) *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophilus*, при различных температурах // *Наука, питание и здоровье: сборник научных трудов XVIII Международной научно-практической конференции (Минск, 2 октября 2020 г.)* / Под общ. ред. З.В. Ловкиса. Минск: Издательский дом «Белорусская наука», 2020. С. 23–27.
- 22 ГОСТ 31981-2013. Продукты кисломолочные. Йогурты. Общие технические условия. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 14 с.
- 23 ГОСТ 31976-2012. Продукты кисломолочные. Метод определения титруемой кислотности. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 8 с.
- 24 Головач О.С., Бабицкая М.А., Жабанос Н.К., Пыжик И.П. Оценка реологических характеристик и уровня синтеза экзополисахаридов (ЭПС) консорциумами *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* при различных температурных режимах ферментации молока // *Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья*. 2020. № 14. С. 58–67. doi: 10.47612/2220-8755-2019-14-58-67
- 25 Alli S.R., Gorbovskaia I., Liu J.C.W. et al. The gut microbiome in depression and potential benefit of prebiotics, probiotics and synbiotics: a systematic review of clinical trials and observational studies // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. V. 23. № 9. P. 4494. doi: 10.3390/ijms23094494
- 26 Suwanangul S., Jaichakan P., Narkprasom N. Innovative insights for establishing a synbiotic relationship with *Bacillus coagulans*: viability, bioactivity, and in vitro-simulated gastrointestinal digestion // *Foods*. 2023. V. 12. № 19. P. 3692. doi: 10.3390/foods12193692
- 27 Kailasapathy K. Survival of free and encapsulated probiotic bacteria and their effect on the sensory properties of yoghurt // *LWT – Food Science and Technology*. 2006. V. 39. № 10. P. 1221–1227. doi: 10.1016/j.lwt.2005.07.013
- 28 Pour H., Marhamatizadeh M., Fattahi H. Encapsulation of different types of probiotic bacteria within conventional/multilayer emulsion and its effect on the properties of probiotic yogurt // *Journal of Food Quality*. 2022. V. 2022. P. 7923899. doi: 10.1155/2022/7923899
- 29 Rezaei K. Effect of refrigerated storage temperature on the viability of probiotic micro-organisms in yogurt // *International Journal of Dairy Technology*. 2007. V. 60. № 2. P. 123–128. doi: 10.1111/j.1471-0307.2007.00311.x
- 30 Afzaal M., Khan A.U., Saeed F. et al. Functional exploration of free and encapsulated probiotic bacteria in yogurt and simulated gastrointestinal conditions // *Food Science & Nutrition*. 2019. V. 7. № 12. P. 3931–3940. doi: 10.1002/fsn3.1254
- 31 Soni R., Jain N.K., Shah V. et al. Development of probiotic yogurt: effect of strain combination on nutritional, rheological, organoleptic and probiotic properties // *Journal of Food Science and Technology*. 2020. V. 57. № 6. P. 2038–2050. doi: 10.1007/s13197-020-04238-3
- 32 Rivera J.A., Matheus A.O. Yogurt making by using probiotics (*Bifidobacterium* spp. and *Lactobacillus acidophilus*) and Inulin // *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*. 2019. V. 26. P. 223–242.

References

- 1 Binda S., Hill C., Johansen E., Obis D., Pot B., Sanders M.E., Tremblay A., Ouwehand A.C. Criteria to qualify microorganisms as "probiotic" in foods and dietary supplements. *Frontiers in Microbiology*. 2020. vol. 11. p. 1662. doi: 10.3389/fmicb.2020.01662
- 2 FAO/WHO. Health and nutritional properties of Probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria. Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation on Evaluation of Health and Nutritional Properties of Probiotics in Food including Powder Milk with Live Lactic Acid Bacteria. Córdoba, Argentina: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.

- 3 Younas S., Murtaza M.A., Manzoor M.S., Arqam U., Ali Z., Hafiz I., Anees Ur Rehman M., Imran M. Effect of probiotic incorporation on physicochemical attributes of yogurt during storage and influence on cholesterol assimilation. *Journal of Food Science*. 2024. vol. 89. no. 2. pp. 1243–1251. doi: 10.1111/1750-3841.16898
- 4 Cichońska P., Kowalska E., Ziarno M. The Survival of Psychobiotics in Fermented Food and the Gastrointestinal Tract: A Review. *Microorganisms*. 2023. vol. 11. no. 4. p. 996. doi: 10.3390/microorganisms11040996
- 5 Li C., Wang Z.X., Xiao H., Wu F.G. Intestinal delivery of probiotics: materials, strategies, and applications. *Advanced Materials*. 2024. vol. 36. no. 32. p. e2310174. doi: 10.1002/adma.202310174
- 6 Rodrigues F.J., Cedran M.F., Bicas J.L., Sato H.H. Encapsulated probiotic cells: relevant techniques, natural sources as encapsulating materials and food applications – narrative review. *Food Research International*. 2020. vol. 137. p. 109682. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109682
- 7 Pupa P., Apiwatsiri P., Sirichokchatchawan W., Pirarat N., Muangsin N., Shah A.A., Prapasarakul N. The efficacy of three double-microencapsulation methods for preservation of probiotic bacteria. *Scientific Reports*. 2021. vol. 11. no. 1. p. 13753. doi: 10.1038/s41598-021-93263-z
- 8 Yoha K.S., Nida S., Dutta S., Moses J.A., Anandharamakrishnan C. Targeted delivery of probiotics: perspectives on research and commercialization. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2022. vol. 14. no. 1. pp. 15–48. doi: 10.1007/s12602-021-09791-7
- 9 Xie A., Zhao S., Liu Z., Yue X., Shao J., Li M., Li Z. Polysaccharides, proteins, and their complex as microencapsulation carriers for delivery of probiotics: A review on carrier types and encapsulation techniques. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. vol. 242. no. 1. p. 124784. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124784
- 10 Mala T., Anal A.K. Protection and controlled gastrointestinal release of bromelain by encapsulating in pectin-resistant starch-based hydrogel beads. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. vol. 9. p. 757176. doi: 10.3389/fbioe.2021.757176
- 11 Frakolaki G., Giannou V., Tzia C. Encapsulation of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through emulsification coupled with external gelation for the development of synbiotic systems. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023. vol. 15. no. 5. pp. 1424–1435. doi: 10.1007/s12602-022-09993-7
- 12 Beldarrain-Iznaga T., Villalobos-Carvajal R., Sevillano-Armesto E., Leiva-Vega J. Functional properties of *Lactobacillus casei* C24 improved by microencapsulation using multilayer double emulsion. *Food Research International*. 2021. vol. 141. p. 110136. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110136
- 13 Pech-Canul Á., Ortega D., García-Triana A., González-Silva N., Solis O., Rosa L. A brief review of edible coating materials for the microencapsulation of probiotics. *Coatings*. 2020. vol. 10. no. 3. p. 197. doi: 10.3390/coatings10030197
- 14 Drozdowska M., Piasna-Słupecka E., Such A., Dziadek K., Krzyściak P., Kruk T., Duraczyńska D., Morawska-Tota M., Jamróz E. Design and in vitro activity of furcellaran/chitosan multilayer microcapsules for the delivery of glutathione and empty model multilayer microcapsules based on polysaccharides. *Materials*. 2024. vol. 17. no. 9. p. 2047. doi: 10.3390/ma17092047
- 15 Ta L.P., Bujna E., Antal O., Ladányi M., Juhász R., Szécsi A., Kun S., Sudheer S., Gupta V.K., Nguyen Q.D. Effects of various polysaccharides (alginate, carrageenan, gums, chitosan) and their combination with prebiotic saccharides (resistant starch, lactosucrose, lactulose) on the encapsulation of probiotic bacteria *Lactobacillus casei* 01 strain. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. vol. 183. pp. 1136–1144. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.04.170
- 16 Syromyatnikov M.Yu., Shabunin S.V., Kozlikina A.S. et al. Analysis of stability and antagonistic activity of probiotic microorganisms isolated from cow's milk and colostrum. *Veterinary Pharmacological Bulletin*. 2024. no. 1. doi: 10.17238/issn2541-8203.2024.1.109 (in Russian)
- 17 Pyo Y., Kwon K.H., Jung Y.J. Probiotic functions in fermented foods: anti-viral, immunomodulatory, and anti-cancer benefits. *Foods*. 2024. vol. 13. no. 15. p. 2386. doi: 10.3390/foods13152386
- 18 Frakolaki G., Kekes T., Lympaki F., Giannou V., Tzia C. Use of encapsulated *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through extrusion or emulsification for the production of probiotic yogurt. *Journal of Food Process Engineering*. 2021. vol. 44. no. 12. p. e13792. doi: 10.1111/jfpe.13792
- 19 Zhang Y., Zhao M., Li Y., Liang S., Li X., Wu Y., Li G. Potential probiotic properties and complete genome analysis of *Limosilactobacillus reuteri* LRA7 from dogs. *Microorganisms*. 2024. vol. 12. no. 9. p. 1811. doi: 10.3390/microorganisms12091811
- 20 Mandal S., Hati S. Microencapsulation of bacterial cells by emulsion technique for probiotic application. *Cell Microencapsulation. Methods in Molecular Biology*. vol. 1479. Ed. by E. Opara. New York: Humana Press, 2017. pp. 299–313. doi: 10.1007/978-1-4939-6364-5_22
- 21 Golovach O.S., Babitskaya M.A., Zhabanos N.K., Furik N.N. Evaluation of rheological characteristics of milk samples fermented with exopolysaccharide-producing strains of *Streptococcus salivarius* ssp. *Thermophilus* at various temperatures. *Science, Nutrition and Health: collection of scientific papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference (Minsk, October 02, 2020)*. Ed. by Z.V. Lovkis. Minsk: Publishing House "Belarusian Science", 2020. pp. 23–27. (in Russian)
- 22 State Standard 31981-2013. Yogurts. General Specifications. Moscow: Standartinform, 2014. (in Russian)
- 23 State Standard 31976-2012. Yogurts and yogurt products. Potentiometric method for determining titratable acidity. Moscow: Standartinform, 2013. (in Russian)
- 24 Golovach O.S., Babitskaya M.A., Zhabanos N.K., Pyzhik I.P. Evaluation of rheological characteristics and level of exopolysaccharide synthesis by consortia of *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* at different milk fermentation temperature regimes. *Actual Issues of Meat and Milk Raw Material Processing*. 2020. no. 14. pp. 58–67. doi: 10.47612/2220-8755-2019-14-58-67 (in Russian)
- 25 Alli S.R., Gorbovskaia I., Liu J.C.W., Kolla N.J., Brown L., Müller D.J. The gut microbiome in depression and potential benefit of prebiotics, probiotics and synbiotics: a systematic review of clinical trials and observational studies. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. vol. 23. no. 9. p. 4494. doi: 10.3390/ijms23094494
- 26 Suwanangul S., Jaichakan P., Narkprasom N. Innovative insights for establishing a synbiotic relationship with *Bacillus coagulans*: viability, bioactivity, and in vitro-simulated gastrointestinal digestion. *Foods*. 2023. vol. 12. no. 19. p. 3692. doi: 10.3390/foods12193692

- 27 Kailasapathy K. Survival of free and encapsulated probiotic bacteria and their effect on the sensory properties of yoghurt. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*. 2006. vol. 39. no. 10. pp. 1221–1227. doi: 10.1016/j.lwt.2005.07.013
- 28 Pour H., Marhamatizadeh M., Fattahi H. Encapsulation of different types of probiotic bacteria within conventional/multilayer emulsion and its effect on the properties of probiotic yogurt. *Journal of Food Quality*. 2022. vol. 2022. p. 7923899. doi: 10.1155/2022/7923899
- 29 Rezaei K. Effect of refrigerated storage temperature on the viability of probiotic micro-organisms in yogurt. *International Journal of Dairy Technology*. 2007. vol. 60. no. 2. pp. 123–128. doi: 10.1111/j.1471-0307.2007.00320.x
- 30 Afzaal M., Khan A.U., Saeed F., Ahmed A., Ahmad M.H., Maan A.A., Tufail T., Anjum F.M., Hussain S. Functional exploration of free and encapsulated probiotic bacteria in yogurt and simulated gastrointestinal conditions. *Food Science & Nutrition*. 2019. vol. 7. no. 12. pp. 3931–3940. doi: 10.1002/fsn3.1254
- 31 Soni R., Jain N.K., Shah V., Soni J., Suthar D., Gohel P. Development of probiotic yogurt: effect of strain combination on nutritional, rheological, organoleptic and probiotic properties. *Journal of Food Science and Technology*. 2020. vol. 57. no. 6. pp. 2038–2050. doi: 10.1007/s13197-020-04238-3
- 32 Rivera J.A., Matheus A.O. Yogurt making by using probiotics (*Bifidobacterium* spp. and *Lactobacillus acidophilus*) and Inulin. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*. 2019. vol. 26. no. 1. pp. 223–242. doi: 10.4314/rf.v26i1

Сведения об авторах

Анна А. Толкачева старший преподаватель, кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, anna-biotech@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0725-6482>

Нина А. Прякина младший научный сотрудник, лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nekrasovaninetya@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0434-3839>

Ольга В. Зверева старший преподаватель, кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, bond.vrn15@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7051-9858>

Екатерина В. Богданова д.т.н., профессор, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ek-v-b@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5053-2273>

Юлия П. Кузнецова младший научный сотрудник, лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, teplovamart@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0001-6701-3039>

Михаил Ю. Сыромятников к.б.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mihan.vrn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9028-0613>

Ольга С. Корнеева д.б.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, korneeva-olgas@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2863-0771>

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

Anna A. Tolkacheva senior lecturer, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, anna-biotech@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0725-6482>

Nina A. Pryakhina junior researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, nekrasovaninetya@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0434-3839>

Olga V. Zvereva Senior lecturer, Department of Biochemistry and Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, bond.vrn15@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7051-9858>

Ekaterina V. Bogdanova Dr Sci. (Tech.), Professor, Department of Technology of Animal Products, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ek-v-b@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5053-2273>

Yulia P. Kuznetsova Junior researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, teplovamart@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0001-6701-3039>

Mikhail Y. Syromyatnikov PhD (Biol.), Leading Researcher, Laboratory of Metagenomics and Food Biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mihan.vrn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9028-0613>

Olga S. Korneeva Dr Sci. (Biol.), Professor Vice-Rector for Research and Innovation, Voronezh State University of Engineering Technologies, 19 Revolution Av., Voronezh, 394036, Russia, korneeva-olgas@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2863-0771>

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 10/11/2025	После редакции 26/11/2025	Принята в печать 17/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 26/11/2025	Accepted 17/12/2025

Определение биологически активных веществ в зерне пшеницы и чечевицы

Наталья Л. Чернопольская	¹	nl.chernopolskaya@omgau.org	 0000-0003-1359-9190
Сергей А. Коновалов	¹	sa.konovalova@omgau.org	 0000-0003-3537-8081
Константин К. Полянский	^{2,3}	mto.vrn@mail.ru	 0000-0002-8817-1466
Ольга В. Скрябина	¹	ov.skryabina@omgau.org	 0000-0003-2700-6683
Юлия А. Подольникова	¹	yua.podolnikova@omgau.org	 0000-0002-4132-6045
Дина С. Рябкова	¹	ds.ryabkova@omgau.org	 0000-0002-6605-3485

¹ Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

³ Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса. 67А, Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. В статье представлен обзор современных методов определения биологически активных соединений в сельскохозяйственном сырье растительного происхождения, охватывающий спектр аналитических подходов — от классических химических и титриметрических методов до высокоэффективных инструментальных техник, включая высокоэффективную жидкостную хроматографию, масс-спектрометрию. Целью исследований являлось проведение анализа существующих методов и выявление наиболее целесообразного для определения биологически активных веществ в исследуемом сельскохозяйственном сырье. Для проведения исследований выбраны образцы пшеницы и чечевицы, выращиваемые в Омской области, модифицированные методами биофортификации, в частности селекцией. Анализ и сравнительная оценка доступных методик позволили обоснованно выбрать наиболее простой и точный метод количественного определения биологически активных веществ в исследуемом сырье, адаптированный к специфике его химического состава — метод определения суммарного содержания фенольных соединений, позволяющий получать более точные данные, а также повысить безопасность работы при сокращении времени экстракции. Это формирует предпосылки для его широкого применения в пищевой промышленности. Согласно полученным данным, исследуемые образцы отличаются высокой белковой ценностью. Итогом стало количественное определение фенольных соединений на начальном этапе в образцах модифицированного растительного сырья. Результаты подчёркивают, что пигментированные сорта зерновых и бобовых обладают повышенной нутриентной и биологической ценностью по сравнению с традиционными и могут быть использованы в качестве функционального сырья при разработке функциональных и специализированных продуктов питания и биологически активных компонентов. Полученные данные по содержанию двух ключевых компонентов — белка и фенольных соединений — могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на изучение взаимодействия этих веществ в составе модифицированного сырья. Проведение данных исследований является первой ступенью комплексного эксперимента в рамках разработки многокомпонентного биологически активного компонента — нутрицевтика. Обзор представляет интерес для исследователей, аналитиков и специалистов в области пищевой отрасли, стремящихся к надёжному и эффективному контролю содержания биологически активных веществ в сырье и производству функциональных продуктов питания и биологически активных веществ.

Ключевые слова: метод, биологически активные соединения, сырье, фенольные соединения, модификация.

Review of methods for determining biologically active compounds in agricultural raw materials

Natalia L. Chernopolskaya	¹	nl.chernopolskaya@omgau.org	 0000-0003-1359-9190
Sergey A. Konovalov	¹	sa.konovalova@omgau.org	 0000-0003-3537-8081
Konstantin K. Polyansky	^{2,3}	mto.vrn@mail.ru	 0000-0002-8817-1466
Olga V. Skryabina	¹	ov.skryabina@omgau.org	 0000-0003-2700-6683
Yulia A. Podolnikova	¹	yua.podolnikova@omgau.org	 0000-0002-4132-6045
Dina S. Ryabkova	¹	ds.ryabkova@omgau.org	 0000-0002-6605-3485

¹ Omsk State Agrarian University named after. P.A. Stolypina, st. Institutskaya sq., 1, Omsk, 644008, Russia

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

³ Voronezh Branch of the Plekhanov Russian University of Economics, Karl Marx. 67A, Voronezh, 394030, Russia

Для цитирования

Чернопольская Н.Л., Коновалов С.А., Полянский К.К., Скрябина О.В., Подольникова Ю.А., Рябкова Д.С. Определение биологически активных веществ в зерне пшеницы и чечевицы // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 149–158. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-149-158

For citation

Chernopolskaya N.L., Konovalov S.A., Polyansky K.K., Skryabina O.V., Podolnikova Yu.A., Ryabkova D.S. Review of methods for determining biologically active compounds in agricultural raw materials. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 149–158. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-149-158

Abstract. This article presents an overview of modern methods for determining biologically active compounds in plant-based agricultural raw materials, covering a range of analytical approaches - from classical chemical and titrimetric methods to highly effective instrumental techniques, including high-performance liquid chromatography and mass spectrometry. The aim of the study was to analyze existing methods and identify the most appropriate one for determining biologically active substances in the studied agricultural raw materials. Wheat and lentil samples grown in the Omsk region, modified by biofortification methods, in particular, selection, were selected for the study. An analysis and comparative evaluation of available methods allowed for the justified selection of the simplest and most accurate method for the quantitative determination of biologically active substances in the studied raw materials, adapted to the specific chemical composition of the raw materials. This method, which determines the total content of phenolic compounds, allows for more accurate data and increases operational safety while reducing extraction time. This creates the preconditions for its widespread use in the food industry. According to the data obtained, the studied samples are distinguished by their high protein value. The result was the quantitative determination of phenolic compounds at the initial stage in samples of modified plant raw materials. The results emphasize that pigmented varieties of grains and legumes possess increased nutrient and biological value compared to traditional ones and can be used as functional raw materials in the development of functional and specialized foods and biologically active components. The obtained data on the content of two key components - protein and phenolic compounds - can serve as a basis for further research aimed at studying the interaction of these substances in modified raw materials. Conducting these studies is the first step in a comprehensive experiment as part of the development of a multicomponent biologically active component - a nutraceutical. This review is of interest to researchers, analysts, and food industry specialists striving for reliable and effective control of the content of biologically active substances in raw materials and the production of functional foods and biologically active substances.

Keywords: method, biologically active compounds, raw materials, flavonoids, modification.

Введение

Основным инструментом государственного регулирования агропромышленного рынка выступают специальные целевые программы. В рамках «Стратегии научно-технического развития Российской Федерации» утв. 01 декабря 2016 г. № 642 [1], одним из приоритетных направлений исследований является создание технологий, продуктов и услуг, не только отвечающих национальным интересам Российской Федерации и необходимых для существенного повышения качества жизни населения, но востребованных в мире и в рамках концепции бережливого производства [2, 3].

Современные тенденции в питании обусловили необходимость целенаправленной разработки новых пищевых продуктов на основе высокодисперсных частиц с узким фракционным составом. В связи с чем развиваются исследования, направленные на выявление связи между структурой пищевых систем – от нано- и супрамолекулярного уровня до более крупных агрегатов – и их функциональными свойствами.

В то же время популяризируется применение наноразмерных пищевых добавок и обогащённых ими продуктов. Исследования показывают, что как в самих добавках, так и в конечных продуктах их введение на наноуровне приводит к существенному изменению физико-химических и функциональных свойств [21].

Постоянно расширяющийся ассортимент специализированной пищевой продукции стимулирует развитие и совершенствование технологий получения концентратов биологически активных веществ растительного происхождения, предназначенных для использования в качестве функциональных пищевых ингредиентов. Поскольку содержание минорных биологически активных веществ в растительном сырье, невелико,

возникает необходимость в их целенаправленном выделении и концентрировании для эффективного включения в составы продуктов специализированного назначения.

С целью максимального извлечения биологически активных веществ из сельскохозяйственного сырья используют их различные модификации. Также, весь процесс извлечения данных веществ проходит в рамках бережливого производства, что позволяет получить качественное и безопасное сырье, используемое в структуре нутрицевтика [4–6].

Биологически активные органические соединения – это органические соединения, которые особым образом воздействуют на биологические системы, такие как животные, растения или микроорганизмы, в том числе на человека. Одним из биологических соединений являются фенольные соединения – это вещества, содержащие в своей молекуле ароматическое (бензольное) кольцо, которое несет одну, две или более гидроксильных групп [7].

Фенольные соединения часто называют растительными фенолами из-за того, что большая часть ароматических природных производных включает в структурную формулу фенольную функцию либо образуется из фенольных соединений и продуцируется растениями [8, 9].

Связь белков с флавоноидами активно изучается и заключается в их взаимодействии, где флавоноиды могут влиять на функции белков, а белки могут влиять на усвоение флавоноидов. Флавоноиды могут ингибировать или активировать ферменты, блокировать рецепторы, тем самым регулируя клеточные сигнальные пути. Кроме того, флавоноиды могут образовывать комплексы с белками. Поэтому исследования количества белка в исследуемых образцах является

значимой частью, для выявления конкретизации образуемого комплекса и влияния на дальнейшие этапы [10].

Фенольная функция наиболее распространена среди ароматических производных бензольного ряда (нафталиновые и антраценовые соединения с фенольными функциями распространены в несколько меньшей степени).

Основными местами синтеза фенольных соединений являются пластиды, митохондрии, эндоплазматический ретикулум, местами их внутриклеточной локализации – вакуоли, клеточная стенка. Установленным является факт, что значительная доля усвоенного при фотосинтезе углерода используется на образование ароматических аминокислот и их производных. Такие ароматические аминокислоты как фенилаланин, триптофан и тирозин не только важны для синтеза белка, но и служат предшественниками тысяч специфических соединений, влияющих на рост растений, их развитие, размножение и адаптацию [11, 12].

Фенольные соединения можно классифицировать по следующим признакам (рисунок 1).

По структуре By structure	• фенолы phenols • флавоноиды flavonoids • лигнаны lignans
По числу ароматических ядер By number of aromatic nuclei	• фенолы phenols • нафтолы naphthols • антролы anthrols
По числу гидроксильных групп By number of hydroxyl groups	• аренолы и арендиолы arenols and arendiols • арентриолы и полифенолы arenetriols and polyphenols

Рисунок 1. Классификация фенольных соединений
Figure 1. Classification of phenolic compounds

Одним из самых больших классов являются флавоноиды, основу которых составляет скелет, имеющий два ароматических кольца, связанных тремя углеродными атомами. Образование флавоноидных соединений является особенностью высших растений и не свойственно грибам, лишайникам и микроорганизмам. Флавоноиды неравномерно распределяются в растениях – в основном содержатся в листьях, цветках, плодах, меньше в стеблях и подземных органах. В клетках флавоноиды накапливаются в вакуолях в виде гликозидов. Свободные флавоноиды находятся в специальных образованиях: смоляные и эфиромасляные ходы, каналы, железки и т. д. В надземных частях растений 85% флавоноидов локализовано в клетках эпидермы и только 15% в остальных тканях [10, 12].

Функции фенольных соединений в растениях (рисунок 2):



Рисунок 2. Функции фенольных соединений в растениях
Figure 2. Functions of phenolic compounds in plants

В организме человека и животных (рисунок 3):

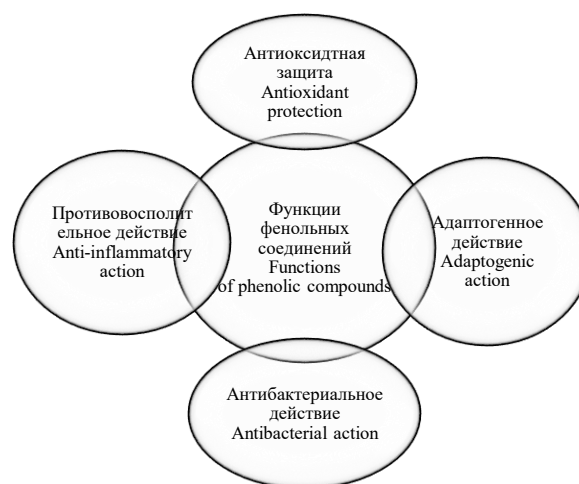


Рисунок 3. Функции фенольных соединений в организме человека и животных

Figure 3. Functions of phenolic compounds in the body of humans and animals

Условно методы для определения фенольных соединений в сельскохозяйственном сырье подразделяются на несколько групп (рисунок 4).



Рисунок 4. Методы определения фенольных соединений в сельскохозяйственном сырье

Figure 4. Methods for determining biologically active substances in agricultural raw materials

Общее содержание фенольных соединений в образце определяют колориметрическим методом с использованием реактива Фолина–Чокальтеу. Для этого сначала готовят экстракт: исследуемый образец обрабатывают растворителем, состоящим из метанола, соляной кислоты и воды в заданном соотношении, затем декантируют, центрифугируют и хранят полученный раствор при температуре -20°C до анализа. Перед измерением готовят реакционную смесь, в которую последовательно добавляют дистиллированную воду, экстракт, раствор карбоната натрия (Na_2CO_3) и реактив Фолина–Чокальтеу. После инкубации оптическую плотность полученной смеси измеряют спектрофотометрически при длине волны 725 нм.

Для количественной оценки строят калибровочный график на основе стандартных растворов галловой кислоты. Наклон калибровочной зависимости рассчитывают в программе Excel как отношение известных концентраций галловой кислоты к соответствующим средним значениям оптической плотности. Результаты анализа выражают в миллиграммах эквивалентов галловой кислоты на единицу массы или объема образца (мг GAE/г или мг GAE/мл) [13].

Экстракцию биологически активных веществ из растительного сырья можно осуществлять с использованием нескольких методов:

Экстракция в аппарате Сокслета (перколяция) – с применением различных растворителей высокой чистоты (марки ХЧ): ацетона, 96%-ного этанола, хлороформа, а также дистиллированной воды.

Мацерация – проводится с этанолом различной концентрации; продолжительность процесса варьируется от 30 до 120 минут.

Микроволновая экстракция – выполняется с использованием 96%-ного этанола при удельной мощности СВЧ-поля 350 Вт/ч; режимы обработки (модуль и длительность в минутах) подбираются индивидуально.

Сверхкритическая флюидная экстракция (СКФЭ) – осуществляется на установке SFE 5000 (Waters, США) с использованием диоксида углерода в качестве экстрагента. Навеску сырья помещают в экстракционный автоклав, нагревают до 80°C , после чего проводят экстракцию при заданном давлении, скорости потока CO_2 и определённой продолжительности (в минутах). В качестве сорастворителя добавляют этанол.

Содержание сухих веществ в полученных экстрактах определяют гравиметрическим методом. В состав этих сухих остатков входят низкомолекулярные фенольные соединения, флавоноиды, антрагликозиды и другие биологически активные компоненты [14, 15].

С целью изучения влияния температуры на эффективность экстракции проводили серию экспериментов по извлечению флавоноидов и каротиноидов в диапазоне температур от 20 до 100°C . Растительное сырьё и экстрагент использовали в соотношении, обеспечивающем максимальную экстракцию, и выдерживали в течение одного часа при различных температурах, включая режим кипячения. Степень извлечения оценивали по концентрации полученных экстрактов.

Результаты показали, что повышение температуры способствует незначительному увеличению выхода целевых соединений, при этом наиболее полное извлечение красящих веществ – флавоноидов и каротиноидов – достигается именно при кипячении. В этих условиях сырьё и экстрагент в соотношении 1:3 подвергают кипячению в колбе с обратным холодильником в течение заданного времени, после чего определяют концентрацию пигментов в экстракте.

Установлено, что концентрация флавоноидов и каротиноидов в экстракте сначала возрастает с увеличением продолжительности кипячения, а затем достигает плато, оставаясь практически неизменной при дальнейшем увеличении времени обработки [16].

Для анализа компонентного состава полученных экстрактов широко применяют метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Хроматографическое разделение проводят на колонке размером 75×2 мм с использованием градиентного элюирования: подвижная фаза состоит из воды и ацетонитрила, при этом концентрация ацетонитрила плавно увеличивается от 0 до 100% в течение 30 минут.

Идентификацию отдельных компонентов осуществляют путём сравнения их хроматографических характеристик с таковыми у внутренних эталонов, включая стандартные образцы органических кислот, лютеолина, рутина, кверцетина и других известных соединений.

Следует понимать, что хроматограммы представляют собой как минимум 18 отдельных пиков, определения которых в полной мере заложены в настоящее время, что обусловлено стандартными образцами [17, 18].

Также возможна экстракция фенольных соединений 96%-ным этанолом из замороженного жидким азотом и измельченного растительного материала. Гомогенат центрифугируют. Надосадочную жидкость отделяют и используют для одновременного определения суммарного содержания фенольных соединений с реактивами Фолина–Дениса и Фолина–Чокальтеу. Содержание фенольных соединений в растительном материале выражают в мг-экв. галловой кислоты / г сырой массы [22].

Известен способ определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных объектах, заключающийся в их измельчении, экстрагировании в этаноле при добавлении к экстракту реактива Фолина-Чокальтеу и углекислого натрия и последующем измерении на спектрофотометре при длине волны 725 нм. [19].

Все представленные методы применяются для количественного определения фенольных соединений в растительном сырье и различаются по таким параметрам, как масса навески, способ экстрагирования, а также состав реактивов и используемое оборудование.

Материалы и методы

Целью исследования является проведение анализа существующих методов и выявление наиболее целесообразного для определения биологически активных веществ в исследуемом сельскохозяйственном сырье.

Объектами исследования являлись образцы сельскохозяйственного сырья – пшеницы и чечевицы Омской области, модифицированные методами биофортификации, в частности селекцией.

Методом, используемым для определения количества фенольных соединений выбран – метод определения суммарного содержания фенольных соединений [20], позволяющий повысить безопасность работы при сокращении времени экстракции. Навеску измельченного растительного сырья массой 0,1 г помещали в пробирку и добавляли 3 см³ 96%-ного этанола. Экстракцию фенольных соединений проводили при 45 °С в течение 45 минут с периодическим перемешиванием. По завершении экстракции образцы центрифугировали 2 минуты при 16 000 об/мин.

Из полученного экстракта отбирали аликвоту объемом 0,3 см³ и переносили в чистую пробирку. К ней добавляли 0,3 см³ реактива Фолина-Чокальтеу, предварительно разведенного в 5 раз, и тщательно перемешивали. Через 3 минуты вносили 0,6 см³ 20%-ного раствора карбоната натрия (Na₂CO₃) и 4,8 см³ дистиллированной воды, после чего пробирку плотно закрывали, перемешивали и выдерживали при комнатной температуре в течение 1 часа.

По истечении этого времени оптическую плотность раствора измеряли спектрофотометрически при длине волны 725 нм. Для количественного определения строили калибровочную кривую на основе стандартных растворов галловой кислоты. Результаты выражали в миллиграммах галловой кислоты на 100 граммов продукта.

Количество белка определяли с использованием общепринятого метода Кьельдаля в соответствии с ГОСТ 10846–91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка».

Данный метод позволяет эффективно оценивать массовую долю белка и общее содержание азота в исследуемых образцах. Суть метода заключается в следующем: органический азот, содержащийся в пробе, при минерализации в присутствии концентрированной серной кислоты и под действием нагревания количественно превращается в сульфат аммония. Затем к полученному раствору добавляют щелочь, в результате чего выделяется аммиак, который отгоняют с помощью перегонки. Выделенный аммиак улавливают в стандартный раствор кислоты и определяют его количество титриметрически. Содержание белка рассчитывают по содержанию азота с использованием стандартного пересчетного коэффициента 6,25, принятого для большинства растительных белков.

Эксперимент проводился в трёхкратной повторности для каждого из исследуемых образцов. На первом этапе было определено содержание белка в образцах модифицированного растительного сырья – пшеницы и чечевицы, выращиваемых в Омской области, модифицированных методами биофортификации, в частности селекцией.

При анализе полученных данных исследования количества белка в образцах пшеницы установлено, что наибольшая массовая доля белка получена в образце – фиолетовозерной пшеницы и составила 13,23%. В образцах чечевицы наибольшая массовая доля белка определена в черной чечевице и составила 28,32%. Полученные данные свидетельствуют, что из выбранных для исследования образцов сельскохозяйственного сырья наибольшая массовая доля белка содержится в фиолетовозерной пшенице и черной чечевице.

Результаты определения суммарного содержания фенольных соединений, в образцах сельскохозяйственного сырья представлены в таблицах 3 и 4 соответственно. Наибольшее количество данных соединений содержится в образце фиолетовозерной пшеницы – 328 мг GAE/100 г продукта.

Содержание фенольных соединений в черной чечевице Рубиновая составляет 110 мг GAE/100 г продукта, что превышает показатели других образцов чечевицы более чем в два раза.

Полученные результаты, позволяют рассматривать данное сырье в качестве источников извлечения биологически активных веществ и включения их в составы продуктов специализированного назначения.

По совокупности полученных данных установлено, что наибольшее содержание фенольных соединений выявлено в образцах

коричнево-красной чечевицы Рубиновая и фиолетовозерной пшеницы. Что, вероятно, обусловлено высокой концентрацией антоцианов и других фенольных пигментов, характерных для тёмноокрашенных сортов зернобобовых и злаковых культур, которые вносят значительный

вклад в общую фенольную активность. Полученные результаты согласуются с литературными данными, указывающими на то, что пигментированные формы зерновых и бобовых, как правило, обладают более высоким уровнем вторичных метаболитов по сравнению со светлыми сортами.

Таблица 1.

Количество белка в образцах пшеницы

Table 1.

The amount of protein in wheat samples

Образец Sample	Серия экспериментов Experiments	Массовая доля белка, % Protein mass fraction, %	Массовая доля белка, % Protein mass fraction, %
1	1	13,15	13,23 ± 0,11
	2	13,32	
	3	13,23	
2	1	12,55	12,53 ± 0,12
	2	12,46	
	3	12,58	
3	1	12,05	12,05 ± 0,11
	2	12,06	
	3	12,04	

Источник: составлено авторами по результатам собственного проведенного эксперимента в рамках Гранта

Таблица 2.

Количество белка в образцах чечевицы

Table 2.

Protein content in lentil samples

Образец Sample	Серия экспериментов Experiments	Массовая доля белка, % Protein mass fraction, %	Массовая доля белка, % Protein mass fraction, %
Опыт 1 (чечевица Татьяна зелёная крупная)	1	23,43	23,53 ± 0,13
	2	23,51	
	3	23,66	
Опыт 2 (чечевица ALP Linsen коричневая с пятнами)	1	22,15	22,17 ± 0,12
	2	22,18	
	3	22,17	
Опыт 3 (чечевица черная)	1	28,34	28,32 ± 0,11
	2	28,31	
	3	28,32	
Опыт 4 (чечевица Рубиновая коричнево-красная)	1	24,57	24,55 ± 0,11
	2	24,58	
	3	24,51	

Источник: составлено авторами по результатам собственного проведенного эксперимента в рамках Гранта

Таблица 3.

Суммарное содержание фенольных соединений в образцах пшеницы в мг GAE/100 г. продукта

Table 3.

Total content of phenolic compounds in wheat samples in mg GAE/100 g of product

Образец Sample	Серия экспериментов Experiments	Содержание фенольных соединений в мг GAE/100г продукта Phenolic compound content in mg GAE/100g of product	Среднее содержание фенольных соединений в мг GAE/100г продукта Average phenolic compound content in mg GAE/100g of product
1	1	328	328 ± 16
	2	329	
	3	328	
2	1	185	185 ± 9
	2	184	
	3	186	
3	1	192	192 ± 10
	2	193	
	3	191	

Источник: составлено авторами по результатам собственного проведенного эксперимента в рамках Гранта

Таблица 4.

Суммарное содержание фенольных соединений в образцах чечевицы в мг GAE/100г продукта

Table 4.

Total content of phenolic compounds in lentil samples in mg GAE/100 g of product

Образец	Серия экспериментов Experiments	Содержание фенольных соединений в мг GAE/100г продукта Phenolic compound content in mg GAE/100g of product	Среднее содержание фенольных соединений в мг GAE/100г продукта Average phenolic compound content in mg GAE/100g of product
1	1	106	105 ± 6
	2	105	
	3	105	
2	1	102	102 ± 5
	2	101	
	3	103	
3	1	98	98 ± 5
	2	99	
	3	97	
4	1	110	110 ± 6
	2	109	
	3	111	
Источник: составлено авторами по результатам собственного проведенного эксперимента в рамках Гранта			

Заключение

Извлечение биологически активных веществ из модифицированного сельскохозяйственного сырья представляет собой один из ключевых этапов в создании функциональных продуктов питания.

Анализ и сравнительная оценка доступных методик позволили обоснованно выбрать наиболее простой и точный метод количественного определения биологически активных веществ в модифицированном сельскохозяйственном сырье, произрастающем в Омской области, адаптированный к специфике химического состава данного вида сырья. Что формирует предпосылки для его широкого применения в пищевой промышленности.

Согласно полученным данным, исследуемые образцы модифицированного сельскохозяйственного сырья отличаются высокой белковой ценностью. Фиолетовозерная пшеница демонстрирует повышенное содержание белка (13,23%) по сравнению с традиционными сортами пшеницы, что позволяет отнести её к перспективному сырью для производства функциональных и обогащённых продуктов питания. Чёрная чечевица подтверждает статус одного из самых богатых растительных источников белка (28,32%), превосходя многие бобовые культуры. Что особенно актуально в контексте развивающегося спроса на альтернативные белки

в растительных диетах. Оба исследуемых образца могут быть рекомендованы в качестве ценных источников сырья для разработки специализированных пищевых продуктов и биологически активных компонентов.

Так же определено, что исследуемые образцы (опыт 1 (пшеница фиолетовозерная) и Опыт 4 (чечевица Рубиновая коричнево-красная)) отличаются повышенным содержанием фенольных соединений. Фиолетовозерная пшеница содержит значительное количество фенольных соединений – 328 мг GAE/100 г. продукта, что указывает на её высокую антиоксидантную активность. Чечевица Рубиновая коричнево-красная также выделяется среди других сортов чечевицы по содержанию фенольных веществ (110 мг GAE/100г продукта), что значительно превышает аналогичные показатели у других образцов.

Результаты подчёркивают, что пигментированные сорта зерновых и бобовых обладают повышенной нутриентной и биологической ценностью по сравнению с традиционными и могут быть использованы в качестве функционального сырья при разработке функциональных и специализированных продуктов питания и биологически активных компонентов.

Благодарности

Аналитическое исследование, связанное с подготовкой рукописи, выполнено при финансировании Российского научного фонда (грант 25–16–20041), <https://www.rscf.ru/project/25-16-20041/>

Литература

- 1 Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71551998/> (дата обращения: 15.11.2025).
- 2 Давыдова Н.С., Гращенкова Н.В. Система менеджмента бережливого производства и устойчивость лин-трансформаций // Новые технологии. 2021. Т. 17. № 2. С. 121–130. doi: 10.47370/2072-0920-2021-17-2-121-130
- 3 Чернопольская Н.Л., Скрябина О.В., Рябкова Д.С. Принцип бережливого производства как основа разработки биологически активного компонента комплексного действия // Продовольственная политика и безопасность. 2024. Т. 11. № 4. С. 1069–1082. doi: 10.18334/ppib.11.4.122057
- 4 Савинова Ю.С., Белькова Н.Л., Семёнова Н.В., Рычкова Л.В. История, современные направления и перспективы развития про- и пребиотических препаратов в России и за рубежом // Acta Biomedica Scientifica. 2022. Т. 7. № 5-1. С. 211–227. doi: 10.29413/ABS.2022-7.5-1.23
- 5 Gavrilova N., Chernopolskaya N., Rebezov M., Schetinina E., Dogareva N., Likhodeevskaya O., Knysh I., Sanova Z. Specialized sports nutrition foods: review // International Journal of Pharmaceutical Research. 2020. V. 12. № 2. P. 998–1003. doi: 10.31838/ijpr/2020.12.02.0152
- 6 Li Z., Luo X. Probiotics, Prebiotics, Synbiotics, Postbiotics, and Paraprobiotics – New Perspectives on Functional Foods and Nutraceuticals // Foods. 2025. V. 14. № 15. Article 2613. doi: 10.3390/foods14152613
- 7 Dias M.C., Pinto D.C., Silva A.M. Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity // Molecules. 2021. V. 26. № 17. Article 5377. doi: 10.3390/molecules26175377
- 8 Goncharuk E.A., Zagoskina N.V. Heavy Metals, Their Phyto-toxicity, and the Role of Phenolic Antioxidants in Plant Stress Responses with Focus on Cadmium // Molecules. 2023. V. 28. № 9. Article 3921. doi: 10.3390/molecules28093921
- 9 Panche A.N., Diwan A.D., Chandra S.R. Flavonoids: An overview // Journal of Nutritional Science. 2016. V. 5. Article e47. doi: 10.1017/jns.2016.41
- 10 Зверев Я.Ф., Брюханов В.М. Флавоноиды как перспективные природные антиоксиданты // Бюллетень медицинской науки. 2017. № 1 (5). С. 20–27.
- 11 Fan L., Fan W., Mei Y. et al. Mechanochemical assisted extraction as a green approach in preparation of bioactive components extraction from natural products – A review // Trends in Food Science & Technology. 2022. V. 129. P. 98–110. doi: 10.1016/j.tifs.2022.09.009
- 12 Manzoor M.A., Sabir I.A., Shah I.H. et al. Flavonoids: a review on biosynthesis and transportation mechanism in plants // Functional & Integrative Genomics. 2023. V. 23. № 3. Article 212. doi: 10.1007/s10142-023-01147-4
- 13 Гринвальд С.А. Исследование фенольных соединений в муке из виноградных косточек // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. 2023. С. 268–273.
- 14 Herzyk F., Piłakowska-Pietras D., Korzeniowska M. Supercritical extraction techniques for obtaining biologically active substances from a variety of plant byproducts // Foods. 2024. V. 13. № 11. Article 1713. doi: 10.3390/foods13111713
- 15 Waseem M., Majeed Y., Nadeem T. et al. Conventional and advanced extraction methods of some bioactive compounds with health benefits of food and plant waste: A comprehensive review // Food Frontiers. 2023. V. 4. № 4. P. 1681–1701. doi: 10.1002/fft2.296
- 16 Шарипова М.Б., Икрами М.Б., Мирзорахимов К.К., Саидов Х.А. Исследование процесса экстракции пищевых красителей из нетрадиционного растительного сырья // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2023. № 1. С. 66–71. doi: 10.24412/2311-6447-2023-1-66-71
- 17 Ефремов А.А., Савельева Е.Е. Компонентный состав и антирадикальная активность экстрактивных веществ котловника кошачьего Красноярского края // Вестник КрасГАУ. 2023. № 1. С. 206–213.
- 18 Stobiecki M., Mroczek A. LC-MS in flavonoid analysis // Phytochemical Analysis. 2020. V. 31. № 2. P. 113–127.
- 19 Николаева Т.Н., Лапшин П.В., Загоскина Н.В. Метод определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных экстрактах с реактивом Фолина–Дениса и реактивом Фолина–Чокальтеу: модификация и сравнение // Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 291–299. doi: 10.31643/2023/1999-5443.2.21
- 20 Пат. 2700787 Российская Федерация, МПК G01N 33/00, A01G 7/00. Способ определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных объектах / Николаева Т.Н., Лапшин П.В., Нечаева Т.Л., Загоскина Н.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт садоводства». № 2019110069; заявл. 05.04.2019; опубл. 23.09.2019, Бюл. № 27.
- 21 Попов К.И., Филиппов А.Н. Пищевые нанотехнологии: перспективы и проблемы // Переработка молока. 2010. № 3. С. 6–10.

References

- 1 Decree of the President of the Russian Federation of December 1, 2016 No. 642 “On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation”. Available at: <https://base.garant.ru/71551998/> (accessed: 15.11.2025) (in Russian).
- 2 Davydova N.S., Grashchenkova N.V. Lean manufacturing management system and sustainability of lean transformations. New Technologies. 2021. vol. 17. no. 2. pp. 121–130. doi: 10.47370/2072-0920-2021-17-2-121-130 (in Russian).
- 3 Chernopolskaya N.L., Skryabina O.V., Ryabkova D.S. The principle of lean production as a basis for the development of a biologically active component of complex action. Food Policy and Security. 2024. vol. 11. no. 4. pp. 1069–1082. doi: 10.18334/ppib.11.4.122057 (in Russian).

- 4 Savinova Yu.S., Belkova N.L., Semenova N.V., Rychkova L.V. History, current trends and prospects for the development of pro- and prebiotic drugs in Russia and abroad. *Acta Biomedica Scientifica*. 2022. vol. 7. no. 5-1. pp. 211–227. doi: 10.29413/ABS.2022-7-5-1.23 (in Russian).
- 5 Gavrilova N., Chernopolskaya N., Rebezov M., Schetinina E., Dogareva N., Likhodeevskaya O., Knysh I., Sanova Z. Specialized sports nutrition foods: review. *International Journal of Pharmaceutical Research*. 2020. vol. 12. no. 2. pp. 998–1003. doi: 10.31838/ijpr/2020.12.02.0152.
- 6 Li Z., Luo X. Probiotics, Prebiotics, Synbiotics, Postbiotics, and Paraprobiotics – New Perspectives on Functional Foods and Nutraceuticals. *Foods*. 2025. vol. 14. no. 15. article 2613. doi: 10.3390/foods14152613.
- 7 Dias M.C., Pinto D.C., Silva A.M. Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity. *Molecules*. 2021. vol. 26. no. 17. article 5377. doi: 10.3390/molecules26175377.
- 8 Goncharuk E.A., Zagorskina N.V. Heavy Metals, Their Phyto-toxicity, and the Role of Phenolic Antioxidants in Plant Stress Responses with Focus on Cadmium. *Molecules*. 2023. vol. 28. no. 9. article 3921. doi: 10.3390/molecules28093921.
- 9 Panche A.N., Diwan A.D., Chandra S.R. Flavonoids: An overview. *Journal of Nutritional Science*. 2016. vol. 5. article e47. doi: 10.1017/jns.2016.41.
- 10 Zverev Ya.F., Bryukhanov V.M. Flavonoids as promising natural antioxidants. *Bulletin of Medical Science*. 2017. no. 1 (5). pp. 20–27. (in Russian).
- 11 Fan L., Fan W., Mei Y. et al. Mechanochemical assisted extraction as a green approach in preparation of bioactive components extraction from natural products – A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2022. vol. 129. pp. 98–110. doi: 10.1016/j.tifs.2022.09.009.
- 12 Manzoor M.A., Sabir I.A., Shah I.H. et al. Flavonoids: a review on biosynthesis and transportation mechanism in plants. *Functional & Integrative Genomics*. 2023. vol. 23. no. 3. article 212. doi: 10.1007/s10142-023-01147-4.
- 13 Grinvald S.A. Study of phenolic compounds in grape seed flour. *Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation*. 2023. pp. 268–273. (in Russian).
- 14 Herzyk F., Piłakowska-Pietras D., Korzeniowska M. Supercritical extraction techniques for obtaining biologically active substances from a variety of plant byproducts. *Foods*. 2024. vol. 13. no. 11. article 1713. doi: 10.3390/foods13111713.
- 15 Waseem M., Majeed Y., Nadeem T. et al. Conventional and advanced extraction methods of some bioactive compounds with health benefits of food and plant waste: A comprehensive review. *Food Frontiers*. 2023. vol. 4. no. 4. pp. 1681–1701. doi: 10.1002/fft2.296.
- 16 Sharipova M.B., Ikrami M.B., Mirzorakhimov K.K., Saidov Kh.A. Study of the extraction process of food colorants from non-traditional plant raw materials. *Technologies of food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products*. 2023. no. 1. pp. 66–71. doi: 10.24412/2311-6447-2023-1-66-71 (in Russian).
- 17 Efremov A.A., Savelyeva E.E. Component composition and antiradical activity of extractive substances of catnip in the Krasnoyarsk Territory. *Bulletin of KrasGAU*. 2023. no. 1. pp. 206–213. (in Russian).
- 18 Stobiecki M., Mroczek A. LC-MS in flavonoid analysis. *Phytochemical Analysis*. 2020. vol. 31. no. 2. pp. 113–127. doi: 10.1002/pca.2883.
- 19 Nikolaeva T.N., Lapshin P.V., Zagszkina N.V. Method for determining the total content of phenolic compounds in plant extracts with Folin-Denis reagent and Folin-Ciocalteu reagent: modification and comparison. *Chemistry of plant raw materials*. 2023. no. 2. pp. 291–299. doi: 10.31643/2023/1999-5443.2.21 (in Russian).
- 20 Patent no. 2700787, Russian Federation, IPC G01N 33/00, A01G 7/00. Method for determining the total content of phenolic compounds in plant objects. Nikolaeva T.N., Lapshin P.V., Nechaeva T.L., Zagorskina N.V.; applicant and patent holder Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Scientific Research Institute of Horticulture”. no. 2019110069; filed 05.04.2019; publ. 23.09.2019, Bull. no. 27. (in Russian).
- 21 Popov K.I., Filippov A.N. Food nanotechnology: prospects and problems. *Milk Processing*. 2010. no. 3. pp. 6–10. (in Russian).

Сведения об авторах

Наталья Л. Чернопольская д.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, nl.chernopolskaya@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-1359-9190>

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.konovalova@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-3537-8081>

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнес-процессами, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67А, г. Воронеж, 394030, Россия; профессор консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, mto.vrn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

Information about authors

Natalia L. Chernopolskaya Dr. Sci. (Engin.), associate professor, food products and food biotechnology department, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Square, 1, Omsk, 644008, Russia, nl.chernopolskaya@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-1359-9190>

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, 644008, Russia, sa.konovalova@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-3537-8081>

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; consultant professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, mto.vrn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

Ольга В. Скрыбина к.т.н., доцент, кафедра кормления животных и частной зоотехнии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Росси, ov.skryabina@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0003-2700-6683>

Юлия А. Подольникова 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, Росси, yua.podolnikova@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0002-4132-6045>

Дина С. Рябкова к.т.н., доцент, кафедра кормления животных и частной зоотехнии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Росси, ds.ryabkova@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0002-6605-3485>

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.

Olga V. Skryabina Cand. Sci. (Engin.), associate professor, animal nutrition and private animal science department, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Square, 1, Omsk, 644008, Russia, ov.skryabina@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0003-2700-6683>

Yulia A. Podolnikova 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, yua.podolnikova@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0002-4132-6045>

Dina S. Ryabkova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, animal nutrition and private animal science department, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Square, 1, Omsk, 644008, Russia, ds.ryabkova@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0002-6605-3485>

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 17/10/2025	После редакции 18/11/2025	Принята в печать 20/11/2025
Received 17/10/2025	Accepted in revised 18/11/2025	Accepted 20/11/2025

Питание и гены: молекулярные механизмы адаптации обмена веществ к физической активности

Лариса А. Новикова	¹	novikovalari-sa1307@gmail.com	 0009-0005-7723-589X
Светлана В. Недомолкина	¹	lane.nedomolkina@mail.ru	 0009-0005-7269-6742
Наталья П. Деркачева	¹	npetrovaderkacheva@mail.ru	 0009-0009-2940-2023
Марина Н. Могунова	²	mari-na.mogunova@mail.ru	 0000-0002-5363-8855
Галина Н. Егорова	¹	egorovahp@gmail.com	 0000-0002-9907-9649
Наталья Л. Клейменова	¹	klesha78@list.ru	 0000-0002-1462-4055

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

2 Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

Аннотация. Индивидуальная чувствительность к физической нагрузке рассматривается как многофакторное явление с существенным вкладом генетических детерминант. В работе систематизированы данные о генах, влияющих на выносливость, силовые способности, восстановление и метаболическую адаптацию к тренировкам. Описаны механизмы действия генов, связанных с регуляцией ренин-ангиотензиновой системы, структурой мышечных волокон, митохондриальным энергообменом, окислением жирных кислот и ангиогенезом. Показано, что вариации гена ангиотензинпревращающего фермента ассоциированы с различиями между выносливостными и быстро-силовыми характеристиками. Полиморфизмы генов, кодирующих альфа-актинин, митохондриальные разобщающие белки и ферменты энергетического обмена, определяют тип мышечных волокон, эффективность аэробных нагрузок и уровень утомляемости. Особое внимание уделено взаимосвязи генетических вариаций с нутритивными потребностями организма. Доказано, что аэробно ориентированные генотипы (например, с высокой экспрессией UCP2/UCP3 или аллелью С гена PPARG) характеризуются повышенной зависимостью от жирового обмена, в то время как анаэробные варианты (полиморфизм ACTN3, низкая активность AMPD1) требуют усиленного потребления углеводов и белка. Таким образом, генетические особенности напрямую влияют на приоритетный выбор макронутриентов для энергообеспечения и восстановления. В работе также проанализированы риски, связанные с генетически обусловленной предрасположенностью к метаболическим нарушениям и перетренированности, и даны соответствующие диетологические рекомендации для их минимизации. Рассмотрены этические аспекты и потенциальные последствия применения генетических технологий в спорте, включая риски использования генов роста и ингибиторов миостатина в качестве генного допинга. Подчеркивается необходимость строгого разграничения лечебной генной терапии и недопустимых методов повышения результативности. В заключение обоснована целесообразность интеграции генетической информации для персонализации тренировочных программ и нутритивной поддержки, что позволяет повысить эффективность адаптации, работоспособность и снизить риски для здоровья спортсменов.

Ключевые слова: спортивная нутригенетика, полиморфизмы генов, адаптация к физической нагрузке, метаболизм, персонализированное питание, мышечные волокна, энергообмен, генный допинг, ACE, ACTN3.

Nutrition and Genes: Molecular Mechanisms of Metabolic Adaptation to Physical Activity

Larisa A. Novikova	¹	novikovalari-sa1307@gmail.com	 0009-0005-7723-589X
Svetlana V. Nedomolkina	¹	lane.nedomolkina@mail.ru	 0009-0005-7269-6742
Natalia P. Derkacheva	¹	npetrovaderkacheva@mail.ru	 0009-0009-2940-2023
Marina N. Mogunova	²	mari-na.mogunova@mail.ru	 0000-0002-5363-8855
Galina N. Egorova	¹	egorovahp@gmail.com	 0000-0002-9907-9649
Natalya L. Klejmenova	¹	klesha78@list.ru	 0000-0002-1462-4055

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

2 Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, 8 Timiryazeva Street, Voronezh, 394087, Russia

Abstract. Individual sensitivity to physical exercise is considered a multifactorial phenomenon with a significant contribution from genetic determinants. This study systematizes data on genes influencing endurance, strength, recovery, and metabolic adaptation to training. The mechanisms of action of genes associated with the regulation of the renin-angiotensin system, muscle fiber structure, mitochondrial energy metabolism, fatty acid oxidation, and angiogenesis are described. Variations in the angiotensin-converting enzyme gene are shown to be associated with differences in endurance and speed-strength characteristics. Polymorphisms in genes encoding alpha-actinin, mitochondrial uncoupling proteins, and energy metabolism enzymes determine muscle fiber type, aerobic exercise efficiency, and fatigue levels. Particular attention is paid to the relationship between genetic variations and the body's nutritional needs. It has been shown that aerobic genotypes (for example, those with high UCP2/UCP3 expression or the C allele of the PPARG gene) are characterized by increased dependence on fat metabolism, while anaerobic variants (ACTN3 polymorphism, low AMPD1 activity) require increased carbohydrate and protein intake. Thus, genetic characteristics directly influence the priority selection of macronutrients for energy supply and recovery. The study also analyzes the risks associated with a genetic predisposition to metabolic disorders and overtraining and provides appropriate dietary recommendations for their minimization. The ethical aspects and potential consequences of the use of genetic technologies in sports are considered, including the risks of using growth genes and myostatin inhibitors for gene doping. The need for a strict distinction between therapeutic gene therapy and unacceptable performance-enhancing methods is emphasized. In conclusion, the feasibility of integrating genetic information for personalizing training programs and nutritional support is substantiated, which allows for increased adaptation efficiency, performance, and reduced health risks for athletes.

Keywords: Sports nutrigenetics, gene polymorphisms, exercise adaptation, metabolism, personalized nutrition, muscle fibers, energy metabolism, gene doping, ACE, ACTN3.

Для цитирования

Могунова М.Н., Деркачева Н.П., Новикова Л.А., Недомолкина С.В., Егорова Г.Н., Клейменова Н.Л. Питание и гены: молекулярные механизмы адаптации обмена веществ к физической активности // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 159–164. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-159-164

For citation

Mogunova M.N., Derkacheva N.P., Novikova L.A., Nedomolkina S.V., Egorova G.N., Kleimenova N.L. Nutrition and Genes: Molecular Mechanisms of Metabolic Adaptation to Physical Activity. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 159–164. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-159-164

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

Введение

Адаптация организма к физической активности определяется взаимодействием генетических факторов и питания, что подтверждено данными современных исследований в области спортивной нутригенетики [1, 2]. Генетические вариации определяют направленность энергетического обмена и индивидуальную реакцию на тренировочные нагрузки различной интенсивности [5, 7]. Понимание молекулярно-генетических механизмов, лежащих в основе этих процессов, позволяет обосновать персонализированный подход к питанию, направленный на повышение работоспособности и снижение риска метаболических нарушений при физической активности.

Материалы и методы

В работе проведён аналитический обзор публикаций, посвящённых роли генов, участвующих в регуляции митохондриальной функции, липидного и углеводного обмена, а также чувствительности к инсулину и ангиогенезу [2, 8, 10]. В анализ были включены исследования, выполненные в период 2020–2025 годов и представленные в рецензируемых научных журналах [3, 15]. Функциональные эффекты генов сопоставлялись с их значением для энергетического обеспечения и потребностей организма в нутриентах потребностей организма (таблица 1).

Таблица 1.

Основные гены, участвующие в регуляции обмена веществ и адаптации к физической активности

Table 1.

Key genes involved in the regulation of metabolism and adaptation to physical activity

Ген Gene	Основная функция Primary Function	Влияние на обмен веществ Effect on metabolism	Значение для физической активности Significance for physical activity
ACE	Регуляция ренин-ангиотензиновой системы Regulation of the renin-angiotensin system	Контроль сосудистого тонуса и кровоснабжения мышц Control of vascular tone and muscle blood flow	Определяет предрасположенность к выносливостным или силовым нагрузкам Determines predisposition to endurance or strength training
ACTN3	Кодирование альфа-актина-3 Coding for alpha-actinin 3	Формирование быстрых мышечных волокон Formation of fast-twitch muscle fibers	Влияет на скоростно-силовые способности Affects speed-strength abilities
AMPD1	Энергетический обмен в мышцах Energy metabolism in muscles	Ресинтез аденозинтрифосфата при утомлении Resynthesis of adenosine triphosphate during fatigue	Определяет толерантность к высокоинтенсивным нагрузкам Determines tolerance to high-intensity exercise
PPARD	Регуляция окисления жирных кислот Regulation of fatty acid oxidation	Липидный и углеводный обмен, чувствительность к инсулину Lipid and carbohydrate metabolism, insulin sensitivity	Связан с развитием выносливости Associated with endurance development
UCP2, UCP3	Митохондриальное разобщение Mitochondrial uncoupling	Усиление липолиза и термогенеза Enhanced lipolysis and thermogenesis	Повышает эффективность аэробных нагрузок Increases the effectiveness of aerobic exercise
VEGF	Ангиогенез Angiogenesis	Улучшение кровоснабжения тканей Improved tissue blood flow	Ускоряет восстановление и адаптацию мышц Accelerates muscle recovery and adaptation

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, что ключевые гены, участвующие в регуляции обмена веществ и адаптации к физической активности, затрагивают как энергетическое обеспечение мышечной деятельности, так и структурно-функциональные характеристики мышц и сосудистой системы. Их функциональная направленность подтверждает многоуровневый характер генетического контроля адаптационных процессов, включающего митохондриальный метаболизм, кровоснабжение и тип мышечных волокон, что обосновывает необходимость комплексного учета генетических факторов при планировании питания.

Результаты и обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о том, что полиморфизмы генов митохондриальных разобщающих белков UCP2 и UCP3 способствуют усиленному использованию жирных кислот в качестве источника энергии при аэробных нагрузках [2, 17]. Ген PPARD ассоциирован с увеличением доли медленных мышечных волокон и развитием выносливости [2, 7].

Гены ACTN3 и AMPD1 определяют эффективность анаэробного энергообеспечения и устойчивость к утомлению, что отражается на потребностях в углеводах и белке [5, 16]. Связь генетических особенностей с нутритивными потребностями представлена в таблице 2.

Таблица 2.

Связь генетических особенностей с потребностями в макронутриентах

Table 2.

Relationship between genetic characteristics and macronutrient requirements

Генетическая особенность Genetic trait	Преобладающий тип обмена Predominant metabolic type	Приоритетный макронутриент Priority Macronutrient	Физиологическое обоснование Physiological rationale
Высокая экспрессия UCP2/UCP3 High UCP2/UCP3 expression	Аэробный Aerobic	Жиры Fats	Активное использование жирных кислот как источника энергии Active utilization of fatty acids as an energy source
Аллель С гена PPARD PPARD gene C allele		Жиры и умеренное количество углеводов Fats and Moderate Carbs	Усиленное окисление жирных кислот Enhanced fatty acid oxidation
Полиморфизм ACTN3 ACTN3 polymorphism	Анаэробный Anaerobic	Белок и углеводы Protein and Carbs	Поддержание быстрых мышечных волокон Maintaining fast-twitch muscle fibers
Низкая активность AMPD1 Low AMPD1 activity		Углеводы Carbohydrates	Компенсация сниженного ресинтеза аденозинтрифосфата Compensating for decreased adenosine triphosphate resynthesis
Повышенная чувствительность к инсулину Increased insulin sensitivity	Смешанный Mixed	Углеводы в восстановлении Carbohydrates in Recovery	Эффективное восстановление гликогена Efficient glycogen restoration

Анализ данных, представленных в таблице 2, свидетельствует о прямой связи между генетическими особенностями и приоритетным использованием макронутриентов при физической активности. Аэробно ориентированные генотипы характеризуются повышенной зависимостью от жирового обмена, тогда как анаэробные генетические варианты требуют усиленного углеводного и белкового обеспечения. Это подтверждает целесообразность дифференцированного подхода к формированию рациона в зависимости от генетически обусловленного типа обмена веществ.

Учёт генетических особенностей позволяет персонализировать питание спортсменов с целью повышения работоспособности и профилактики

метаболических нарушений [1, 12]. Отмечено, что полиморфизмы генов, регулирующих чувствительность к инсулину и восстановление гликогена, играют ключевую роль в формировании рационов восстановительного питания [8, 14].

Одновременно подчёркивается необходимость строгого разграничения допустимой генной терапии и генного допинга в спортивной практике [3, 18]. Например, носительство определённых аллелей PPARD ассоциировано с повышенным риском сердечно-сосудистых заболеваний, что требует контроля жирового состава рациона. Ген AMPD1 связан с повышенной утомляемостью, что повышает значение своевременного углеводного обеспечения (таблица 3).

Таблица 3.

Генетически обусловленные риски и рекомендации по питанию

Table 3.

Genetic risks and nutritional recommendations

Ген Gene	Потенциальный риск Potential risk	Диетологическая рекомендация Dietary recommendations
AMPD1	Повышенная утомляемость Increased fatigue	Увеличение доли легкоусвояемых углеводов Increase the proportion of easily digestible carbohydrates
PPARD (аллель С)	Риск сердечно-сосудистых нарушений Risk of cardiovascular problems	Контроль жирового состава рациона Control the fat content of the diet
ACTN3	Снижение силовых показателей Decreased strength	Повышенное потребление белка Increase protein intake
UCP2	Снижение секреции инсулина Decreased insulin secretion	Регулярное дробное питание Regular, small meals
VEGF	Гипертрофические процессы Hypertrophic processes	Баланс макронутриентов в восстановительный период Macronutrient balance during the recovery period

Результаты, представленные в таблице 3, демонстрируют, что отдельные генетические вариации ассоциированы с повышенными

метаболическими и функциональными рисками при физических нагрузках. Учет таких особенностей позволяет не только повысить

эффективность тренировочного процесса, но и снизить вероятность развития утомления, сердечно-сосудистых нарушений и перетренированности за счёт целенаправленной коррекции питания.

Полученные данные свидетельствуют о том, что генетические особенности определяют индивидуальные потребности в макронутриентах при физической активности. Аэробно ориентированный генотип благоприятствует использованию жиров и требует оптимизации липидного компонента рациона, тогда как при преобладании анаэробных характеристик возрастает значение углеводов и белка.

Генетическая регуляция чувствительности к инсулину и восстановления гликогеновых запасов подчёркивает необходимость учета генотипа при планировании питания в восстановительный период. Одновременно показаны потенциальные риски злоупотребления генетическими технологиями в спорте, что требует чёткого разграничения лечебной генной терапии и генного допинга.

Заключение

Использование данных о генетических маркерах позволяет обосновать персонализированный подход к питанию и тренировочному процессу. Дополнительно следует отметить, что применение генетически обоснованных рекомендаций способствует снижению риска метаболических и травматических осложнений при физической активности [1, 2, 5, 19]. Комплексный подход, включающий питание, тренировки и образ жизни, остаётся определяющим фактором достижения устойчивых адаптационных эффектов [7, 20]. Учет генетических особенностей позволяет обосновать персонализированный подход к питанию, направленный на оптимизацию энергетического обмена, повышение работоспособности и профилактику метаболических и травматических осложнений. При этом питание должно рассматриваться как часть комплексной системы адаптации, включающей тренировочный режим, восстановление и образ жизни.

Таблица 4.

Использование генетической информации при персонализации питания

Table 4.

Using genetic information to personalize nutrition

Направление	Генетический маркер	Практическое применение
Планирование рациона	UCP2, PPARG	Определение соотношения жиров и углеводов
Восстановление	AMPD1, VEGF	Оптимизация питания после нагрузок
Поддержание мышечной массы	ACTN3, IGF1	Коррекция белкового компонента
Профилактика перегрузок	ACE	Адаптация энергетической ценности рациона

Сведения, представленные в таблице 4, подтверждают практическую значимость использования генетической информации при персонализации питания.

Заключение

Применение данных о генетических маркерах позволяет оптимизировать рацион

на этапах тренировок и восстановления, поддерживать мышечную массу и предотвращать перегрузки, что повышает общую эффективность адаптации организма к физической активности.

Литература

- 1 Guest N.S., VanDusseldorp T.A., Nelson M.T. et al. International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance // *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2021. V. 18. № 1. P. 1–37. doi: 10.1186/s12970-020-00383-4
- 2 Maciejewska-Skrendo A., Chycki J., Cholewa J. et al. The influence of the differentiation of genes encoding peroxisome proliferator-activated receptors on energy metabolism and endurance performance // *Nutrients*. 2022. V. 14. № 24. P. 5378. doi: 10.3390/nu14245378
- 3 Barreto G., Freitas L.F., Gerosa-Neto J. et al. Caffeine, CYP1A2 genotype, and exercise performance: a systematic review and meta-analysis // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2024. V. 56. № 2. P. 328–339. doi: 10.1249/MSS.0000000000003313
- 4 Penggalih M.H.S.T., Solichah K.M., Niamila I. et al. Precision nutrition in sports science: an opinion on omics-based personalized nutrition // *Frontiers in Nutrition*. 2025. V. 12. Article 1324567.
- 5 Bıçakçı B., Özdemir S., Yılmaz A. Genetic determinants of endurance performance: a narrative review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. V. 25. № 23. P. 13041. doi: 10.3390/ijms252313041
- 6 Коцатюрк Р.Р. Влияние полиморфизмов CYP1A2 –163C>A и ADORA2A 1976T>C на физиологические эффекты и физическую работоспособность при приёме кофеина: систематический обзор // *Baltic Journal of Sport and Health Sciences*. 2022. № 4. С. 45–58.

- 7 Варильяс-Дельгадо Д., Гомес-Кабрера М.К., Винья Х. Генетика и спортивная работоспособность: современное состояние и перспективы // *Antioxidants*. 2022. V. 11. № 9. P. 1741.
- 8 Асгари Г., Резазаде А., Аскари Г. и др. Влияние генетического полиморфизма на ответ на добавки витамина D при длительном приёме: исследование взаимодействия «ген–нутриент» // *Frontiers in Nutrition*. 2022. V. 9. Article 872193.
- 9 Булгай Д., Озкан С., Демиркан Э. Полиморфизм рецептора витамина D (VDR rs2228570) и соревновательная результативность элитных спортсменов // *Healthcare*. 2023. V. 11. № 4. P. 522.
- 10 Семёнова Е.А., Фуку Н., Ястржембский З. и др. Гены и спортивная работоспособность: обновление данных 2023 года // *Genes*. 2023. V. 14. № 5. P. 1150.
- 11 Лоуэри Л.М., Джой Дж.М., Дудек Дж.Е. и др. Кофе и физическая работоспособность: роль нутригенетики и индивидуальной вариабельности // *Nutrients*. 2023. V. 15. № 6. P. 1398.
- 12 Амауи А., Аль-Касассбех М., Аль-Шорман А. Питательные потребности спортсменов: обзор требований к результативности, восстановлению и здоровью // *Nutrients*. 2024. V. 16. № 2. P. 312.
- 13 Рахими М.Р., Корди М.Р., Фанаеи Х. Полиморфизм гена ADORA2A и острый приём кофеина: влияние на гормональные и физиологические ответы // *Journal of Sports Sciences*. 2024. V. 42. № 3. P. 245–253.
- 14 Wang Z., Li Z., Zhang Y. Is the ergogenic effect of caffeine dependent on genotype? A meta-analysis of genetic moderators. *Sports Medicine*. 2024. vol. 54. no. 1. pp. 67–82.
- 15 Akhmetov I.I., Egorova E.S., Gabdrakhmanova L.Zh. Genomic predictors of physical activity and sports traits. *Sports Medicine*. 2024. vol. 54. no. 5. pp. 1031–1045.
- 16 Della Guardia L., Codella R. The role of the UCP3 protein in regulating skeletal muscle energy metabolism and substrate selection. *Metabolism*. 2024. vol. 150. article 155755.
- 17 Gabdulkayum A., Akhmetov I.I., Zhumagulova S. VDR gene polymorphisms, vitamin D levels and injury predisposition in elite athletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 2025. vol. 65. no. 1. pp. 45–54.
- 18 Хребтова А.Ю., Кузин А.И., Камерер О.В. и др. Стратегические горизонты персонализированного питания в спорте // *Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта*. 2020. № 9 (187). С. 400–408.
- 19 Максимычева Т.Ю., Кондратьева Е.И., Попова В.М. Молекулярно-генетические основы энергетического обмена и физических качеств человека. Перспективы исследований // *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2023. № 9 (217). С. 222–230.
- 20 Напольский И.Н., Попова П.В. Персонализированное питание для профилактики и лечения метаболических заболеваний: возможности и перспективы // *Российский журнал персонализированной медицины*. 2022. Т. 2. № 1. С. 15–34. doi: 10.18705/2782-3806-2022-2-1-15-34

References

- 1 Guest N.S., VanDusseldorp T.A., Nelson M.T. et al. International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2021. vol. 18. no. 1. article 1. doi: 10.1186/s12970-020-00383-4.
- 2 Maciejewska-Skrendo A., Chycki J., Cholewa J. et al. The influence of the differentiation of genes encoding peroxisome proliferator-activated receptors on energy metabolism and endurance performance. *Nutrients*. 2022. vol. 14. no. 24. article 5378. doi: 10.3390/nu14245378.
- 3 Barreto G., Freitas L.F., Gerosa-Neto J. et al. Caffeine, CYP1A2 genotype, and exercise performance: a systematic review and meta-analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2024. vol. 56. no. 2. pp. 328–339. doi: 10.1249/MSS.0000000000000313.
- 4 Penggalih M.H.S.T., Solichah K.M., Niamila I. et al. Precision nutrition in sports science: an opinion on omics-based personalized nutrition. *Frontiers in Nutrition*. 2025. vol. 12. article 1324567.
- 5 Bıçakçı B., Özdemir S., Yılmaz A. Genetic determinants of endurance performance: a narrative review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. vol. 25. no. 23. article 13041. doi: 10.3390/ijms252313041.
- 6 Kotsatyrk R.R. The influence of CYP1A2 –163C>A and ADORA2A 1976T>C polymorphisms on physiological effects and physical performance during caffeine intake: a systematic review. *Baltic Journal of Sport and Health Sciences*. 2022. no. 4. pp. 45–58. (in Russian).
- 7 Varillas-Delgado D., Gomez-Cabrera M.K., Viña J. Genetics and sports performance: current state and prospects. *Antioxidants*. 2022. vol. 11. no. 9. article 1741. doi: 10.3390/antiox11091741 (in Russian).
- 8 Asgari G., Rezazadeh A., Askari G. et al. The effect of genetic polymorphism on the response to vitamin D supplementation during long-term intake: a “gene-nutrient” interaction study. *Frontiers in Nutrition*. 2022. vol. 9. article 872193. doi: 10.3389/fnut.2022.872193 (in Russian).
- 9 Bulgay D., Ozkan S., Demirkan E. Vitamin D receptor polymorphism (VDR rs2228570) and competitive performance of elite athletes. *Healthcare*. 2023. vol. 11. no. 4. article 522. doi: 10.3390/healthcare11040522 (in Russian).
- 10 Semenova E.A., Fuku N., Yastrzhembskiy Z. et al. Genes and sports performance: 2023 update. *Genes*. 2023. vol. 14. no. 5. article 1150. doi: 10.3390/genes14051150 (in Russian).
- 11 Lowery L.M., Joy J.M., Dudeck J.E. et al. Coffee and physical performance: the role of nutrigenetics and individual variability. *Nutrients*. 2023. vol. 15. no. 6. article 1398. doi: 10.3390/nu15061398 (in Russian).
- 12 Amaoui A., Al-Kasassbeh M., Al-Shorman A. Nutritional needs of athletes: a review of performance, recovery and health requirements. *Nutrients*. 2024. vol. 16. no. 2. article 312. doi: 10.3390/nu16020312 (in Russian).
- 13 Rahimi M.R., Kordi M.R., Fanaei H. ADORA2A gene polymorphism and acute caffeine intake: effects on hormonal and physiological responses. *Journal of Sports Sciences*. 2024. vol. 42. no. 3. pp. 245–253. doi: 10.1080/02640414.2023.2291218 (in Russian).
- 14 Wang Z., Li Z., Zhang Y. Is the ergogenic effect of caffeine dependent on genotype? A meta-analysis of genetic moderators. *Sports Medicine*. 2024. vol. 54. no. 1. pp. 67–82.

- 15 Akhmetov I.I., Egorova E.S., Gabdrakhmanova L.Zh. Genomic predictors of physical activity and sports traits. *Sports Medicine*. 2024. vol. 54, no. 5. pp. 1031–1045
- 16 Della Guardia L., Codella R. The role of the UCP3 protein in regulating skeletal muscle energy metabolism and substrate selection. *Metabolism*. 2024. vol. 150. article 155755.
- 17 Gabdulkayum A., Akhmetov I.I., Zhumagulova S. VDR gene polymorphisms, vitamin D levels and injury predisposition in elite athletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 2025. vol. 65, no. 1. pp. 45–54.
- 18 Khrebto A.Yu., Kuzin A.I., Kameron O.V. et al. Strategic horizons of personalized nutrition in sports. *Uchenye Zapiski Universiteta Imeni P.F. Lesgafta*. 2020. no. 9 (187). pp. 400–408. (in Russian).
- 19 Maksimychева T.Yu., Kondratieva E.I., Popova V.M. Molecular-genetic bases of energy metabolism and human physical qualities. *Research prospects. Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2023. no. 9 (217). pp. 222–230. (in Russian).
- 20 Napolsky I.N., Popova P.V. Personalized nutrition for the prevention and treatment of metabolic diseases: opportunities and prospects. *Russian Journal of Personalized Medicine*. 2022. vol. 2. no. 1. pp. 15–34. doi: 10.18705/2782-3806-2022-2-1-15-34 (in Russian)

Сведения об авторах

Лариса А. Новикова старший преподаватель, кафедра физической культуры и спорта, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, novikovalari-sa1307@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-7723-589X>

Светлана В. Недомолкина старший преподаватель, кафедра физической культуры и спорта, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394000, Россия, lana.nedomolkina@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-7269-6742>

Наталья П. Деркачева старший преподаватель, кафедра физической культуры и спорта, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394000, Россия, npetrovaderkacheva@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-2940-2023>

Марина Н. Могунова доцент, кафедра физического воспитания, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия, mari-na.mogunova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5363-8855>

Галина Н. Егорова к.п.н., доцент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394000, Россия, egorovahp@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9907-9649>

Наталья Л. Клейменова к.т.н., доцент, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, klesha78@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1462-4055>

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

Larisa A. Novikova senior lecturer, physical culture and sports department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, novikovalari-sa1307@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-7723-589X>

Svetlana V. Nedomolkina senior lecturer, physical culture and sports department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia, lana.nedomolkina@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-7269-6742>

Natalia P. Derkacheva senior lecturer, physical culture and sports department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia, npetrovaderkacheva@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-2940-2023>

Marina N. Mogunova assistant professor, Physical Education Department, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, 8 Timiryazeva Street, Voronezh, 394087, Russia, mari-na.mogunova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5363-8855>

Galina N. Egorova Cand. Sci. (Ped.), associate professor, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia, egorovahp@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9907-9649>

Natalya L. Klejmenova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia, klesha78@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1462-4055>

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 01/10/2025	После редакции 18/10/2025	Принята в печать 24/11/2025
Received 01/10/2025	Accepted in revised 18/10/2025	Accepted 24/11/2025

Тенденции в разработке пищевых добавок и биологически активных добавок к пище

Мария В. Лукьяненко	¹	niibiotechn@mail.ru	 0000-0002-2842-3713
Людмила В. Донченко	¹	niibiotechn@mail.ru	 0000-0002-1468-4808
Артём А. Васильев	¹	vasilevaa@kuban-vino.ru	 0009-0004-6926-6090
Ирина В. Соболев	¹	iv-sobol@mail.ru	 0000-0003-0641-6261
Альбина А. Варивода	¹	albin2222@mail.ru	 0000-0002- 5931-2119
Екатерина Ю. Устюгова	¹	gr.ekaterina.1710@yandex.ru	 0009-0004-4366-4808

¹ Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия

Аннотация. Развитие пищевой промышленности в комплексе с изменением структуры питания и энергозатрат организма привело к созданию новых направлений. Так, для решения задач снижения потерь от социально значимых заболеваний может быть использовано персонализированное питание. В частности, в персонализированном питании могут применяться пищевые добавки (ПД) как обогатители пищевых продуктов, придающие им функциональные свойства. Биологически активные добавки (БАД) к пище могут рассматриваться как самостоятельные продукты, активизирующие определённые процессы в организме, обладая регуляторными свойствами. Статья посвящена перспективам в области создания ПД и БАД к пище для персонализированного питания. В исследовании применены теоретические методы исследований (мета-анализ) на основе PRISMA. Отбор научных достижений производился на платформе Google Scholar по поисковым запросам «омикс-подходы», «перспективные добавки», «перспективные технологии», «эффективность применения», «персонализированное питание» с временным охватом 5 лет с 2020 года по 2024 год. Выявлено, что исследования ведутся как в отношении влияния ПД и БАД к пище и их компонентов на фокус-группах (например, спортсменов), так и лабораторных животных. Отдельные исследования посвящены влиянию технологических этапов на эффективность биологической активности продукта. По существующим представлениям в схему этапов разработки ПД и БАД к пище могут быть включены: выбор целевой патологии; целевой эффект разрабатываемого продукта; конкретизация выбранного эффекта; выбор нутрицевтика-кандидата; выбор наилучшей комбинации; проведение исследований по биодоступности; тестирование на животных; тестирование на людях для установления дозировки; определение срока годности. Омикс-подходы могут быть применены на этапе выбора целевой патологии (через ген-маркер), с которой будет работать разрабатываемая добавка. Омикс-подходы в целях реализации персонализированного питания могут изменить структуру разработки технологий добавок, использованные для доказательной базы эффективности и безопасности добавок, исключая тестирование на животных при выбранном профилактическом эффекте.

Ключевые слова: омикс-подход, персонализированное питание, здоровье, регуляторные свойства, нормализация обменных процессов.

Trends in the development of dietary supplements and biologically active food additives

Mariya V. Lukyanenko	¹	niibiotechn@mail.ru	 0000-0002-2842-3713
Ludmila V. Donchenko	¹	niibiotechn@mail.ru	 0000-0002-1468-4808
Artem A. Vasilev	¹	vasilevaa@kuban-vino.ru	 0009-0004-6926-6090
Irina V. Sobol	¹	iv-sobol@mail.ru	 0000-0003-0641-6261
Albina A. Varivoda	¹	albin2222@mail.ru	 0000-0002- 5931-2119
Ekaterina Yu. Ustyugova	¹	gr.ekaterina.1710@yandex.ru	 0009-0004-4366-4808

¹ Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13 Kalinin Street, Krasnodar, 394036, Russia

Abstract. The development of the food industry in combination with a change in the structure of nutrition and energy consumption of the body led to the creation of new directions. So, to solve the problems of reducing losses from socially significant diseases, personalized nutrition can be used. In particular, in personalized nutrition, food additives (PD) can be used as food enrichers that give them functional properties. Biologically active food additives can be considered as independent products that activate certain processes in the body, having regulatory properties. The article is devoted to the prospects in the field of creating food additives and biologically active food additives for personalized nutrition. The study applied theoretical research methods (meta-analysis) based on PRISMA. The selection of scientific achievements was carried out on the Google Scholar platform for search queries "omix approaches," "food additives," "promising technologies," "application efficiency," "personalized nutrition" with a time span of 5 years from 2020 to 2024. It was revealed that research is underway both in relation to the effect of food additives and dietary supplements and their components on focus groups (for example, athletes), and laboratory animals. Separate studies are devoted to the effect of technological steps on the effectiveness of the biological activity of the product. According to existing ideas, the following can be included in the scheme of the stages of development of food additives and dietary supplements: the choice of target pathology; target effect of the developed product; concretizing the selected effect; selection of a nutraceutical candidate; selection of the best combination; conducting bioavailability studies; animal testing; human testing to establish dosage; determination of shelf life. Omix approaches can be applied at the stage of choosing the target pathology (through the marker gene), with which the developed supplement will work. Omix approaches in order to implement personalized nutrition can change the structure of the development of supplement technologies, used for the evidence base of the effectiveness and safety of supplements, excluding testing on animals with the chosen preventive effect.

Keywords: omix approach, personalized nutrition, health, regulatory properties, normalization of metabolic processes.

Для цитирования

Лукьяненко М.В., Донченко Л.В., Васильев А.А., Соболев И.В., Варивода А.А., Устюгова Е.Ю. Тенденции в разработке пищевых добавок и биологически активных добавок к пище // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 165–172. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-165-172

For citation

Lukyanenko M.V., Donchenko L.V., Vasilyev A.A., Sobol I.V., Varivoda A.A., Ustyugova E.Yu. Trends in the development of dietary supplements and biologically active food additives. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 165–172. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-165-172

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

Введение

Разработка биологически активных добавок (БАД) к пище и пищевых добавок (ПД) в разных странах имеет неподдельный интерес уже несколько десятилетий. Пристальное внимание к этим продуктам связано с необходимостью купирования увеличивающейся распространённости таких патологий как сердечно-сосудистые заболевания, диабет, онкология, нарушение пищеварения и другие. Многими исследованиями отмечено существенное влияние не только БАД к пище, но и ПД на изменение состояния здоровья человека [1–7]. В этой связи они могут быть использованы в дополнение к основной терапии, обладая направленным действием по отношению к тем или иным симптомам [8–13].

Так, например, пищевые волокна – балластные вещества, представленные клетчаткой, лигнином, гемицеллюлозами, пектиновыми веществами и другими, одновременно могут влиять на углеводный обмен, работу желудочно-кишечного тракта, а также выводить из организма тяжёлые металлы и радионуклиды [14].

В особую группу веществ выделяют нутрицевтики – соединения, обладающие профилактической и терапевтической активностью в отношении хронических дегенеративных заболеваний. К физиологически активным веществам нутрицевтиков относятся такие группы веществ как производные изопrenoидов, фенольные соединения, углеводные вещества, структурные липиды, производные аминокислот, микроорганизмы и связанные с ними соединения и минералы [15, 16].

Тем не менее, любое физиологически активное вещество может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на организм, что связано с индивидуальными особенностями организма, дозировкой потребляемого продукта, сочетанием с другими веществами, условиями и качеством производства.

По существующему законодательству ряда стран применяются различные принципы оценки позиционирования направленности, качества и безопасности БАД к пище. Так, в Румынии законодательство о БАД к пище предусматривает исключение введения потребителя в заблуждение об эффективности продукта, а эффективность должна быть обоснована для возможности свободного выбора подходящего продукта. В США предусмотрен сбор информации о нежелательных явлениях в схему взаимодействия между потребителями FDA MedWatch, производителями, фармацевтами и другими участниками рынка; в Чехии – созданы центры мониторинга

нежелательных явлений БАД к пище с последующим созданием базы данных и соблюдение строгого контроля качества готового продукта [11, 17].

С развитием персонализированного питания общих представлений о влиянии физиологически активных веществ на организм человека недостаточно. Важно учитывать их влияние, например, в пределах одного генотипа или для населения, проживающего в пределах одной территории. Частота распространения генотипа, отвечающего за непереносимость лактозы для белорусов, украинцев, мордвы, удмуртов, коми, французов и русских Волго-Уральского региона находится на уровне 38%, у башкир, казахов, бурят – 76%, у татар – 55% [17, 18]. Если говорить о географических особенностях, то жители Республики Беларусь имеют до – 90% дефицит витамина С, до 80% – витаминов группы В и до 60% – каротиноидов, включая бета-каротин, до 30% – дефицит витамина Е в сочетании с недостаточным поступлением микро- и макронутриентов в присутствии заражения экологически вредными веществами [19].

В этой связи актуальным является аналитическое исследование в области определения механизма влияния БАД к пище, ПД или отдельных компонентов растительного сырья на микробиом человека, взаимовлияние физиологически активных компонентов и особенности отклика на воздействие у разных групп населения с целью создания эффективных комплексов.

Цель работы – выявление тенденций в области разработки ПД и БАД к пище для персонализированного питания.

Материалы и методы

В качестве объектов исследований были использованы имеющиеся научные публикации по оценке эффективности и безопасности БАД к пище и ПД и подходам в их создании с применением омикс-технологий. При проведении исследования был использован теоретический метод – мета-анализ. Мета-анализ осуществлялся на основе метода PRISMA [20, 21]. Поиск литературы производили на платформе Google Scholar. В качестве поискового запроса применены следующие термины: «омикс-подходы», «пищевые добавки», «перспективные технологии», «эффективность применения», «персонализированное питание». Среди источников информации рассматривались научные статьи в периодических изданиях; рукописи, принятые к опубликованию; статьи, опубликованные в конференциях и книги. Ретроспектива научных публикаций выбрана в пределах 5 лет: 2020–2024 гг.

По исковому запросу в базе данных было отобрано 67 публикаций. Дополнительно, по списку литературы в найденных публикациях, обнаружено 19 статей. В результате изучения материала было исключено 28 публикаций, относящихся к глубоко медицинским исследованиям или исследованиям, проводившимся на сельскохозяйственных животных.

Результаты

Проведя аналитическое исследование современных научных достижений в области персонализированного питания с применением омикс-подходов и оценки эффективности, мы выбрали, на наш взгляд, наиболее интересные результаты, помогающие в выборе ключевых маркеров определения эффективности применения ПД и БАД к пище.

Влияние БАД к пище и ПД для устранения нарушения метаболизма липидов и глюкозы можно рассмотреть на примере введения в рацион арабиноксиланов (АК). АК – один из основных видов пищевых волокон в рационе человека, продуктом ферментативного гидролиза [22, 23] которых являются арабиноксиланоолигосахариды (АКОС) и ксиланоолигосахариды (КОС), проявляющие пребиотические свойства, повышая численность бифидобактерий и микрофлоры бутирата в кишечнике. Бифидогенный эффект олигосахаридов может наблюдаться уже при длительности приёма от 3 недель при дозировке 4 г/сутки, что подтверждается исследованиями фекалий. Данный анализ является частью мультиомического подхода, включающего метагеномное секвенирование ДНК образца фекалий, метаболомику ядерного магнитного резонанса в фекалиях, плазме и моче, липидомику в плазме и моче. Таксономический анализ, проведенный на основе данных метагеномного секвенирования образца, показывает, что потребление АКОС увеличивает численность актинобактерий ($P = 0,0481$), *Bifidobacteriaceae* ($P = 0,0316$) и группы таксономии *Bifidobacterium* ($P = 0,0317$), сравнивая исходные образцы с образцами после вмешательства. Потребление АКОС привело к расширению коллекции генов, ответственных за биосинтез витаминов и кофакторов, а также генов, специализирующихся на транспорте, биосинтезе и деградации гликанов.

Потребление АКОС может улучшать метаболизм глюкозы посредством модификации метагеномных функций, увеличивает количество генов, участвующих в углеводном обмене. Подход метаболомики был полезен для отслеживания использования АКОС кишечной микробиотой по присутствию в моче гиппуровой кислоты, микробного метаболита, в результате

деградации полифенолов, связанных с пищевыми волокнами [22, 23]. Также АКОС снижает уровень церамидов в плазме через независимый от микробиома механизм [24].

При профилактике и лечении хронических дегенеративных заболеваний может применяться редукционистский метод, включающий идентификацию биологически активных экстрактов, в том числе из растений, с последующим выделением основного действующего вещества. После этого активный компонент производится непосредственно из исходного организма или синтезируется *de novo*, с возможной модификацией для повышения безопасности и эффективности. Однако редукционистский подход медицины является не самым удачным, так как не учитывает всего многообразия симптомов, в частности, метаболического синдрома.

Преимуществом будут обладать БАД к пище или ПД, включающие комбинацию активных соединений [25]. В этом случае необходимо оценивать комбинированный эффект, который может быть рассчитан по изоболограмме – графическому методу, используемому для бинарных смесей, и комбинированному индексу – математическому индексу.

Комбинированный эффект может быть: 1) равен сумме эффектов отдельных соединений (аддитивный), 2) меньше суммы эффектов отдельных соединений (антагонистический); 3) значительно выше суммы эффектов отдельных соединений (синергетический) [25].

Комбинации нутрицевтиков обладают рядом достоинств: позволяют снизить дозу каждого из соединений, снизить сразу несколько параметров по сравнению с любым отдельным компонентом, уменьшение побочных эффектов одного нутрицевтика за счёт другого [26, 27]. Сочетание нутрицевтиков из разных категорий, таких как фрукты и бобовые, повышает вероятность синергетического эффекта, в сравнении с сочетанием нутрицевтиков одной категории (фрукты с фруктами или бобовые с бобовыми).

Между тем, синергетический эффект заключается в воздействии на различные механизмы или активации новых механизмов. Куркумин и докозагексаеновая кислота продемонстрировали синергетический антипролиферативный эффект против клеток рака молочной железы SK-BR-3 [25].

Доза каждого нутрицевтика в комбинации может изменить эффект при сохранении пропорции, но разные пропорции каждого нутрицевтика в комбинации могут вызывать разные эффекты. Таким образом, важно составлять смеси, в которых концентрация каждого соединения может быть достигнута в организме человека

применением всех компонентов. Введение каждого компонента в разное время и последовательности может привести к разным эффектам.

Для максимизации эффективности комбинированных нутрицевтиков необходимо учитывать несколько факторов: пищеварение, всасывание и метаболизм, биодоступность. Так, диализированные экстракты лука и томата не показали различий в антиоксидантной активности по сравнению с расщепленными экстрактами, но у салата она была значительно ниже. Хотя переваренный экстракт чеснока показал значительно более высокую активность по сравнению с сырым экстрактом, диализированный экстракт имел значительно более низкую активность, чем сырой экстракт [28, 29].

Под биодоступностью понимается сколько соединения может быть высвобождено из пищевой матрицы в желудочно-кишечном тракте и быть доступным для использования организмом. Соединения в напитках более биодоступны, чем твердые продукты, поскольку пищевая матрица в напитках распадается, облегчая организму доступ к питательным веществам и нутрицевтикам [30]. На биодоступность может влиять физическая и химическая обработка компонентов пищи, что влияет на взаимодействие и активность нутрицевтиков [31, 32].

Температура, pH, активность воды, содержание микроорганизмов, ферментативная активность, солнечный свет и материал упаковки, могут влиять на длительность активности нутрицевтиков в продукте. К методам продления срока годности причисляют: пастеризацию, бланширование, стерилизацию, термическую дегидратацию, подкисление и добавление сахаров, солей или консервантов, за счет ингибирования микроорганизмов и инактивации ферментов, но могут ухудшить качество нутрицевтиков и изменить органолептические характеристики продукта или быть негативно восприняты потребителями (например, искусственные консерванты). Перспективными технологиями, увеличивающими срок годности за счет уничтожения микроорганизмов и инактивации ферментов, сохраняя при этом органолептические характеристики продукта, являются ультразвук, ультрафиолетовое облучение, холодная плазма и облучение [33].

Для демонстрации влияния нутрицевтиков как нельзя лучше подходят исследования, проведенные с участием спортсменов, так как их организм подвергается повышенным нагрузкам. Добавки спортсменами используются для компенсации дефицита питательных веществ и достижения оптимальной потребности в энергии. Так в исследовании [34] с применением метаболической при ретроспективном подходе установлено,

что у легкоатлетов в числе ксенобиотиков (веществ, не образующихся естественным способом в организме) выявлены эвгенол (антиоксидант) и стахидрин (противовоспалительное и антиокислительное действие). У футболистов – кофейная кислота (защита от гипертермического стресса – антиоксидант); у боксёров – ретинол и тиопролин (антиоксиданты), а также 2-пирролидинон (противоэпилептическое средство).

Эти эффекты, в том числе, можно объяснить и межиндивидуальной вариативностью реакций на одно и то же диетическое воздействие, что обеспечивает биологическое обоснование концепции: при лучшем понимании основы этой изменчивости можно разработать рекомендации по питанию (продуктам питания), адаптированному для конкретного человека [35, 36]. Секвенирование генома человека и развитие постгеномных технологий привело к быстрому изменению ситуации: диетические рекомендации могут быть адаптированы к индивидуальному генотипу, что приведёт к улучшению здоровья. Стоит отметить, что получение индивидуальных оценок риска заболевания на основе генетики может не влиять на ключевые модели поведения того или иного человека в отношении здоровья своего здоровья – данные могут носить рекомендательный характер, а пищевое поведение выбирает непосредственно человек [37]. Например, при информировании испытуемых о наличии рискованного варианта гена ACE (повышенная чувствительность к неблагоприятным последствиям высокого потребления соли), ими может быть принято решение о снижении потребления натрия, что даёт ощутимый результат уже через 12 месяцев после изменения рациона. Однако испытуемые могут остаться с прежними пищевыми привычками даже при информировании о наличии у них вариантов риска в генах CYP1A2, GSTM1 и GSTT1 и TAS1R2, оказывающих влияние при потреблении, соответственно, кофеина, витамина С или сахаров [37].

Использование омических подходов потребует крупномасштабный сбор личных физиологических и других данных, которые можно использовать для поддержки персонализированного питания. Так называемые «большие данные» были использованы в оздоровительном проекте Pioneer 100 [38, 39], предусматривающем объединение: лабораторных измерений с использованием омических подходов на биологических образцах (щечных клетках, крови, волосах, моче, стуле, выдыхаемом воздухе и т. д.), собранных физическими лицами в домашних условиях с использованием простых, безопасных

и недорогих технологий; часто отбираемых экологических, физиологических, носимых или других устройств с доступом в Интернет, находящихся во владении или поблизости каждого человека; данных о потребляемой пище; данных медицинской карты (наличие заболеваний). В этой области исследований появляются как концептуальные проблемы исследований – какая общая модель позволяет интегрировать набор динамических данных, так и практические – как эти данные получить и структурировать без потери достоверности и информативности.

Для упрощения сложных и динамичных биологических задач до более понятных формул разработано много интересных стратегий, таких как теория сетей. Теория была применена к клеточным регуляторным сетям, раскрывающим ключевые гены-драйверы или модули патогенеза заболевания [40] – [42]. Метаболическое моделирование в масштабе генома может использоваться для объяснения метаболических фенотипов в живых системах, например, тканях и органах человека, микробиоме кишечника человека и бактерии [43, 44].

Сообщество системной биологии создана вычислительная «карта» для изучения сложности метаболизма с помощью генома, она показывает связь всех метаболитов через реакции, которые контролируются ферментами. С помощью генома можно изучить функциональную роль микробиома кишечника человека, вклад в метаболизм хозяина. Метаболические изменения, вызванные диетой, вызванные микробиомом [45, 46, 47] могут быть изучены с помощью современных алгоритмов моделирования микробного сообщества с использованием микробных геномов, известных как набор инструментов интерактивной оптимизации на уровне сообщества и систем [42].

Если далее переходить к части разработки технологии ПД и БАД к пище для коммерческого применения, то на основании выбранных маркеров и получения данных о влиянии указанных добавок на организм требуется применение определённого алгоритма (схемы). Разработка БАД к пище и ПД может быть представлена по следующей схеме: 1) выбор целевой патологии/ хронического дегенеративного заболевания или другой эффект; 2) целевой эффект разрабатываемого продукта (профилактический, лечебный, профилактико-лечебный); 3) конкретизация выбранного эффекта (антиоксидантный, противовоспалительный, противораковый и т. д.); 4) выбор нутрицевтика-кандидата; 5) выбор наилучшей комбинации; 6) проведение исследований по биодоступности; 7) тестирование на животных; 8) тестирование на людях для установления дозировки; 9) определение срока годности [48].

Персонализированное питание – отрасль, требующая глубоких исследований в области влияния как монокомпонентных ПД и БАД к пище, так и комплексных составов (комбинированных составов). При этом учёными ряда стран не поставлена точка в понимании выбора тех или иных маркеров, на которые стоит опираться при оценке влияния указанных добавок на отклик организма и сам метод оценки. Кроме этого по данным [44] определённую сложность вызывает накопление массива данных о состоянии испытуемых, условиях получения этих данных и объективности оценки состояния.

В случае разработки технологии ПД и БАД к пище в Российской Федерации, алгоритм, предложенный Vlaicu P.A. et al. [48], можно адаптировать, отталкиваясь от имеющихся ресурсов и задач по их использованию. Например, реализуя Программу развития сельского хозяйства, где предусмотрено развитие селекции отечественных сортов сахарной свёклы и наращивание производства сахара. В результате достижения индикаторных показателей неизбежен рост объёмов производства и побочного продукта свеклосахарного производства – свекловичного жома. В данном случае первым этапом при разработке ПД или БАД к пище будет конкретизация выбранного эффекта или выбор наилучшей комбинации (если нужно усилить достигаемый эффект), а этап выбора нутрицевтика-кандидата, как в исследовании [10, 30], может быть опущен. Так, зная что свекловичный жом богат спектром пищевых волокон: пектиновыми веществами, гемицеллюлозами, целлюлозой, лигнином, а также макро- и микронутриентами, обладающими свойствами нормализации углеводного и липидного обмена – целевая патология, выбранный эффект и конкретизация выбранного эффекта уже известны. В данном случае можно работать с метаболическим синдромом (патологией) [45, 13] для достижения нормализации липидного обмена (конкретизация выбранного эффекта) как профилактическая или лечебно-профилактическая мера (выбранный эффект). Исследовать синергетические и антагонистические эффекты с другими добавками, указанными в [4, 25, 10], а также исследовать биодоступность, согласно [28, 30].

В схеме [44] не предусмотрено исследование персонального влияния с применением омикс-подходов, оно вскользь упоминается как выбор целевой патологии. Вот на этом этапе появляется самый важный выбор – подбор маркеров, позволяющих всесторонне охватить исследование причинно-следственных связей. Этап доказывания эффективности и безопасности разрабатываемого продукта тестированием на

лабораторных животных может быть опущен для определённого генотипа или для нейтрализации негативного влияния экологической обстановки, как в случае [17, 19], а клинические испытания на фокус-группе потребуются в обязательном порядке.

Заключение

Мировая научная мысль в области разработки ПД и БАД к пище для персонализированного питания на сегодняшний день ограничена существующими представлениями о разнонаправленности их действия – как положительном, так и отрицательном; законодательной базой каждого отдельного государства, требующей прохождения определённых этапов для производства коммерческого продукта и его продвижения на рынке. Эти ограничения также связаны с необходимостью длительных и дорогостоящих клинических испытаний, как на лабораторных животных, так и на людях. Снятием одного из существующих ограничений является применение омикс-подходов, позволяющих подготовить предложение ПД и / или БАД к пище для определённой группы людей, с одинаковым генотипом.

Скорее всего, применение омикс-подходов приведёт к необходимости не только существенно изменить количество этапов разработки технологии ПД и БАД к пище, но и нормативную базу для их введения на рынок для коммерческого использования. Количество и последовательность этапов также может зависеть от начальной задачи, поставленной перед учёными – работа с определёнными сырьевыми источниками или работа с целевой патологией и желаемый эффект.

Таким образом, применение омикс-подходов открывает новый этап в подходе к разработке технологий пищевых добавок и биологически активных добавок в пищу и позволяет исключить этап тестирования на животных.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования НИИ Биотехнологии и сертификации пищевой продукции ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда, ООО «БИОДИНАМИКА» в рамках проекта № НТИП-24.1/4 «Разработка технологии продуктов здорового питания из вторичных сырьевых ресурсов переработки яблок».

References

- 1 El-Saadony M.T., Yang T., Korma S.A., Sitohy M. et al. Impacts of turmeric and its principal bioactive curcumin on human health: Pharmaceutical, medicinal, and food applications: A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*. 2023. no. 9. article 1040259. doi: 10.3389/fnut.2022.1040259.
- 2 Ganesan K., Du B., Chen J. Effects and mechanisms of dietary bioactive compounds on breast cancer prevention. *Pharmacological Research*. 2022. no. 178. article 105974. doi: 10.1016/j.phrs.2021.105974.
- 3 Stubbs R.J., Horgan G., Robinson E., Hopkins M. et al. Diet composition and energy intake in humans. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2023. no. 378(1888). article 20220449. doi: 10.1098/rstb.2022.0449.
- 4 Joshi T., Deepa P.R., Sharma P.K. Effect of different proportions of phenolics on antioxidant potential: Pointers for bioactive Synergy/Antagonism in foods and nutraceuticals. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*. 2022. no. 92(4). pp. 939–946. doi: 10.1007/s40011-022-01396-6.
- 5 Berillo D., Ermukhambetova A. The review of oral adsorbents and their properties. *Adsorption*. 2024. no. 30(6). pp. 1505–1527. doi: 10.1007/s10450-024-00515-1.
- 6 Bortolini D.G., Maciel G.M., Fernandes I.D.A.A., Pedro A.C. et al. Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: Current status and future trends. *Food Chemistry: Molecular Sciences*. 2022. no. 5. article 100134. doi: 10.1016/j.fochms.2022.100134.
- 7 Shyam S., Lee K.X., Tan A.S.W., Khoo T.A. et al. Effect of personalized nutrition on dietary, physical activity, and health outcomes: a systematic review of randomized trials. *Nutrients*. 2022. no. 14(19). article 4104. doi: 10.3390/nu14194104.
- 8 Chen X., Zhang J., Yin N., Wele P. et al. Resveratrol in disease prevention and health promotion: A role of the gut microbiome. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. no. 64(17). pp. 5878–5895. doi: 10.1080/10408398.2022.2159921.
- 9 Jaskulski S., Nuszbaum C., Michels K.B. Components, prospects and challenges of personalized prevention. *Frontiers in Public Health*. 2023. no. 11. article 1075076. doi: 10.3389/fpubh.2023.1075076.
- 10 Mecca M., Sichetti M., Giuseffi M., Giglio E. et al. Synergic Role of Dietary Bioactive Compounds in Breast Cancer Chemoprevention and Combination Therapies. *Nutrients*. 2024. no. 16(12). article 1883. doi: 10.3390/nu16121883.
- 11 Pandey D., Nandave M., Kumar A. Pharmacovigilance System in the USA. In *Pharmacovigilance Essentials: Advances, Challenges and Global Perspectives*. 2024. pp. 183–197. Singapore: Springer Nature Singapore. doi: 10.1007/978-981-99-8949-2_9.
- 12 Pandey H., Tang D.W., Wong S.H., Lal D. Gut microbiota in colorectal cancer: biological role and therapeutic opportunities. *Cancers*. 2023. no. 15(3). article 866. doi: 10.3390/cancers15030866.
- 13 Thomas M.S., Blesso C.N., Calle M.C., Chun O.K. et al. Dietary influences on gut microbiota with a focus on metabolic syndrome. *Metabolic Syndrome and Related Disorders*. 2022. no. 20(8). pp. 429–439. doi: 10.1089/met.2021.0131.
- 14 Ugwu E.I., Karri R.R., Nnaji C.C., John J. et al. Application of green nanocomposites in removal of toxic chemicals, heavy metals, radioactive materials, and pesticides from aquatic water bodies. In *Sustainable Nanotechnology for Environmental Remediation*. 2022. pp. 321–346. Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-824547-7.00018-7.
- 15 Mikhaylovsky S., Voytko A., Demchenko V., Demchenko P. Enterosorption in the treatment of heavy metal poisoning. *Chemistry Journal of Moldova*. 2021. no. 16(2). pp. 9–27. doi: 10.19261/cjm.2021.852.
- 16 Muela-Molina C., Perelló-Oliver S., García-Arranz A. False and misleading health-related claims in food supplements on Spanish radio: an analysis from a European Regulatory Framework. *Public Health Nutrition*. 2021. no. 24(15). pp. 5156–5165. doi: 10.1017/S1368980021002007.

- 17 Volobuev A., Romanchuk N., Bulgakova S. Brain Neurogenetics: Human Sleep and Longevity. *Bulletin of Science and Practice*. 2021. no. 7(3). pp. 93–135. doi: 10.33619/2414-2948/64/12 (in Russian).
- 18 Kovalenko E., Vergasova E., Shoshina O., Popov I. et al. Lactase deficiency in Russia: multiethnic genetic study. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2023. no. 77(8). pp. 803–810. doi: 10.1038/s41430-023-01294-8 (in Russian).
- 19 Morgunova E.M. Scientific and methodological approaches to the creation of the concept of personalized nutrition. *Food Industry: Science and Technology*. 2020. no. 13(2). pp. 6–13. (in Russian).
- 20 O'Dea R.E., Lagisz M., Jennions M.D., Koricheva J. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses in ecology and evolutionary biology: a PRISMA extension. *Biological Reviews*. 2021. no. 96(5). pp. 1695–1722. doi: 10.1111/brv.12721.
- 21 Sarkis-Onofre R., Catalá-López F., Aromataris E., Lockwood C. How to properly use the PRISMA Statement. *Systematic Reviews*. 2021. no. 10. article 1. doi: 10.1186/s13643-021-01671-z.
- 22 Lin S., Agger J.W., Wilkens C., Meyer A.S. Feruloylated arabinoxylan and oligosaccharides: chemistry, nutritional functions, and options for enzymatic modification. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2021. no. 12(1). pp. 331–354. doi: 10.1146/annurev-food-032818-121443.
- 23 Polo A., Albiac M.A., Da Ros A., Ardèvol V.N. et al. The Effect of Hydrolyzed and Fermented Arabinoxylan-Oligo Saccharides (AXOS) Intake on the Middle-Term Gut Microbiome Modulation and Its Metabolic Answer. *Nutrients*. 2023. no. 15(3). article 590. doi: 10.3390/nu15030590.
- 24 Nie Q., Hu J., Chen H., Geng F., Nie S. Arabinoxylan ameliorates type 2 diabetes by regulating the gut microbiota and metabolites. *Food Chemistry*. 2022. no. 371. article 131106. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131106.
- 25 Slavova-Kazakova A., Janiak M.A., Sulewska K., Kancheva V.D., Karamac M. Synergistic, additive, and antagonistic antioxidant effects in the mixtures of curcumin with (–)-epicatechin and with a green tea fraction containing (–)-epicatechin. *Food Chemistry*. 2021. no. 360. article 129994. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129994.
- 26 Quaglio A.E.V., Grillo T.G., De Oliveira E.C.S., Di Stasi L.C., Sasaki L.Y. Gut microbiota, inflammatory bowel disease and colorectal cancer. *World Journal of Gastroenterology*. 2022. no. 28(30). pp. 4053–4060. doi: 10.3748/wjg.v28.i30.4053.
- 27 Roux A., Cholerton R., Sicsic J., Moumjid N. et al. Study protocol comparing the ethical, psychological and socio-economic impact of personalised breast cancer screening to that of standard screening in the “My Personal Breast Screening” (MyPeBS) randomised clinical trial. *BMC Cancer*. 2022. no. 22(1). article 507. doi: 10.1186/s12885-022-09484-6.
- 28 Das A., Bhattacharya S., Jawed J.J. Enzymatically Digested Garlic Waste Conserved Most of Its Polyphenols and Contributed to Nrf2 Activation: Bio-accessibility, Bioactivity, Gene Expression, and Genotoxicity Analysis. *Waste and Biomass Valorization*. 2024. [Online first]. doi: 10.1007/s12649-024-02476-6.
- 29 Zhao R., Qiu Z., Bai X., Xiang L. et al. Digestive properties and prebiotic activity of garlic saccharides with different-molecular-weight obtained by acidolysis. *Current Research in Food Science*. 2022. no. 5. pp. 2033–2044. doi: 10.1016/j.crf.2022.10.022.
- 30 Kamiloglu S., Tomas M., Ozdal T., Capanoglu E. Effect of food matrix on the content and bioavailability of flavonoids. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. no. 117. pp. 15–33. doi: 10.1016/j.tifs.2020.10.030.
- 31 Li L., Li D. Inter-individual variability and non-linear dose-response relationship in assessing human health impact from chemicals in lca: addressing uncertainties in exposure and toxicological susceptibility. *Frontiers in Sustainability*. 2021. no. 2. article 648138. doi: 10.3389/frsus.2021.648138.
- 32 Shahidi F., Pan Y. Influence of food matrix and food processing on the chemical interaction and bioaccessibility of dietary phytochemicals: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. no. 62(23). pp. 6421–6445. doi: 10.1080/10408398.2021.1901650.
- 33 Alieozaman Md S., Chwdhury M., Fatima A., Dev M. An overview of spices and herbs as natural antioxidant sources. *Journal of Current Research in Food Science*. 2024. no. 5(1). pp. 31–35. doi: 10.22271/foodsci.2024.v5.i1a.119.
- 34 Malsagova K.A., Kopylov A.T., Stepanov A.A., Enikeev D.V. et al. Molecular profiling of athletes performing high-intensity exercises in extreme environments. *Sports*. 2023. no. 11(2). article 36. doi: 10.3390/sports11020036 (in Russian).
- 35 Chen R., Pearson V., Suebkinorn O., Bulto L.N. et al. Impact of Genetic Risk Information for Cardiovascular Disease on Behavioural, Psychological Responses, and Risk Factor Modification: A Systematic Review. *European Journal of Preventive Cardiology*. 2024. [Online first]. doi: 10.1093/eurjpc/zwae362.
- 36 Guo L., Cao J., Hou J., Li Y. et al. Sex specific molecular networks and key drivers of Alzheimer's disease. *Molecular Neurodegeneration*. 2023. no. 18(1). article 39. doi: 10.1186/s13024-023-00624-5.
- 37 Hood L. Adventures Leading to a Paradigm Shift in Healthcare: Advances in sequencing, big data technology, systems biology, and blood analysis open new paths to wellness. *Genetic Engineering & Biotechnology News*. 2021. no. 41(10). pp. 48–50. doi: 10.1089/gen.41.10.16.
- 38 Marcos-Zambrano L.J., López-Molina V.M., Bakir-Gungor B., Frohme M. et al. A toolbox of machine learning software to support microbiome analysis. *Frontiers in Microbiology*. 2023. no. 14. article 1250806. doi: 10.3389/fmicb.2023.1250806.
- 39 Karatas M., Eriskin L., Deveci M., Pamucar D., Garg H. Big Data for Healthcare Industry 4.0: Applications, challenges and future perspectives. *Expert Systems with Applications*. 2022. no. 200. article 116912. doi: 10.1016/j.eswa.2022.116912.
- 40 Ma Z., Zuo T., Frey N., Rangrez A.Y. A systematic framework for understanding the microbiome in human health and disease: from basic principles to clinical translation. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2024. no. 9(1). article 237. doi: 10.1038/s41392-024-01946-6.
- 41 Kundu P., Beura S., Mondal S., Das A.K., Ghosh A. Machine learning for the advancement of genome-scale metabolic modeling. *Biotechnology Advances*. 2024. no. 74. article 108400. doi: 10.1016/j.biotechadv.2024.108400.
- 42 Park S.H., Choi H.K., Park J.H., Hwang J.T. Current insights into genome-based personalized nutrition technology: a patent review. *Frontiers in Nutrition*. 2024. no. 11. article 1346144. doi: 10.3389/fnut.2024.1346144.
- 43 Sudhakar P., Verstockt B., Cremer J., Verstockt S. et al. Understanding the molecular drivers of disease heterogeneity in Crohn's disease using multi-omic data integration and network analysis. *Inflammatory Bowel Diseases*. 2021. no. 27(6). pp. 870–886. doi: 10.1093/ibd/izaa281.

- 44 Wu S., Chen D., Snyder M.P. Network biology bridges the gaps between quantitative genetics and multi-omics to map complex diseases. *Current Opinion in Chemical Biology*. 2022. no. 66. article 102101. doi: 10.1016/j.cbpa.2021.102101.
- 45 Dey P., Chaudhur S.R., Efferth T., Pal S. The intestinal 3M (microbiota, metabolism, metabolome) zeitgeist—from fundamentals to future challenges. *Free Radical Biology and Medicine*. 2021. no. 176. pp. 265–285. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2021.09.026.
- 46 Zhang B., Zhang Y., Xing X., Wang S. Health benefits of dietary polyphenols: Insight into interindividual variability in absorption and metabolism. *Current Opinion in Food Science*. 2022. no. 48. article 100941. doi: 10.1016/j.cofs.2022.100941.
- 47 Zhang R., Li Q., Gu Y., Liao W. Harnessing the Power of Fermented Tea to Improve Gut Microbiota and Combat Obesity Epidemic. *Biology*. 2024. no. 13(10). article 779. doi: 10.3390/biology13100779.
- 48 Vlaicu P.A., Untea A.E., Varzaru I., Saracila M., Oancea A.G. Designing Nutrition for Health-Incorporating Dietary By-Products into Poultry Feeds to Create Functional Foods with Insights into Health Benefits, Risks, Bioactive Compounds, Food Component Functionality and Safety Regulations. *Foods*. 2023. no. 12. article 4001. doi: 10.3390/foods12214001.

Сведения об авторах

Мария В. Лукьяненко к.т.н., НИИ Биотехнологии и сертификации пищевой промышленности, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия, niibiotechn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2842-3713>

Людмила В. Донченко д.т.н., профессор, НИИ Биотехнологии и сертификации пищевой продукции, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия, niibiotechn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1468-4808>

Артём А. Васильев аспирант, кафедра технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия, vasilevaa@kuban-vino.ru

 <https://orcid.org/0009-0004-6926-6090>

Ирина В. Соболев к.т.н., доцент, заведующая, кафедра технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия, iv-sobol@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0641-6261>

Альбина А. Варивода к.т.н., доцент, кафедра технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия, albin2222@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5931-2119>

Екатерина Ю. Устюгова аспирант, кафедра технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, ул. им. Калинина, 13, г. Краснодар, 350044, Россия, gr.ekaterina.1710@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0004-4366-4808>

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

Mariya V. Lukyanenko Cand. Sci. (Engin.), Research Institute of Biotechnology and Food Certification, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia, niibiotechn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2842-3713>

Ludmila V. Donchenko Dr. Sci. (Engin.), professor, Research Institute of Biotechnology and Food Certification, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia, niibiotechn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-1468-4808>

Artem A. Vasilev graduate student, storage and processing of plant products department, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia, vasilevaa@kuban-vino.ru

 <https://orcid.org/0009-0004-6926-6090>

Irina V. Sobol Cand. Sci. (Engin.), associate professor, storage and processing of plant products department, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia, iv-sobol@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0641-6261>

Albina A. Varivoda Cand. Sci. (Engin.), associate professor, storage and processing of plant products department, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia, albin2222@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5931-2119>

Ekaterina Yu. Ustyugova graduate student, storage and processing of plant products department, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, 13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russia, gr.ekaterina.1710@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0004-4366-4808>

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 10/11/2025	После редакции 25/11/2025	Принята в печать 08/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 25/11/2025	Accepted 08/12/2025

Математическая модель тепло- и массопереноса при вакуумной сушке арахиса с комбинированным теплоподводом

Сергей А. Никель	¹	sergei.nickel@ya.ru	 0000-0001-9043-9452
Сергей В. Лавров	¹	ya-serglavrov@ya.ru	 0000-0002-7031-7738
Александр С. Белозерцев	¹	alex_bel77@mail.ru	 0000-0002-7391-0254

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

Аннотация. В работе представлена математическая модель тепло- и массопереноса для вакуумной сушки арахиса с комбинированным теплоподводом. Модель учитывает два основных периода процесса: поверхностного и внутреннего испарения. Для каждого периода составлены уравнения кинетики сушки и теплового баланса, проведена их линеаризация и получены аналитические и численные решения. Результаты моделирования показали, что влагосодержание арахиса снижается с падающей скоростью, стремясь к равновесному значению. Скорость этого процесса возрастает с увеличением коэффициента сушки. На динамику температуры материала существенное влияние оказывают такие параметры, как удельная поверхность теплопередачи, коэффициент теплопередачи и температура нагревателя. Повышение каждого из них приводит к более интенсивному росту температуры продукта. На основе модели решена задача оптимального управления процессом с критериями минимизации продолжительности сушки при ограничении на максимально допустимую температуру материала. Показано, что оптимальный режим заключается в максимально быстром нагреве продукта до допустимого предела с последующим поддержанием этой температуры за счет управляемого изменения температуры нагревателя. Установлено, что реализация оптимального непрерывного или ступенчатого режима существенно сокращает время сушки по сравнению с режимом постоянной температуры нагревателей. Основные выводы работы: разработанная модель адекватно описывает физическую картину процесса вакуумной сушки с комбинированным теплоподводом; определены эффективные стратегии управления теплоподводом, обеспечивающие сокращение продолжительности сушки без превышения допустимой температуры продукта. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования и оптимизации работы вакуумных сушильных аппаратов.

Ключевые слова: вакуумная сушка, арахис, тепло- и массоперенос, математическое моделирование, комбинированный теплоподвод, оптимальное управление, кинетика сушки.

Mathematical model of heat and mass transfer during the vacuum drying of peanuts with combined heat supply

Sergey A. Nickel	¹	sergei.nickel@ya.ru	 0000-0001-9043-9452
Sergey V. Lavrov	¹	ya-serglavrov@ya.ru	 0000-0002-7031-7738
Alexandr S. Belozertsev	¹	alex_bel77@mail.ru	 0000-0002-7391-0254

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

Abstract. The paper presents a mathematical model of heat and mass transfer for the vacuum drying of peanuts with combined heat input. The model takes into account two main stages of the process: surface evaporation and internal evaporation. For each stage, drying kinetic equations and heat balance equations were formulated, linearized, and solved both analytically and numerically. The simulation results showed that the moisture content of peanuts decreases at a decreasing rate, approaching an equilibrium value. The rate of this process increases with a higher drying coefficient. The dynamics of the material temperature are significantly influenced by such parameters as the specific heat transfer surface area, the heat transfer coefficient, and the heater temperature. An increase in any of these parameters leads to a more intensive rise in product temperature. Based on the model, an optimization problem for process control was solved, with criteria including minimizing drying time under a constraint on the maximum allowable material temperature. It was shown that the optimal regime consists of heating the product to the allowable limit as quickly as possible, followed by maintaining this temperature through controlled adjustment of the heater temperature. It was established that implementing an optimal continuous or stepwise regime significantly reduces drying time compared to a constant heater temperature regime. The main conclusions of the work are: the developed model adequately describes the physical nature of the vacuum drying process with combined heat input; effective heat input control strategies were identified, ensuring a reduction in drying time without exceeding the allowable product temperature. The obtained results are of practical importance for the design and optimization of vacuum drying equipment.

Keywords: vacuum drying, peanuts, heat and mass transfer, mathematical modeling, combined heat input, optimal control, drying kinetics.

Введение

Арахис является ценным сырьем для пищевой промышленности. От выбора способа сушки и режимных параметров этого термолабильного материала существенно зависят интенсивность сушки, исключая потери материала из-за его порчи, способность высушенного материала к длительному хранению,

а также его качественные показатели [1–5]. Использование «мягких» температурных режимов положительно сказывается на качестве материала при его последующей обжарке. Это и определило выбор вакуумного способа сушки с комбинированным теплоподводом, в полной мере отвечающего всем перечисленным требованиям [6–10].

Для цитирования

Никель С.А., Лавров С.В., Белозерцев А.С. Математическая модель тепло- и массопереноса при вакуумной сушке арахиса с комбинированным теплоподводом // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 173–180. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-173-180

For citation

Nikel S.A., Lavrov S.V., Belozertsev A.S. Mathematical model of heat and mass transfer during the vacuum drying of peanuts with combined heat supply. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 173–180. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-173-180

Материалы и методы

Считаем, что процесс протекает в сушильной камере, содержащей пар удаляемой жидкости и незначительное количество посторонних газов (в том числе воздуха), которые непрерывно удаляются из камеры так, что в ней поддерживается постоянное давление $p \approx p_n = const$.

Камера снабжена нагревателями, их температура T_c является управляемым параметром. Передача теплоты от нагревателей к материалу может быть кондуктивной, конвективной, радиационной или совокупной. В последнем случае теплота передается всеми тремя способами одновременно, то есть имеет место сложный теплообмен.

Составим математическое описание обоих периодов сушки: периода поверхностного испарения (1-го периода сушки) и периода внутреннего испарения (2-го периода сушки) при комбинированном теплоподводе.

Результаты

Период поверхностного испарения (1-й период сушки). В этом периоде испарение влаги локализовано на поверхности материала и скорость ее испарения определяется интенсивностью внутреннего и внешнего подвода теплоты к поверхности испарения. Поэтому уравнение кинетики сушки имеет вид:

$$du_1(\tau) / d\tau = -(rM)^{-1} \times [k_\lambda F_T (T_1(\tau) - T_s) + k_\alpha F_T (T_c - T_s)], \quad (1)$$

Температуру насыщенного пара (она равна температуре поверхности продукта) принимаем $T_c = const$. В уравнении (1) и далее по тексту индексы 1 и 2 у переменных $u(\tau)$ и $T(\tau)$ относят его к 1-му и 2-му периодам сушки.

Уравнение теплового баланса:

$$k_\alpha F_T (T_c - T_s) = M(c + c_b u_1(\tau)) \times dT_1(\tau) / d\tau - rM du_1(\tau) / d\tau. \quad (2)$$

где левая часть представляет тепловой поток от нагревателей к поверхности материала, а первый и второй члены правой части – тепловые потоки, направленные, соответственно на изменение средней температуры материала и на испарение влаги. Коэффициент теплопередачи k_α учитывает различные виды внешнего теплообмена – контактную теплопроводность, конвекцию и излучение (в линейном приближении), а коэффициент k_λ представляет механизм внутреннего теплопереноса путем обычной теплопроводности и перемещения влаги в порах (капиллярах). Оба эти коэффициента условно приведены к общей поверхности теплопередачи F_T .

Известно, что значения удельной теплоемкости различных материалов и удельной теплоты испарения в зависимости от температуры изменяются в довольно узком диапазоне. Поэтому в дальнейшем считаем, что величины c, c_b, r не зависят от температуры в пределах ее изменения в данном процессе. Кроме того, принимаем приближенно

$$c_{mn} = c + c_b u_1 \approx c + c_b u_n. \quad (3)$$

Такое допущение оправдано, поскольку производная $dT_1(\tau) / d\tau$ существенна лишь в начальной стадии первого периода, когда величина $u_1(\tau)$ незначительно отличается от начального влагосодержания материала u_n . В этом случае система уравнений (1), (2) становится линейной.

Введя безразмерные комплексы K_r, K_λ, K_α и перейдя к безразмерным переменным $t_1 = T_1 / T_s$, $t_c = T_c / T_s$ и $\theta = K\tau$, получим решение системы (1), (2):

$$u_1(\theta) = u_n + K_\alpha K_r^{-1} \theta - K_r^{-1} (t_n - 1) \times [1 - \exp(-K_\lambda \theta)] - K_\alpha K_r^{-1} \int_0^\theta (t_c - \eta) d\eta; \quad (4)$$

$$t_1(\theta) = 1 + (t_n - 1) \exp(-K_\lambda \theta). \quad (5)$$

$$u_1(0) = u_n$$

$$t_1(0) = t_n.$$

Безразмерный комплекс $t_n = T_n / T_s$, где T_n – начальная температура материала.

В частном случае, при $t_c = const$ из (4) следует:

$$u_1(\theta) = u_n + K_\alpha K_r^{-1} (t_c - 1) \theta - K_r^{-1} (t_n - 1) [1 - \exp(-K_\lambda \theta)]; \quad (6)$$

Период внутреннего испарения (2-й период сушки). Существенным признаком рассматриваемого периода является рассредоточение зоны испарения влаги по объему материала. Основным фактором, лимитирующим скорость сушки в этом периоде, является скорость внутреннего влагопереноса, и уравнение кинетики сушки имеет вид:

$$du_2(\tau) / d\tau = -K(u_2(\tau) - u_p), \quad (7)$$

Равновесное влагосодержание u_p зависит от давления пара и температуры материала, но при достаточно низком остаточном давлении оно практически близко к нулю. Тогда

$$du_2(\tau) / d\tau = -K \cdot u_2(\tau) \quad (8)$$

Уравнение теплового баланса запишем в виде:

$$k_T F_T (T_c - T_2(\tau)) = M[c + c_b u_2(\tau)] dT_2(\tau) / d\tau - M[r + c_n (T_2(\tau) - T_s)] du_2(\tau) / d\tau \quad (9)$$

Левая часть уравнения (9) представляет тепловой поток от нагревателей в объем материала, а второй член правой части – суммарный поток, идущий на испарение и перегрев пара. Коэффициент k_T учитывает как внешние, так и внутренние механизмы переноса теплоты.

Обычно величина $c_n(T_2(\tau) - T_s)$, входящая в уравнение (9), мала по сравнению с r , и ею можно пренебречь. Кроме того, будем считать, что величины c, c_b, r не зависят от температуры в пределах ее изменения в данном процессе.

Разделив левую и правую часть уравнения (9) на M и объединив его с (8) получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} k_m f_m(T_c - T_2(\tau)) &= (c + c_b u_2(\tau)) \times \\ &\times dT_2(\tau) / d\tau - r \times du_2(\tau) / d\tau; \\ du_2(\tau) / d\tau &= -K \times u_2(\tau); \\ u_2(\tau^*) &= u_1(\tau^*) = u^*; \\ T_2(\tau^*) &= T_1(\tau^*) = T^*, \end{aligned} \quad (10)$$

где τ^* – момент времени, соответствующий переходу от режима поверхностного испарения в режим внутреннего испарения, с; u^* – «критическое» влагосодержание материала, кг влаги/кг сухого материала; T^* – температура материала в конце 1-го периода сушки, К.

Уравнение (8) является дифференциальным уравнением с разделяющимися переменными. Результатом его решения является:

$$u_2(\tau) = u^* \exp(-K\tau). \quad (11)$$

Подставив (8) и (11) в уравнение (10) получим:

$$\begin{aligned} k_T f_T(T_c - T_2(\tau)) &= (c + c_b \cdot u^* \exp(-K\tau)) \times \\ &\times dT_2(\tau) / d\tau + r \cdot K \cdot u^* \exp(-K\tau) \\ \text{Тогда} \\ dT_2(\tau) / d\tau &= \\ &= \frac{k_T f_T(T_c - T_2(\tau)) - r \cdot K \cdot u^* \cdot \exp(-K\tau)}{c + c_b \cdot u^* \cdot \exp(-K\tau)}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$u_2(\tau^*) = u_1(\tau^*) = u^*;$$

$$T_2(\tau^*) = T_1(\tau^*) = T^*.$$

В случае отсутствия 1-го периода сушки, начальными условиями будут

$$u_2(0) = u_n; \quad (13)$$

$$T_2(0) = T_n. \quad (14)$$

Уравнение (12) является линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка, решение которого можно найти методом Бернули или методом вариации произвольной постоянной. Однако при решении возникают интегралы, которые нельзя вычислить на классе элементарных функций. Поэтому были проведены вычислительные эксперименты в среде редактора MathCAD и получены решения уравнений (11) и (12) в виде графических зависимостей $u(\tau)$ и $T(\tau)$ с известными начальными условиями $u(\tau_0)$ и $T(\tau_0)$. Поведение переменных параметров материала во 2-м периоде показано на рисунках 1–5.

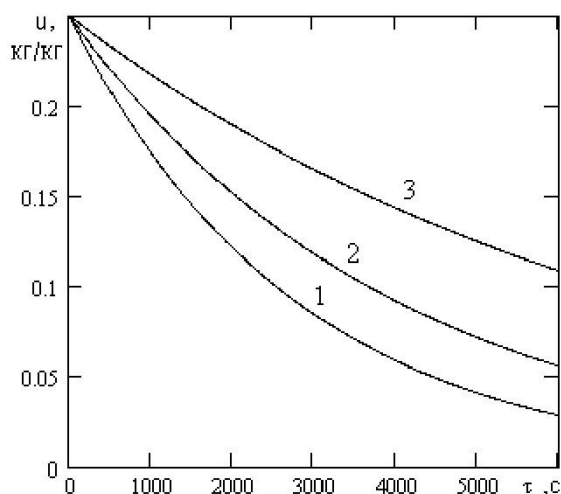


Рисунок 1. Расчетные кривые сушки арахиса при $p = 9,8$ кПа, $T_c = 323$ К, $k_r = 60$ Вт/(м²·К), $f_t = 0,16$ м²/кг для различных значений коэффициента сушки K , ч⁻¹: 1 – 1,3; 2 – 0,9; 3 – 0,5

Figure 1. Calculated drying curves for peanuts at $p = 9.8$ kPa, $T_c = 323$ K, $k_r = 60$ W/(m²·K), $f_t = 0.16$ m²/kg for various values of the drying coefficient K , h⁻¹: 1 – 1.3; 2 – 0.9; 3 – 0.5

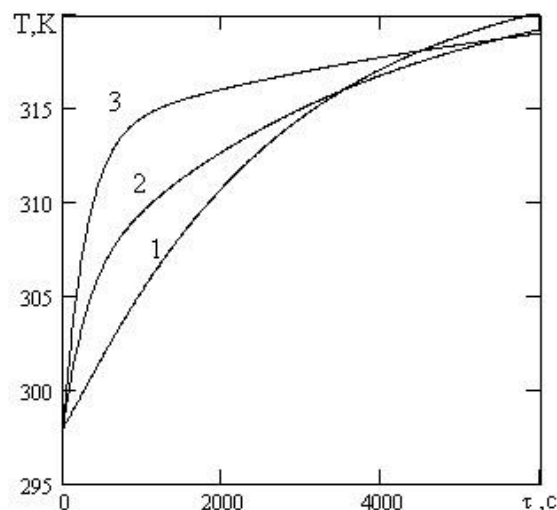


Рисунок 2. Расчетные температурные кривые процесса вакуумной сушки арахиса при $p = 9,8$ кПа, $T_c = 323$ К, $k_r = 60$ Вт/(м²·К), $f_t = 0,16$ м²/кг для различных значений коэффициента сушки K , ч⁻¹: 1 – 1,3; 2 – 0,9; 3 – 0,5

Figure 2. Calculated temperature curves of the vacuum drying process for peanuts at $p = 9.8$ kPa, $T_c = 323$ K, $k_r = 60$ W/(m²·K), $f_t = 0.16$ m²/kg for various values of the drying coefficient K , h⁻¹: 1 – 1.3; 2 – 0.9; 3 – 0.5

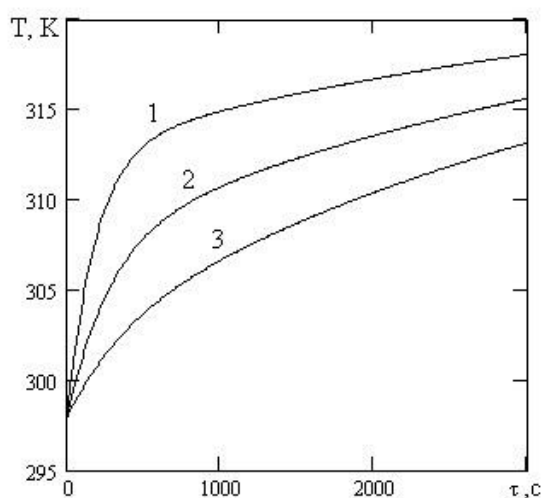


Рисунок 3. Расчетные температурные кривые процесса вакуумной сушки арахиса при $p = 9,8$ кПа, $K = 0,87$ ч⁻¹, $T_c = 323$ К, $k_r = 60$ Вт/(м²·К) для различных значений удельной поверхности теплопередачи f_t , м²/кг: 1 – 0,25; 2 – 0,17; 3 – 0,13

Figure 3. Calculated temperature curves of the vacuum drying process for peanuts at $p = 9.8$ kPa, $K = 0.87$ h⁻¹, $T_c = 323$ K, $k_r = 60$ W/(m²·K) for various values of the specific heat transfer surface area f_t , m²/kg: 1 – 0.25; 2 – 0.17; 3 – 0.13

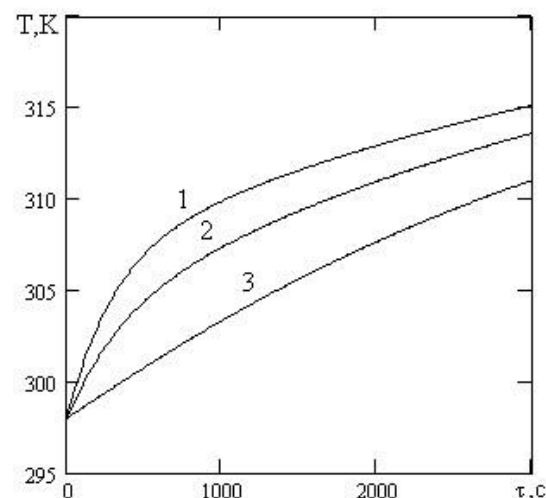


Рисунок 4. Расчетные температурные кривые процесса вакуумной сушки арахиса при $p = 9,8$ кПа, $K = 0,87$ ч⁻¹, $T_c = 323$ К, $f_t = 0,16$ м²/кг для различных значений коэффициента теплопередачи k_r , Вт/(м²·К): 1 – 60; 2 – 50; 3 – 40

Figure 4. Calculated temperature curves of the vacuum drying process for peanuts at $p = 9.8$ kPa, $K = 0.87$ h⁻¹, $T_c = 323$ K, $f_t = 0.16$ m²/kg for various values of the heat transfer coefficient k_r , W/(m²·K): 1 – 60; 2 – 50; 3 – 40

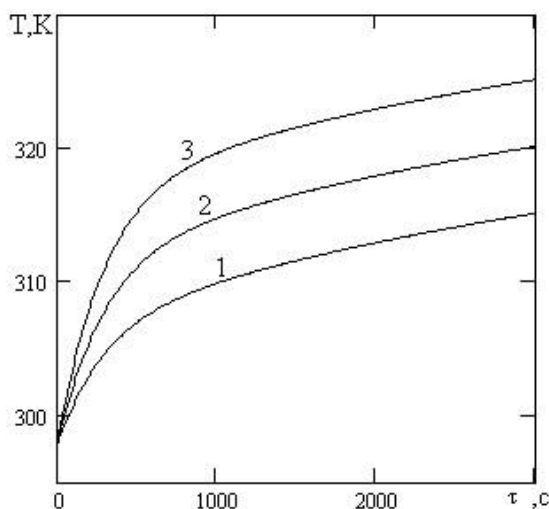


Рисунок 5. Расчетные температурные кривые процесса сушки арахиса при $p = 9,8$ кПа, $K = 0,87 \text{ ч}^{-1}$, $f_t = 0,16 \text{ м}^2/\text{кг}$, $k_t = 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для различных значений температуры нагревателя T_c , К: 1 – 323; 2 – 328; 3 – 333

Figure 5. Calculated temperature curves of the drying process for peanuts at $p = 9.8$ kPa, $K = 0.87 \text{ h}^{-1}$, $f_t = 0.16 \text{ m}^2/\text{kg}$, $k_t = 60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ for various values of the heater temperature T_c , K: 1 – 323; 2 – 328; 3 – 333

Влагосодержание арахиса (рисунок 1) уменьшается с падающей скоростью, стремясь к равновесному значению, причем тем значительнее, чем выше значение коэффициента сушки K . Скорость повышения температуры арахиса в начале процесса (рисунок 2) напротив ниже при больших значениях коэффициента сушки, поскольку значительная часть передаваемой теплоты расходуется на испарение влаги из материала, а не на повышение его температуры. Однако по истечении определенного времени отмечается более интенсивное повышение температуры материала при более высоких значениях K . Температура материала повышается тем быстрее, чем больше значения удельной поверхности теплопередачи f_t (рисунок 3), коэффициента теплопередачи k_t (рисунок 4) и температуры нагревателя T_c (рисунок 5).

Оптимальное управление процессом вакуумной сушки. Основные критерии оптимизации сушильных процессов, мало зависящие от изменчивой конъюнктуры и сравнительно просто поддающиеся количественной оценке, таковы (в приоритетном порядке): качество получаемого продукта, удельные энергозатраты (на единицу массы испаренной влаги) и продолжительность сушки. При вакуумной сушке удельные энергозатраты слабо зависят от интенсивности процесса, поэтому главными критериями

остаются качество продукта и продолжительность сушки. Первый из них обычно задают в виде ограничения на температуру материала (в некоторых случаях во избежание растрескивания и коробления материала ограничивают также градиенты температуры и влагосодержания). Поскольку с повышением температуры материала скорость влагоудаления всегда возрастает, задача оптимизации сводится к управлению теплоподводом так, чтобы материал максимально быстро нагрелся до допустимой температуры, а далее его температура оставалась постоянной. Максимально быстрый нагрев материала можно обеспечить, максимально увеличив температуру нагревателя T_{c1} в начале процесса. В этом случае T_{c1} ограничена только допустимым градиентом температуры для данного материала. В ходе дальнейшего процесса температура материала должна оставаться постоянной и равной максимально допустимой для данного продукта, т. е.

$$\begin{aligned} T_1(\tau) &= \text{var}; \\ T_{c1} &= T_{\text{max}} = \text{const} \end{aligned} \quad (15)$$

$$T_2(\tau) = T_d = \text{const}; T_{c2}(\tau) = \text{var}. \quad (16)$$

Хотя T_d может изменяться при переходе от одного к другому режиму сушки, далее для простоты считаем ее постоянной. Следовательно, задача оптимизации процесса состоит в определении такой функции $T_c(\tau)$, которая обеспечивала бы выполнение условий (15), (16).

Будем считать, что процесс с самого начала вступает в стадию внутреннего испарения.

Для начального этапа уравнения (11), (12) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} u_1(\tau) &= u_n \exp(-K\tau). \\ dT_1(\tau)/d\tau &= \frac{k_t f_t (T_{\text{max}} - T_1(\tau)) - r \cdot K \cdot u_n \cdot \exp(-K\tau)}{c + c_b \cdot u_n \cdot \exp(-K\tau)}; \end{aligned}$$

После достижения температуры материала $T_1(\tau) = T_d$, что соответствует моменту времени $\tau_{\text{кр}}$ начинает выполняться условие $dT_2(\tau)/d\tau = 0$. Найдем функцию $T_{c2}(\tau)$ которая обеспечит выполнение условия $dT_2(\tau)/d\tau = 0$.

$$\frac{k_t f_t (T_{c2}(\tau) - T_d) - r \cdot K \cdot u_n \cdot \exp(-K\tau)}{c + c_b \cdot u_n \cdot \exp(-K\tau)} = 0 \quad (17)$$

Тогда:

$$T_{c2}(\tau) = T_d + r \cdot K \cdot u_n \cdot \exp(-K\tau) / k_t f_t \quad (18)$$

Практическая реализация оптимального теплового режима сушки путем непрерывного изменения температуры нагревателей в соответствии с формулой (18) требует специальной системы программного управления. Техническое решение этой задачи упрощается при ступенчатом изменении температуры нагревателей. Особенно просто такой режим теплоподвода осуществляется в аппаратах непрерывного действия, где по ходу перемещения материала устанавливаются нагреватели разной мощности.

В качестве примера проиллюстрируем кинетику процесса вакуумной сушки арахиса в аппарате с комбинированным теплоподводом при различных режимах теплоподвода (рисунок 6). Видно, что при оптимальном непрерывном и ступенчатом режимах сушка протекает существенно быстрее, чем при постоянной температуре нагревателей.

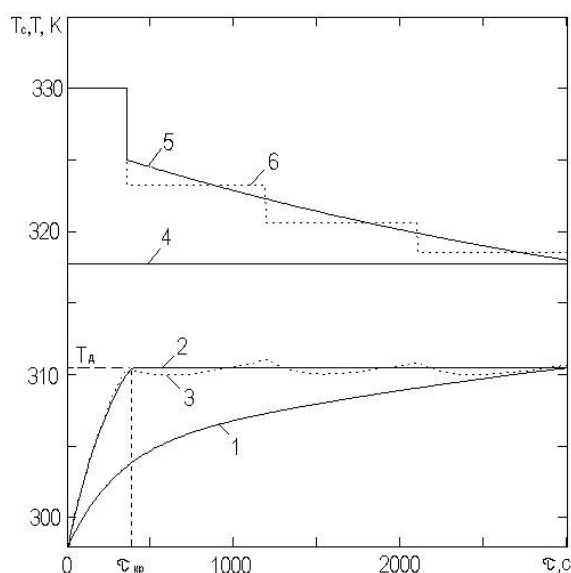


Рисунок 6. Расчетные зависимости температуры материала и нагревателей от времени в процессе сушки арахиса при $p = 9,8$ кПа: 1 – при постоянной температуре нагревателей $T_c = 317$ К; 2, 3 – при непрерывном оптимальном и ступенчатом теплоподводе; линии 4, 5, 6 – соответствующие функции

Figure 6. Calculated dependences of material and heater temperatures on time during the peanut drying process at $p = 9.8$ kPa: 1 – at constant heater temperature = 317 K; 2, 3 – with continuous optimal and stepped heat supply; lines 4, 5, 6 – the corresponding functions

Заключение

В представленной работе разработана математическая модель тепло- и массопереноса для процесса вакуумной сушки арахиса с комбинированным теплоподводом. Модель учитывает особенности двух основных периодов сушки: периода поверхностного и периода внутреннего испарения.

Проведённое математическое описание позволило получить аналитические и численные решения, описывающие изменение влагосодержания и температуры материала во времени. На основе модели исследовано влияние ключевых технологических параметров: коэффициента сушки (K), коэффициента теплопередачи (k_r), удельной поверхности теплопередачи (f_t) и температуры нагревателя (T_c). Результаты вычислительных экспериментов, представленные в виде графических зависимостей, наглядно демонстрируют кинетику процесса и взаимосвязь управляющих факторов.

Сравнение расчётных данных с экспериментальными результатами подтвердило адекватность предложенной модели.

На основе разработанной модели предложен подход к оптимальному управлению процессом сушки. Критериями оптимизации определены качество продукта (ограничение по максимально допустимой температуре материала) и продолжительность процесса. Показано, что оптимальный режим заключается в максимально быстром нагреве материала до допустимого температурного предела с последующим поддержанием этой температуры за счёт программируемого снижения температуры нагревателя. Доказано, что реализация такого режима – как непрерывного, так и упрощённого ступенчатого – позволяет существенно сократить время сушки по сравнению с изотермическим режимом.

Таким образом, работа вносит вклад в теорию сушки термолабильных материалов, предлагая обоснованную математическую модель и практические решения по интенсификации вакуумной сушки арахиса с сохранением его качественных характеристик. Полученные результаты могут быть использованы для расчёта, проектирования и автоматизации сушильных установок комбинированного действия в пищевой промышленности.

Литература

- 1 Mansour N.E., Villagran E., Rodriguez J. et al. Effect of Drying Conditions on Kinetics, Modeling, and Thermodynamic Behavior of Marjoram Leaves in an IoT-Controlled Vacuum Dryer // *Sustainability*. 2025. V. 17. № 13. P. 5980.
- 2 Chupawa P., Suksamran W., Jaisut D. et al. Combined heat and mass transfer associated with kinetics models for analyzing convective stepwise drying of carrot cubes // *Foods*. 2022. V. 11. № 24. P. 4045.
- 3 Chen C., Pan Z. An overview of progress, challenges, needs and trends in mathematical modeling approaches in food drying // *Drying Technology*. 2023. V. 41. № 16. P. 2586–2605.

- 4 Basso A.N.S., Erdem T., Öztekin S. Analysis of Drying Kinetics and Mathematical Modelling of Peanut Pods using Sunlight, Hot Air, and Microwaves Drying Processes // Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology. 2025. V. 13. № 2. P. 368–375.
- 5 Sorokova N., Didur V., Variny M. Mathematical modeling of heat and mass transfer during moisture–heat treatment of castor beans to improve the quality of vegetable oil // Agriculture. 2022. V. 12. № 9. P. 1356.
- 6 Delfiya D.A., Prashob K., Murali S. et al. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review // Journal of Food Process Engineering. 2022. V. 45. № 6. P. e13810. doi: 10.1111/jfpe.13810
- 7 Jimoh K.A., Hashim N., Shamsudin R. et al. Recent advances in the drying process of grains // Food Engineering Reviews. 2023. V. 15. № 3. P. 548–576.
- 8 Chen P., Chen N., Zhu W. et al. A heat and mass transfer model of peanut convective drying based on a two-component structure // Foods. 2023. V. 12. № 9. P. 1823.
- 9 Щегольков А.В. Математическое моделирование комбинированной ИК- и СВЧ-сушки растительного сырья в условиях вакуума // Наука в Центральной России. 2024. № 6 (72). С. 158–167. doi: 10.35887/2305-2538-2024-6-158-167
- 10 Ермолаев В.А. Разработка математической модели низкотемпературной вакуумной сушки сыров // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (166). С. 134–142.
- 11 Казарцев Д.А. Разработка общих видов математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ-энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 3 (89). С. 17–22.
- 12 Almeida R.D., Duarte M.E.M., Mata M.E.R.C. et al. Drying behavior and thermodynamic properties of cashew nut almonds in thin layers: A mathematical modeling approach // Heliyon. 2025. V. 11. № 1. P. e... (необходимо указать номер статьи или страницы).
- 13 Lončar B., Pezo L. Mathematical modeling approach and simulation in food drying applications // Foods. 2024. V. 13. № 3. P. 384. doi: 10.3390/foods13030384
- 14 An J., Yan J., Wei H. et al. Investigation of the kinetic dynamics in the intermittent microwave–hot-air combined drying of peanut pods // Agriculture. 2024. V. 14. № 12. P. 2259. doi: 10.3390/agriculture14122259
- 15 Zhang T., Wang Y., Chen P. et al. Research Progress on Post-Harvest Drying, Storage, and Processing of Peanuts: A Review // Food Reviews International. 2025. P. 1–27. doi: 10.1080/87559129.2025.2487898
- 16 Нилова Л.П., Малютенкова С.М. Анализ биохимического состава и антиоксидантных свойств орехов, реализуемых на потребительском рынке // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 2 (84). С. 124–130.
- 17 Ndukwu M.C., Ibeh M., Ekop I. et al. Analysis of the heat transfer coefficient, thermal effusivity and mathematical modelling of drying kinetics of a partitioned single pass low-cost solar drying of cocoyam chips with economic assessments // Energies. 2022. V. 15. № 12. P. 4457.
- 18 Lotfy E.R., Harun Z., Taip F.S. Conjugate heat and mass transfer modelling for food drying process optimization // International Journal of Food Engineering. 2025. V. 21. № 12. P. 803–819. doi: 10.1515/ijfe-2025-0137
- 19 Talele, P., Chaudhari, V. D., Talele, H. et al. Evolution of Drying Process Modeling: From Mathematical Foundations to Machine Learning-Driven Prediction and Control // Journal of Food Process Engineering. – 2025. – Т. 48. – №. 12. – С. e70300.
- 20 Tuly S.S., Mahiuddin M., Karim A. Mathematical modeling of nutritional, color, texture, and microbial activity changes in fruit and vegetables during drying: A critical review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. V. 63. № 13. P. 1877–1900. doi: 10.1080/10408398.2021.1969533

References

- 1 Mansour N.E., Villagran E., Rodriguez J. et al. Effect of Drying Conditions on Kinetics, Modeling, and Thermodynamic Behavior of Marjoram Leaves in an IoT-Controlled Vacuum Dryer. Sustainability. 2025. vol. 17. no. 13. article 5980.
- 2 Chupawa P., Suksamran W., Jaisut D. et al. Combined heat and mass transfer associated with kinetics models for analyzing convective stepwise drying of carrot cubes. Foods. 2022. vol. 11. no. 24. article 4045.
- 3 Chen C., Pan Z. An overview of progress, challenges, needs and trends in mathematical modeling approaches in food drying. Drying Technology. 2023. vol. 41. no. 16. pp. 2586–2605.
- 4 Basso A.N.S., Erdem T., Öztekin S. Analysis of Drying Kinetics and Mathematical Modelling of Peanut Pods using Sunlight, Hot Air, and Microwaves Drying Processes. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology. 2025. vol. 13. no. 2. pp. 368–375.
- 5 Sorokova N., Didur V., Variny M. Mathematical modeling of heat and mass transfer during moisture–heat treatment of castor beans to improve the quality of vegetable oil. Agriculture. 2022. vol. 12. no. 9. article 1356.
- 6 Delfiya D.A., Prashob K., Murali S. et al. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. Journal of Food Process Engineering. 2022. vol. 45. no. 6. article e13810. doi: 10.1111/jfpe.13810.
- 7 Jimoh K.A., Hashim N., Shamsudin R. et al. Recent advances in the drying process of grains. Food Engineering Reviews. 2023. vol. 15. no. 3. pp. 548–576.
- 8 Chen P., Chen N., Zhu W. et al. A heat and mass transfer model of peanut convective drying based on a two-component structure. Foods. 2023. vol. 12. no. 9. article 1823.
- 9 Shchegolkov A.V. Mathematical modeling of combined IR- and microwave-vacuum drying of plant raw materials. Science in Central Russia. 2024. no. 6 (72). pp. 158–167. doi: 10.35887/2305-2538-2024-6-158-167 (in Russian).
- 10 Ermolaev V.A. Development of a mathematical model of low-temperature vacuum drying of cheeses. Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2021. no. 1 (166). pp. 134–142. (in Russian).
- 11 Kazartsev D.A. Development of general types of mathematical models for drying food products with microwave energy input based on the laws of chemical kinetics of heterogeneous processes. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021. vol. 83. no. 3 (89). pp. 17–22. (in Russian).

- 12 Almeida R.D., Duarte M.E.M., Mata M.E.R.C. et al. Drying behavior and thermodynamic properties of cashew nut almonds in thin layers: A mathematical modeling approach. *Heliyon*. 2025. vol. 11. no. 1. article e... [Note: Please insert the specific article number or page range once available].
- 13 Lončar B., Pezo L. Mathematical modeling approach and simulation in food drying applications. *Foods*. 2024. vol. 13. no. 3. article 384. doi: 10.3390/foods13030384.
- 14 An J., Yan J., Wei H. et al. Investigation of the kinetic dynamics in the intermittent microwave–hot-air combined drying of peanut pods. *Agriculture*. 2024. vol. 14. no. 12. article 2259. doi: 10.3390/agriculture14122259.
- 15 Zhang T., Wang Y., Chen P. et al. Research Progress on Post-Harvest Drying, Storage, and Processing of Peanuts: A Review. *Food Reviews International*. 2025. pp. 1–27. doi: 10.1080/87559129.2025.2487898.
- 16 Nilova L.P., Malyutenkova S.M. Analysis of the biochemical composition and antioxidant properties of nuts sold on the consumer market. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020. vol. 82. no. 2 (84). pp. 124–130. (in Russian).
- 17 Ndukwa M.C., Ibeh M., Ekop I. et al. Analysis of the heat transfer coefficient, thermal effusivity and mathematical modelling of drying kinetics of a partitioned single pass low-cost solar drying of cocoyam chips with economic assessments. *Energies*. 2022. vol. 15. no. 12. article 4457.
- 18 Lotfy E.R., Harun Z., Taip F.S. Conjugate heat and mass transfer modelling for food drying process optimization. *International Journal of Food Engineering*. 2025. vol. 21. no. 12. pp. 803–819. doi: 10.1515/ijfe-2025-0137.
- 19 Talele P., Chaudhari V.D., Talele H. et al. Evolution of Drying Process Modeling: From Mathematical Foundations to Machine Learning-Driven Prediction and Control. *Journal of Food Process Engineering*. 2025. vol. 48. no. 12. article e70300.
- 20 Tuly S.S., Mahiuddin M., Karim A. Mathematical modeling of nutritional, color, texture, and microbial activity changes in fruit and vegetables during drying: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. vol. 63. no. 13. pp. 1877–1900. doi: 10.1080/10408398.2021.1969533.

Сведения об авторах

Сергей А. Никель к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sergei.nickel@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9043-9452>

Сергей В. Лавров к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ya-serglavrov@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7031-7738>

Александр С. Белозерцев к.т.н., доцент, кафедра физики, теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, alex_bel77@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7391-0254>

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

Sergey A. Nickel Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sergei.nickel@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9043-9452>

Sergey V. Lavrov Cand. Sci. (Engin.), physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ya-serglavrov@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7031-7738>

Alexandr S. Belozertsev Cand. Sci. (Engin.), physics, heat engineering and heat power engineering department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, alex_bel77@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7391-0254>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/10/2025	После редакции 28/10/2025	Принята в печать 10/11/2025
Received 11/10/2025	Accepted in revised 28/10/2025	Accepted 10/11/2025

Получение гидролизатов соевого белка с высокой антиоксидантной активностью

Артем Э. Григорян	¹	grigoryan@mgupp.ru	 0000-0001-8750-8453
Виктория В. Фоменко	¹	Victoria-96@bk.ru	 0000-0001-8677-0927
Илья А. Детинкин	¹	detinkin02@gmail.com	 0009-0004-0985-9505
Ирина У. Кусова	¹	kusovaiu@mgupp.ru	 0000-0001-8022-7229
Наталья Г. Машенцева	¹	natali-mng@yandex.ru	 0000-0002-9287-0585

¹ Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) Волоколамское шоссе, 11, Москва 125080, Россия

Аннотация. На сегодняшний день наблюдается рост интереса к натуральным антиоксидантам, среди которых особое внимание уделяется гидролизатам белков с повышенной антиоксидантной активностью. В настоящем исследовании изучен ферментативный протеолиз изолята соевого белка с целью получения гидролизатов с высокой антиоксидантной активностью. Для протеолиза использовали протеолитические ферментные препараты (ФП) микробного (Alcalase, Neutrase, Flavourzyme, Протозим) и растительного (папаин, бромелайн) происхождения. В полученных гидролизатах была определена общая антиоксидантная емкость (ОАЕ), которая оценивалась тремя методами: FRAP, DPPH и ORAC (результаты выражались в мкмоль-экв. кверцетина/л). Гидролиз проводили при гидромодуле 1:15, дозировках ферментов 0,5–2,0 % от массы субстрата, с поддержанием pH и температуры в течение 4 часов. Установлено, что микробные протеазы обеспечивали более высокую степень гидролиза (СГ) по сравнению с растительными: максимальная СГ достигала 14,95 % для Alcalase, 13,89 % для Flavourzyme, 11,00 для Neutrase и 9,23 для Протозима при дозировке 2 %, в то время как для папаина и бромелайна – 5,06 % и 5,30 % соответственно. Анализ SDS-PAGE подтвердил более глубокое расщепление белка под действием микробных ферментов. По данным анализа ORAC, наивысшую антиоксидантную емкость продемонстрировал гидролизат, полученный с применением ФП Alcalase – 9487,27 мкмоль-экв. кверцетина/л, а по методу FRAP – гидролизаты Alcalase, Neutrase и Протозима (свыше 110 мкмоль-экв./л). Наибольшая ОАЕ по методу DPPH отмечена у гидролизата Neutrase (37,49 мкмоль-экв./л). Показано, что процесс гидролиза значительно повышает антиоксидантные свойства по сравнению с нативным изолятом. Установлено, что ферменты Alcalase, Neutrase, Flavourzyme и отечественный препарат Протозим перспективны для получения гидролизатов соевого белка с выраженной антиоксидантной активностью. Полученные данные могут быть использованы при разработке функциональных ингредиентов для пищевой промышленности.

Ключевые слова: ферментативный гидролиз, протеазы, антиоксиданты, гидролизаты растительных белков.

Production of soy protein hydrolysates with high antioxidant activity

Artem E. Grigoryan	¹	grigoryan@mgupp.ru	 0000-0001-8750-8453
Victoria V. Fomenko	¹	Victoria-96@bk.ru	 0000-0001-8677-0927
Ilya A. Detinkin	¹	detinkin02@gmail.com	 0009-0004-0985-9505
Irina U. Kusova	¹	kusovaiu@mgupp.ru	 0000-0001-8022-7229
Natalia G. Mashentseva	¹	natali-mng@yandex.ru	 0000-0002-9287-0585

¹ Russian Biotechnological University (ROSBIOTEX) 11, Volokolamsk highway, Moscow, 125080, Russia

Abstract. Today, there is a growing interest in natural antioxidants, among which special attention is paid to protein hydrolysates with increased antioxidant activity. In this study, the enzymatic proteolysis of soy protein isolate was studied in order to obtain hydrolysates with high antioxidant activity. Proteolytic enzyme preparations of microbial (Alcalase, Neutrase, Flavourzyme, Protozyme) and plant (papain, bromelain) origin were used for proteolysis. The total antioxidant capacity (OAE) was determined in the obtained hydrolysates, which was evaluated by three methods: FRAP, DPPH and ORAC (the results were expressed in mmol-eq. quercetin /l). Hydrolysis was performed with a 1:15 hydromodule, enzyme dosages of 0.5–2.0% by weight of the substrate, with pH and temperature maintained for 4 hours. It was found that microbial proteases provided a higher degree of hydrolysis (DH) compared to plant proteases: the maximum reached 14.95% for Alcalase, 13.89% for Flavourzyme, 11.00 for Neutral and 9.23 for Protozymes at a dosage of 2%, while for papain and bromelain – 5.06% and 5.30%, respectively. The SDS-PAGE analysis confirmed deeper protein cleavage under the action of microbial enzymes. According to the ORAC analysis, the hydrolysate obtained using Alcalase – 9487.27 mmol-eq demonstrated the highest antioxidant capacity. quercetin /l, and according to the FRAP method, hydrolysates of Alcalase, Neutrase and Protozyme (over 110 mmol-eq./l). The highest OAE by the DPPH method was observed in the Neutrase hydrolysate (37.49 mmol-eq/l). It has been shown that the hydrolysis process significantly increases the antioxidant properties compared to the native isolate. It has been established that the enzymes Alcalase, Neutrase, Flavourzyme and the domestic drug Protozyme are promising for the production of soy protein hydrolysates with pronounced antioxidant activity. The data obtained can be used in the development of functional ingredients for the food industry.

Keywords: enzymatic hydrolysis, proteases, antioxidants, hydrolysates of vegetable proteins.

Для цитирования

Григорян А.Э., Фоменко И.А., Детинкин И.А., Кусова И.У., Машенцева Н.Г. Получение гидролизатов соевого белка с высокой антиоксидантной активностью // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 181–192. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-181-192

For citation

Grigoryan A.E., Fomenko I.A., Detinkin I.A., Kusova I.U., Meshentseva N.G. Production of soy protein hydrolysates with high antioxidant activity. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 181–192. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-181-192

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

Введение

Белки являются одними из основных компонентов различных продуктов питания: мяса, рыбы, молока, яиц, растений. Эти вещества вносят большой вклад в их питательную ценность, а также в функциональные и биологические свойства [1]. Многие свойства белков обусловлены наличием в их цепи различных биоактивных пептидов [2]. Эти специфические белковые фрагменты присутствуют в неактивной форме в исходном белке и могут высвобождаться в процессах его расщепления при получении белковых гидролизатов. Белковые гидролизаты – это сложные смеси пептидов и свободных аминокислот, которые образуются при гидролизе белка – расщеплении пептидных связей под действием ферментативных или химических процессов [3, 4].

Выделяют два основных способа гидролиза белков – химический (кислотный/щелочной гидролиз) и биологические методы (обработка протеолитическими ферментами и ферментация микроорганизмами) [1, 3–5]. Процессы химического гидролиза сложно контролировать, они сопряжены с образованием нежелательных продуктов и менее экологичны. Поэтому наиболее перспективными являются биологические методы, в особенности обработка протеазами [3–6]. Протеазы (протеолитические ферменты) – это обширная группа ферментов, которые воздействуют на пептидные связи, соединяющие аминокислотные остатки в молекуле белка, и расщепляют их, что приводит к образованию более коротких пептидов и аминокислот [7, 8]. Эти ферменты широко распространены в природе и встречаются у всех живых организмов [4, 7, 8]. Протеазы обладают высокой каталитической активностью и субстратной специфичностью, а разнообразие их структур и функций вызывает интерес исследователей с точки зрения поисков новых способов применения [4, 6, 8]. Кроме того, рынок промышленных протеолитических ферментных препаратов ежегодно растет в связи с широким спектром областей их применения: фармацевтическая, текстильная, пищевая промышленности, производство моющих средств, переработка сельскохозяйственных отходов и т. д. [7, 8]. Получение гидролизатов пищевых белков – одно из самых перспективных направлений изучения способов применения протеолитических ферментов.

На сегодняшний день активно изучается получение гидролизатов из мясных продуктов, молочных продуктов, рыбы, микроводорослей и растительных белков [4, 6, 9–12]. Кроме пищевой промышленности белковые гидролизаты могут найти свое применение в косметологии и в качестве биостимуляторов в растениеводстве [13, 14].

В рамках изучения способов получения и свойств белковых гидролизатов отдельного внимания заслуживает соевый белок [2, 3, 6].

Соя является одной из наиболее значимых масличных культур в мире, а соевый белок – самым популярным растительным белком с наиболее высоким уровнем промышленного производства за счет своего высокого содержания в соевых бобах и сбалансированного аминокислотного состава [15–17]. На сегодняшний день активно ведется изучение и развивается применение гидролизатов белка сои в производстве продуктов питания – они являются наиболее распространенным типом гидролизатов в различных категориях пищевых продуктов [6]. Гидролизаты белка сои обладают хорошими функционально-техническими свойствами и проявляют биологическую активность [2, 3]. Одним из самых важных свойств гидролизатов белков является их антиоксидантная активность.

Избыточное накопление активных форм кислорода (АФК), свободных радикалов и прооксидантных металлов в организме может приводить к повреждению клеток, перекисному окислению и денатурации белков или нуклеиновых кислот [18]. В связи с этим высокое внимание привлекают различные соединения с антиоксидантной активностью, т. е. способностью предотвращать процессы окисления, связанные с АФК [19]. Натуральные антиоксиданты предпочтительнее с точки зрения безопасности, чем синтетические [5, 18]. В связи с этим наблюдается рост интереса к изучению антиоксидантных свойств гидролизатов белков. Известны пептиды с антиоксидантной активностью, обнаруженные в гидролизатах белка конопли [20], рапса [21], нута [22] и т. д. Известен ряд исследований, в которых были подтверждены антиоксидантные свойства различных ферментативных гидролизатов и соевого белка [23–25]. Эта тема привлекает внимание исследователей из России, однако в отечественной научной литературе не так много работ, посвященных ферментативной биоконверсии соевого белка [26–28]. В связи с этим целью настоящего исследования является изучение протеолиза изолята соевого белка ферментными препаратами протеолитического действия микробного и растительного происхождения для получения белковых гидролизатов с высокой антиоксидантной активностью.

Материалы и методы

В работе использовался изолят соевого белка, произведенный Linyi Shansong Biological Products Co., Ltd (Китай). Также в ходе экспериментов применялись ферментные препараты (ФП) Alcalase® 2.4 LFG, Neutrase® 0.8 L и Flavourzyme® 1000L, произведенные «Novozymes» (Дания); папаин и бромелаин производства «Sigma-Aldrich» (США); «Протозим» производства Биопрепарат (Россия).

Содержание абсолютно сухого вещества (АСВ) в белковом изоляте определяли по ГОСТ 31640–2012, сырой протеин (N • 5,71) по ГОСТ 30648.2–99.

Для проведения ферментативного гидролиза навеску изолята соевого белка, взятую по АСВ, суспендировали в дистиллированной

воде в соответствии с гидромодулем 1:15. Далее в суспензию вносили ФП с дозировкой 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0% от массы субстрата. Гидролиз вели при постоянном перемешивании при выбранных для каждого фермента pH и температуре, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Условия ферментативного гидролиза

Table 1.

Conditions of enzymatic hydrolysis

Ферментный препарат Enzyme preparation	Алкалаза 2.4 LFG Alcalase® 2.4 LFG	Нейтраза 0.8L Neutrase® 0,8 L	Флавозим 1000L Flavourzyme® 1000L	Папаин Papain	Бромелаин Bromelain	Протозим Protozyme
pH	8,0	7,0	7,0	7,0	7,0	8,0
Температура, °C Temperature, °C	50	50	50	50	55	60

Параметры температуры и pH, при которых вели гидролиз, выбирали исходя из данных научной литературы о применении исследуемых ФП. Условия гидролиза с применением ФП Alcalase и Flavourzyme были взяты из работы Dent T. и соавт. [29]; для Neutrase из исследования da Silva Crozatti T. и соавт. [30]; для бромелаина из работы Gao Y. и соавт. [31]; для папаина из данных Nath A. и соавт. [32]. Условия гидролиза для ферментного препарата «Протозим» были подобраны в соответствии с рекомендациями производителя.

Степень гидролиза (СГ) определяли как отношение концентрации выделившегося аминокислотного азота в реакционной смеси, измеренной по методу Серенсена (ОФС.1.2.3.0022.15) к концентрации общего азота в реакционной смеси, измеренной по методу Кьельдаля.

Для оценки пептидного профиля гидролизатов был проведен SDS-PAGE по методу Лэммли [33]. Концентрация разрешающего геля – 10%, концентрирующего – 5%. Для проведения SDS-PAGE использовали камеру для вертикального электрофореза Bio-Rad Mini-PROTEAN® Tetra (США). Также использовали маркер молекулярной массы белков 10-200 кДа производства Servicebio (Китай).

Для оценки общей антиоксидантной емкости (ОАЕ) использовали методы FRAP, DPPH и ORAC. Для приготовления реактива FRAP смешивали 0,3 М ацетатный буфер (pH 3,6), 10 мМ раствор фотометрического реагента – TPTZ (2, 4, 6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine) (Acros Organics, Китай), растворяя его в 40 мМ соляной кислоте, и 20 мМ водный раствор хлорида железа (III) (PanReas AppliChem, Испания) в соотношениях 10:1:1, соответственно. Для измерения ОАЕ образцов в пробирку вносили 1,45 мл свежеприготовленного реактива FRAP и 50 мкл образца или дистиллированной воды для измерения контрольной пробы. Реакционную смесь инкубировали в течение 30 мин при 37 °C в темноте. После инкубации пробы центрифугировали при

3600 об/мин в течение 4 мин для осаждения образовавшегося осадка. Затем регистрировали оптическую плотность при длине волны 594 нм. ОАЕ образцов считали по градуировочному графику для построения которого использовали кверцетин (Sigma-Aldrich, Индия) в диапазоне концентраций 140–300 мкМ, и выражали в мкмоль-экв. кверцетина/л образца.

Для определения ОАЕ методом DPPH к 1,45 мл 100 мкМ этанольному раствору DPPH (ChemCruz, Santa Cruz Biotechnology, США) добавляли 50 мкл образца или этанола в качестве контрольной пробы. Реакционную смесь инкубировали в темноте в течение 30 мин при температуре 22 °C. После инкубации пробы центрифугировали при 3600 об/мин в течение 4 мин для осаждения образовавшегося осадка. Затем регистрировали оптическую плотность при длине волны 517 нм, используя в качестве контрольной пробы 96% этанол. ОАЕ образцов считали по градуировочному графику, для построения которого использовали кверцетин (Sigma-Aldrich, Индия) в диапазоне концентраций 100–250 мкМ, и выражали в мкмоль-экв. кверцетина/л образца.

Для метода ORAC использовали флуориметр-люминометр Fluoroskan Ascent FL (Termo Labsystems, Финляндия) и 96-луночные планшеты (Greiner bio-one, Германия). В каждую лунку планшета вносили 30 мкл образца, разведенного фосфатным буфером в зависимости от активности, в качестве контрольной пробы использовали 75 мМ фосфатный буфер (pH 7,4). Затем в каждую лунку добавляли 200 мкл 0,5 мкМ свежеприготовленного флуоресцеина натрия (Sigma-aldrich, США). Планшет закрывали защитной пленкой (SSlbio, США) инкубировали в течение 30 мин при 37 °C. После инкубации к реакционной смеси добавляли 30 мкл 153 мкМ AAPH (Aldrich Chemistry, США). Измерения интенсивности флуоресценции проводили при 37 °C в течение 60 мин с интервалом считывания 5 мин, с использованием длин волн возбуждения и эмиссии 485 нм и 535 нм, соответственно.

Для построения градуировочного графика использовали раствор кверцетина (Sigma-aldrich, Индия) в диапазоне концентраций 1-14 мкМ. ОАЕ образцов считали по градуировочному графику, который строили для каждого планшета, и выражали в мкмоль-экв. кверцетина/л образца.

Результаты и обсуждение

В ходе работы был проведен протеолиз исследуемого изолята белка шестью различными ферментными препаратами. На рисунке 1 представлены графики зависимости степени гидролиза (СГ) от времени ферментативной реакции. Выбор ФП и условия проведения гидролиза существенно влияют на пептидный

профиль, функциональные свойства и биологическую активность гидролизатов [4, 6]. Степень гидролиза и характеристики гидролизатов существенно зависят от температуры, времени, pH, концентрации субстрата и активности ФП [34]. Важно отметить, что протеазы могут обладать специфичностью относительно последовательности аминокислот, что делает важным исследование действия конкретных ФП на исследуемый субстрат [35]. Понимание взаимодействия между различными типами ферментов и их субстратами необходимо для оптимизации процессов гидролиза с учётом конкретных областей применения в промышленности [6].

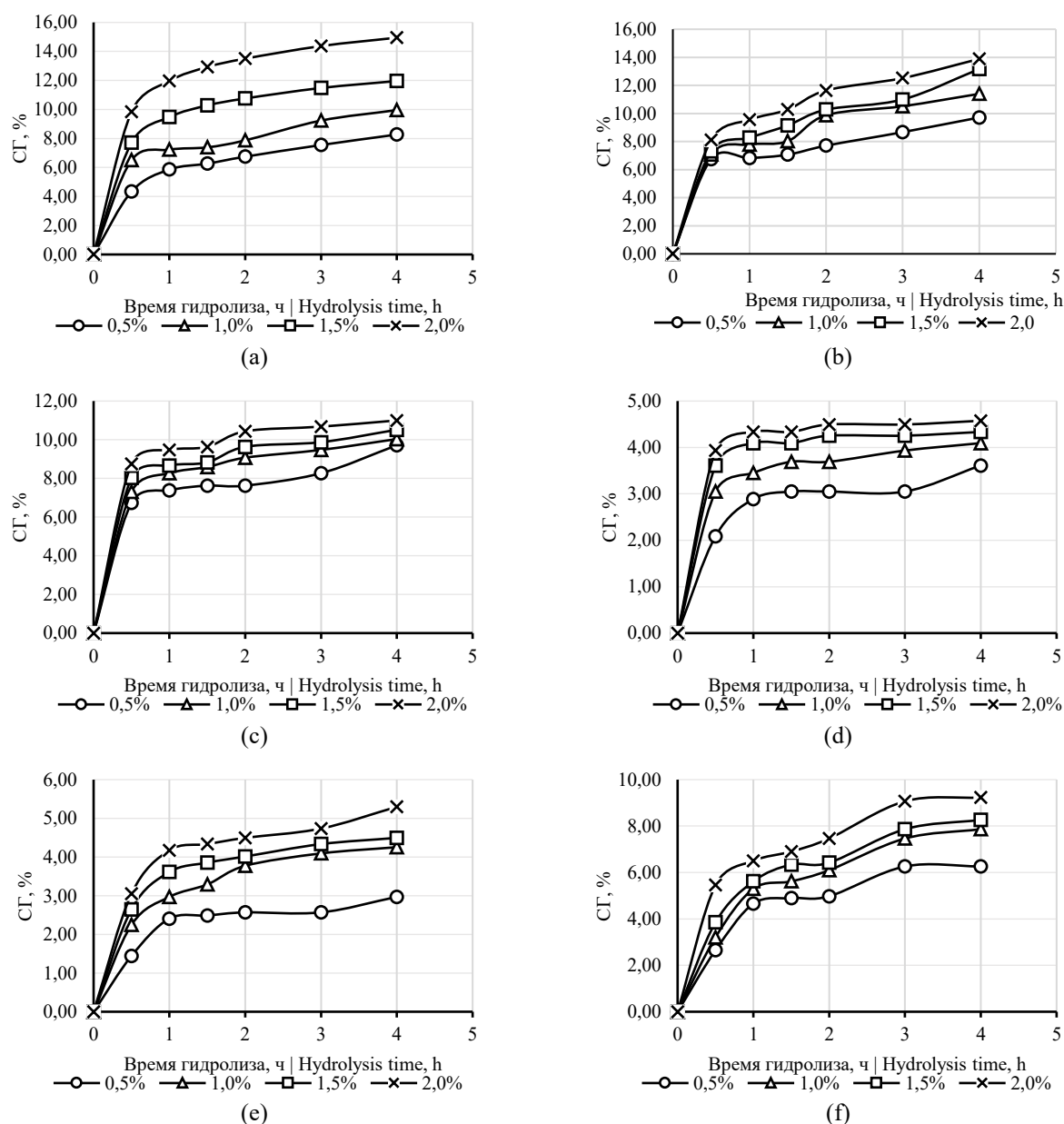


Рисунок 1. Графики зависимости степени гидролиза от времени ферментативной реакции с использованием протеолитических ферментных препаратов ((a) – Alcalase 2.4L FG, (b) – Flavourzyme 1000L, (c) – Neutrase 0.8 L, (d) – Папаин, (e) – Бромелаин, (f) – Протозим)

Figure 1. Graphs of the dependence of the degree of hydrolysis on the time of the enzymatic reaction using proteolytic enzyme preparations ((a) – Alcalase 2.4L FG, (b) – Flavourzyme 1000L, (c) – Neutral 0.8L, (d) – Papain, (e) – Bromelain, (f) – Protozyme)

Микробные протеазы в исследуемых дозировках продемонстрировали более высокую степень гидролиза, чем растительные. Максимальная СГ для микробных ФП составила: 14,95% для Alcalase, 13,89% для Flavourzyme, 11,00% для Neutrase, 9,23% для ФП «Протозим». У растительных протеаз максимальная СГ составила 5,30% для бромелаина и 5,06% для папаина. Для всех 6 ФП скорость ферментативной реакции была максимальной в первые 30 минут протеолиза.

Tsou M.J. и соавт. сообщили, что при гидролизе изолята соевого белка ФП Neutrase в течение 4 часов при дозировке фермента 1% была получена СГ ~15%, что немногим выше, чем в настоящем исследовании (10,03% при той же концентрации фермента в течение 4 часов) [36]. В другом исследовании гидролиз изолята соевого белка ФП Neutrase (дозировка 1% по массе субстрата, 4 часа) была получена СГ 1,29% [30]. Полученные отличия, вероятно, связаны с разными применяемыми изолятами белка. Gao Y. и соавт. продемонстрировали СГ бромелаином ~14% для изолята соевого белка (дозировка – 2% от массы субстрата, 4 часа) [31]. Эти данные расходятся с настоящим экспериментом (СГ – 5,30% при той же дозировке ФП и времени), что опять же, вероятно, связано с особенностями объекта исследования. Это подтверждает важность изучения действия ФП на конкретный субстрат.

Сообщается, что при помощи гидролиза изолята белка сои с применением ФП Flavourzyme дозировкой 1% по массе субстрата в течение 4 часов была получена СГ ~12%, что хорошо согласуется с нашим исследованием (СГ – 11,40% при той же дозировке ФП и времени) [37]. Dent T. и соавт. получили СГ изолята белка сои ~10% после 3 часов гидролиза ФП Flavourzyme дозировкой 1% по массе субстрата и СГ ~8% после 3 часов гидролиза ФП Alcalase с той же дозировкой. Эти данные хорошо согласуются с нашими (СГ – 10,51% для Flavourzyme и 9,23% для Alcalase при тех же дозировках ФП и времени) [29]. Интересно отметить, что при дозировке фермента 1% более высокая СГ наблюдалась у ФП Flavourzyme, тогда как при дозировке 2%, лучшая деструкция белков была у ФП Alcalase. Известна работа, в которой подбирались оптимальные pH, температура и дозировка фермента при гидролизе изолята белка сои для ФП Alcalase. При дозировке 1,5% в течение часа была получена СГ 15,56%, тогда

как в нашей работе было достигнуто 9,47% в тех же условиях [38]. В другом исследовании, в котором изучалось действие ФП Alcalase на изолят соевого белка при дозировке 2,5% были получены значения СГ ~12–17,79% при времени протеолиза 1–4,5 часа. И, хотя в нашей работе подобная дозировка данного ФП не изучалась, можно сделать предположение о том, что эти данные хорошо согласуются с нашим исследованием – СГ составила 11,96–14,95% при времени гидролиза 1–4 ч с дозировкой ФП 2% [23].

Yin C. и соавт. сообщали о СГ ~2% при гидролизе папаином при дозировке ФП 0,5% в течение получаса, что хорошо соответствует данным, полученным в настоящем исследовании в аналогичных условиях – 2,09% [39]. Насколько нам известно, ранее не сообщалось о кинетике протеолиза изолята соевого белка ФП «Протозим». По полученным данным можно сделать вывод, что данный ФП протеолитического действия довольно эффективен для получения гидролизатов соевого белка с СГ 5–10%.

После сравнения полученных нами данных с информацией из научной литературы можно обратить внимание, что существует существенные различия в результатах исследований между различными авторскими коллективами. Кроме уже упомянутой субстратной специфичности протеолитических ферментов, вклад в эту разницу может внести и особенность методологии вычисления СГ. На сегодняшний день не существует стандартного метода определения этого показателя гидролиза, и различные методы, которые обычно используются, могут давать разные результаты. Кроме того, некоторые анализы могут быть более подходящими для определённых субстратов или типов протеаз [35]. Данные, полученные в настоящем исследовании, отражают кинетику гидролиза изолята белка сои исследуемыми ФП при различных дозировках. Эта информация может быть полезна для выбора рациональных параметров времени и количества ферментного препарата для получения гидролизатов белка сои с конкретной СГ.

На рисунке 2 представлен SDS-PAGE полученных гидролизатов. Анализ проводили для гидролизатов, полученных после 4-х часов гидролиза с дозировкой фермента 2% от массы субстрата.



Рисунок 2. SDS-PAGE нативного изолята белка сои и его гидролизатов. 1 – Изолят белка сои, 2 – Alcalase, 3 – Flavourzyme, 4 – Neutrase, 5 – Папаин, 6 – Бромелаин, 7 – Протозим

Figure 2. SDS-PAGE of native soy protein isolate and its hydrolysates. 1 – Soy Protein Isolate, 2 – Alcalase, 3 – Flavourzyme, 4 – Neutrase, 5 – Papain, 6 – Bromelain, 7 – Protosim

Как видно из рисунка 2, в полученных гидролизатах не осталось полипептидов массой более 30 кДа. Для нативного соевого белка полосы в диапазоне молекулярной массы от 80 до 45 кДа представляют собой субъединицы β -конглицинина, а полосы в диапазоне от 45 до 20 кДа представляют собой различные кислотные и основные субъединицы глицина [29]. В гидролизате, полученном под действием ФП Alcalase практически отсутствуют полосы, что говорит о высокой степени деструкции белка. О подобном сообщали Fathi P. и соавт., также наблюдавшие отсутствие белковых полос в гидролизате белка из рисовых отрубей, полученных под действием ФП Alcalase [40]. Для ФП Flavourzyme также не было выявлено четких полос, за исключением полосы ~20 кДа, что также свидетельствует о высокой степени гидролиза белка. Для ФП Neutrase видны полосы 30, 23 и 20 кДа, что говорит о наличии большого количества полипептидов данной молекулярной массы и не такой высокой СГ, как у Alcalase и Flavourzyme. Для ФП растительного происхождения видны жирные полосы в диапазоне 18–23 кДа. Насыщенность полос в этом диапазоне масс для выбранных ФП свидетельствует об относительно низкой СГ по сравнению с другими исследуемыми протеазами. Для ФП «Протозим» видна полоса около 15 кДа и практически отсутствуют полосы с молекулярной массой выше 20 кДа. В целом результаты анализа SDS-PAGE демонстрируют,

что микробные ферменты в исследуемых условиях позволили достичь более глубокого расщепления белка, чем растительные.

В ходе работы в образцах гидролизатов была определена общая антиоксидантная емкость (ОАЕ) методами FRAP, DPPH и ORAC.

Для анализа были взяты образцы фугатов гидролизатов соевого белка, полученные под действием ФП Alcalase (Alc), Neutrase (Neu), Flavourzyme (Fl), Протозим (Pr), папаин (Pa) и бромелаин (Br), а также фугат суспензии нативного соевого изолята. Для всех изучаемых ферментных препаратов была выбрана дозировка 2%, а гидролиз проводили в течение 4 часов.

На рисунке 3 представлены результаты определения антиоксидантного потенциала полученных гидролизатов.

В результате анализа FRAP было обнаружено, что все гидролизаты обладали большей антиоксидантной активностью, чем суспензия нативного изолята соевого белка. При этом для образцов, полученных под действием растительных протеаз наблюдались меньшие значения ОАЕ, чем для образцов, полученных под действием микробных ферментов. Максимальные результаты наблюдались у гидролизатов, полученных под действием ФП Alcalase, Neutrase и Протозим – 113,87, 112,81 и 111,18 мкмоль-экв. кверцетина/л соответственно. Для анализа ORAC были обнаружены схожие результаты: увеличение ОАЕ гидролизатов

относительно нативного изолята, низкие значения ОАЕ для гидролизатов растительных протеаз и наиболее высокие результаты у образцов, полученных под действием ФП Alcalase, Neutrase и Протозим. При этом ОАЕ у гидролизата Alcalase была существенно выше, чем у других образцов – 9487,27 мкмоль-экв. кверцетина/л.

Анализ DPPH показал, что гидролизаты, полученные под действием ФП Neutrase и Flavourzyme, обладают самой высокой ОАЕ – 37,49 и 22,12 мкмоль-экв. кверцетина/л соответственно. Гидролизаты растительных протеаз и суспензия нативного изолята соевого белка не проявили свойств по поглощению радикалов DPPH.

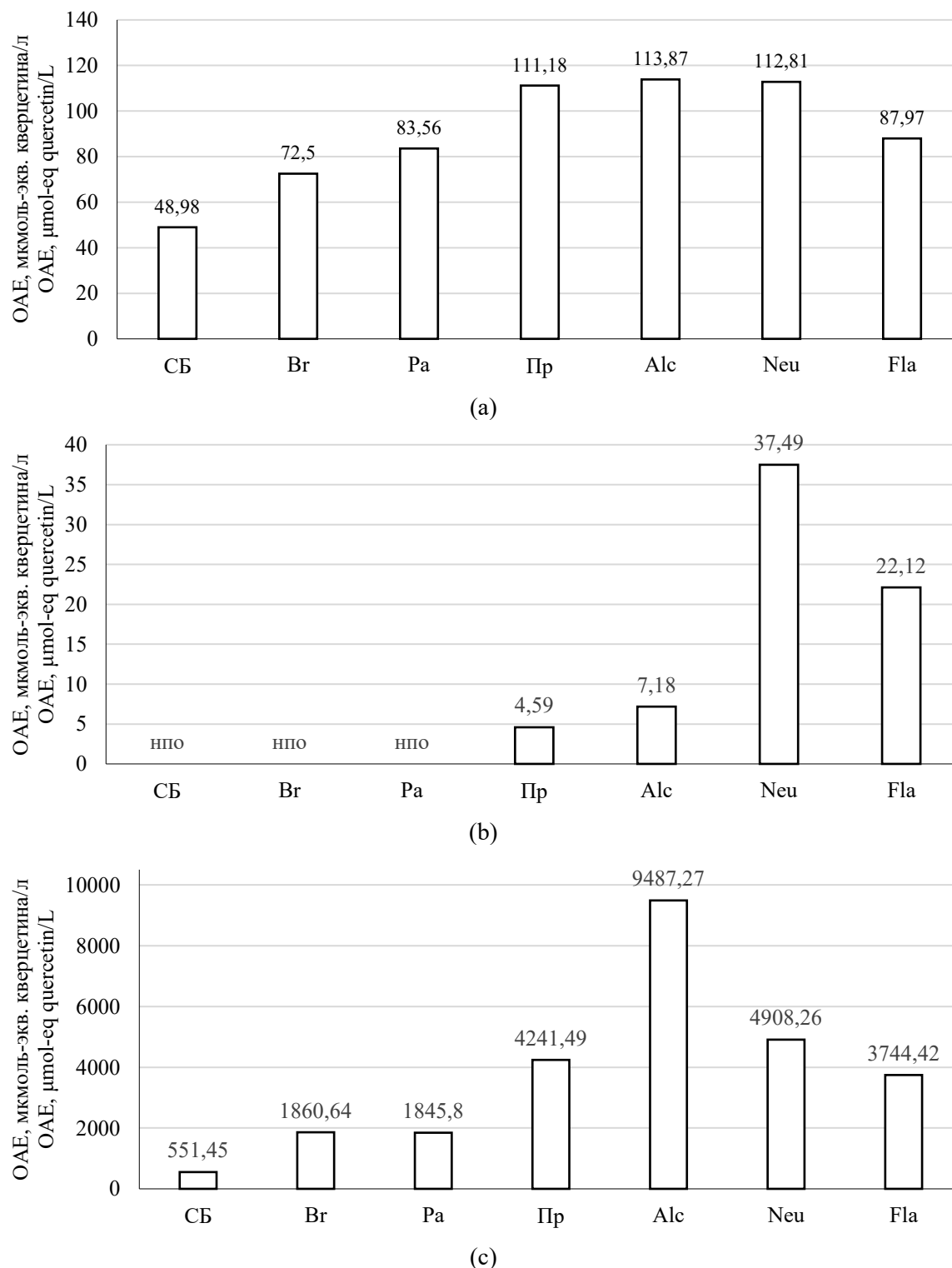


Рисунок 3. Общая антиоксидантная емкость, измеренная методами: (а) – FRAP; (б) – DPPH; (с) – ORAC
Figure 3. Total antioxidant capacity measured by the following methods: (a) – FRAP; (b) – DPPH; (c) – ORAC

В целом результаты анализов по определению ОАЕ демонстрируют, что более высокая СГ микробных протеаз соответствует лучшим антиоксидантным свойствам, хотя и заметна ограниченная корреляция между СГ и ОАЕ. Используемые методы анализа оценивают разные механизмы антиоксидантного эффекта: FRAP – восстановительную способность, DPPH – способность поглощать свободные радикалы, ORAC – способность ингибировать окисление, вызванное пероксильными радикалами [41]. Таким образом, полученные гидролизаты изолята соевого белка могут эффективно поглощать гидроксильные радикалы, при этом обладают умеренной восстановительной способностью и малоэффективны в отношении поглощения свободных радикалов DPPH. Высокая ОАЕ, измеренная методом ORAC у гидролизата Alcalase может свидетельствовать о наличии большого количества пептидов, богатых гидрофобными аминокислотами [42]. Наличие активности FRAP свидетельствует о наличии пептидов и свободных аминокислот, способных отдавать электроны свободным радикалам и прерывать цепную реакцию окисления [43]. Известно исследование, в котором были изучены антиоксидантные свойства гидролизатов изолята белка нута, в котором гидролизаты, полученные под действием папаина и бромелаина продемонстрировали большую антиоксидантную емкость (методы FRAP и ORAC), чем гидролизаты, полученные при протеолитическом действии ФП Alcalase [22]. В настоящем исследовании наблюдалась противоположная тенденция, что еще раз свидетельствует о важности изучения действия различных протеолитических ФП на конкретный субстрат.

Важной задачей дальнейших исследований может стать идентификация пептидов, вносящих наибольший вклад в антиоксидантную активность исследуемых гидролизатов с целью объяснения механизмов их антиоксидантных свойств. Также сообщалось, что фракционирование гидролизатов растительных белков может способствовать выделению фракций с лучшими антиоксидантными свойствами [44].

Заключение

В ходе работы был изучен протеолиз изолята соевого белка 6-ю различными протеолитическими ферментными препаратами микробного

и растительного происхождения – Alcalase, Neutrase, Flavourzyme, папаин, бромелаин и Протозим. При дозировке ФП 2% от массы субстрата в течение 4-х часов гидролиза СГ для микробных ФП составила: 14,95% (Alcalase), 13,89% (Flavourzyme), 11,00% (Neutrase), 9,23% (Протозим); для растительных ФП – 5,30% (бромелаин) и 5,06% (папаин). Полученные суспензии гидролизатов были подвергнуты центрифугированию и в фугатах была определена общая антиоксидантная емкость методами FRAP, DPPH и ORAC. Было обнаружено, что процесс гидролиза привел к повышению антиоксидантных свойств в сравнении с суспензией нативного изолята белка.

Наилучшими антиоксидантными свойствами, измеренными методами FRAP и ORAC обладал гидролизат, полученный под действием ФП Alcalase – 113,87 и 9487,27 мкмоль-экв. кверцетина/л соответственно. Для метода DPPH было обнаружено, что самая высокая ОАЕ была у гидролизата, полученного под действием ФП Neutrase – 37,49 мкмоль-экв. кверцетина/л. Было установлено, что гидролизаты изолята соевого белка, полученные под действием ФП Alcalase обладают высокой способностью поглощать пероксильные радикалы и умеренной восстановительной способностью. Гидролизаты, полученные под действием ФП Neutrase, Flavourzyme и Протозим также обладают высокой ОАЕ, измеренной методом ORAC (около 4000–5000 мкмоль-экв. кверцетина/л) и сравнимой с гидролизатами Alcalase ОАЕ, измеренной методом FRAP. Таким образом ФП Alcalase, Flavourzyme, Neutrase и Протозим перспективны для получения гидролизатов изолята соевого белка с высокой антиоксидантной активностью, однако требуются дальнейшие исследования механизма антиоксидантной активности и определение аминокислотных последовательностей биологически активных пептидов. Важно отметить, что о действии отечественного ФП Протозим на изолят соевого белка ранее не сообщалось. В ходе настоящей работы было установлено, что его применение позволяет эффективно получать гидролизаты соевого белка со степенью гидролиза около 10% с высокой антиоксидантной емкостью.

Литература

- 1 Nasri R., Abdelhedi O., Nasri M., Jridi M. Fermented protein hydrolysates: biological activities and applications // *Current Opinion in Food Science*. 2022. V. 43. P. 120–127. doi: 10.1016/j.cofs.2021.11.006
- 2 Coscueta E.R., Campos D.A., Osório H., Nerli B.B., Pintado M. Enzymatic soy protein hydrolysis: A tool for biofunctional food ingredient production // *Food Chemistry: X*. 2019. V. 1. P. 100006. doi: 10.1016/j.fochx.2019.100006
- 3 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. doi: 10.1111/ijfs.14380
- 4 Tavano O.L. Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology // *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. 2013. V. 90. P. 1–11. doi: 10.1016/j.molcatb.2013.01.011

- 5 Czelej M., Garbacz K., Czemiecki T., Wawrzykowski J., Waśko A. Protein hydrolysates derived from animals and plants – a review of production methods and antioxidant activity // *Foods*. 2022. V. 11. № 13. P. 1953. doi: 10.3390/foods11131953
- 6 Gasparre N., Rosell C.M., Boukid F. Enzymatic hydrolysis of plant proteins: tailoring characteristics, enhancing functionality, and expanding applications in the food industry // *Food and Bioprocess Technology*. 2025. V. 18. № 4. P. 3272–3287. doi: 10.1007/s11947-024-03648-x
- 7 Solanki P., Putatunda C., Kumar A., Bhatia R., Walia A. Microbial proteases: ubiquitous enzymes with innumerable uses // *3 Biotech*. 2021. V. 11. № 10. P. 428. doi: 10.1007/s13205-021-02928-z
- 8 Razzaq A., Shamsi S., Ali A., Ali Q., Sajjad M., Malik A. et al. Microbial proteases applications // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. V. 7. P. 110. doi: 10.3389/fbioe.2019.00110
- 9 Dos Santos Aguilar J.G., de Souza A.K.S., de Castro R.J.S. Enzymatic hydrolysis of chicken viscera to obtain added-value protein hydrolysates with antioxidant and antihypertensive properties // *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*. 2020. V. 26. № 2. P. 717–725. doi: 10.1007/s10989-019-09879-3
- 10 Cui Q., Sun Y., Zhou Z., Cheng J., Guo M. Effects of enzymatic hydrolysis on physicochemical properties and solubility and bitterness of milk protein hydrolysates // *Foods*. 2021. V. 10. № 10. P. 2462. doi: 10.3390/foods10102462
- 11 Gao R., Yu Q., Shen Y., Chu Q., Chen G., Fen S. et al. Production, bioactive properties, and potential applications of fish protein hydrolysates: Developments and challenges // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. V. 110. P. 687–699. doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.031
- 12 Soto-Sierra L., Wilken L.R., Mallawarachchi S., Nikolov Z.L. Process development of enzymatically-generated algal protein hydrolysates for specialty food applications // *Algal Research*. 2021. V. 55. P. 102248. doi: 10.1016/j.algal.2021.102248
- 13 Chen H.J., Dai F.J., Chen C.Y., Fan S.L., Zheng J.H., Huang Y.C. et al. Evaluating the antioxidants, whitening and antiaging properties of rice protein hydrolysates // *Molecules*. 2021. V. 26. № 12. P. 3605. doi: 10.3390/molecules26123605
- 14 Pasković I., Popović L., Pongrac P., Polić Pasković M., Kos T., Jovanov P. et al. Protein hydrolysates – Production, effects on plant metabolism, and use in agriculture // *Horticulturae*. 2024. V. 10. № 10. P. 1041. doi: 10.3390/horticulturae10101041
- 15 Karges K., Bellingrath-Kimura S.D., Watson C.A., Stoddard F.L., Halwani M., Reckling M. Agro-economic prospects for expanding soybean production beyond its current northerly limit in Europe // *European Journal of Agronomy*. 2022. V. 133. P. 126415. doi: 10.1016/j.eja.2021.126415
- 16 Zhang M., Liu S., Wang Z., Yuan Y., Zhang Z., Liang Q. et al. Progress in soybean functional genomics over the past decade // *Plant Biotechnology Journal*. 2022. V. 20. № 2. P. 256–282. doi: 10.1111/pbi.13682
- 17 Qin P., Wang T., Luo Y. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022. V. 7. P. 100265. doi: 10.1016/j.jafr.2021.100265
- 18 Habinshuti I., Nsengumuremyi D., Muhoza B., Ebenezer F., Aregbe A.Y., Ndisanze M.A. Recent and novel processing technologies coupled with enzymatic hydrolysis to enhance the production of antioxidant peptides from food proteins: A review // *Food Chemistry*. 2023. V. 423. P. 136313. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136313
- 19 Nemati M., Shahosseini S.R., Ariaii P. Review of fish protein hydrolysates: production methods, antioxidant and antimicrobial activity and nanoencapsulation // *Food Science and Biotechnology*. 2024. V. 33. № 8. P. 1789–1803. doi: 10.1007/s10068-024-01554-8
- 20 Алексаночкин Д.И., Фоменко И.А., Алексеева Е.А., Чернуха И.М., Машенцева Н.Г. Получение растительного белка из семян и жмыха промышленной конопли: обзор способов переработки для использования в пищевой промышленности // *Пищевые системы*. 2024. Т. 7. № 2. С. 188–197. doi: 10.21323/2618-9771-2024-7-2-188-197
- 21 Yao M., Xu F., Yao Y., Wang H., Ju X., Wang L. Assessment of novel oligopeptides from rapeseed napin (*Brassica napus*) in protecting HepG2 cells from insulin resistance and oxidative stress // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022. V. 70. № 39. P. 12418–12429. doi: 10.1021/acs.jafc.2c03718
- 22 Gharaviri M., Aleksanochkin D.I., Ahangaran M., Fomenko I.A., Kovalev L.I., Kovaleva M.A. et al. Chickpea protein hydrolysates: Production, bioactivity, functional profile, and technological properties // *Foods and Raw Materials*. 2026. V. 14. № 1. P. 198–213. doi: 10.21603/2308-4057-2026-1-666
- 23 Islam M., Huang Y., Islam S., Fan B., Tong L., Wang F. Influence of the degree of hydrolysis on functional properties and antioxidant activity of enzymatic soybean protein hydrolysates // *Molecules*. 2022. V. 27. № 18. P. 6110. doi: 10.3390/molecules27186110
- 24 Xu Y., Yang Y., Ma C.M., Bian X., Liu X.F., Wang Y. et al. Characterization of the structure, antioxidant activity and hypoglycemic activity of soy (*Glycine max* L.) protein hydrolysates // *Food Research International*. 2023. V. 173. P. 113473. doi: 10.1016/j.foodres.2023.113473
- 25 Knežević-Jugović Z., Culetu A., Mijalković J., Duta D., Stefanović A., Šekuljica N. et al. Impact of different enzymatic processes on antioxidant, nutritional and functional properties of soy protein hydrolysates incorporated into novel cookies // *Foods*. 2022. V. 12. № 1. P. 24. doi: 10.3390/foods12010024
- 26 Жамсаранова С.Д., Лебедева С.Н., Болхонов Б.А., Соколов Д.В. Ферментативная конверсия пищевого белка и оценка антиоксидантной активности пептидов // *Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления*. 2021. № 4 (83). С. 5–14. doi: 10.53980/24131997_2021_4_5
- 27 Зорин С.Н., Мазо В.К., Воробьева И.С., Воробьева В.М., Асафов В.А. Технология получения пептидного модуля на основе гидролизата белка сои // *Пищевая промышленность*. 2017. № 10. С. 20–23.
- 28 Соколов Д.В., Болхонов Б.А., Жамсаранова С.Д., Лебедева С.Н., Баженова Б.А. Ферментативный гидролиз соевого белка // *Техника и технология пищевых производств*. 2023. Т. 53. № 1. С. 86–96. doi: 10.21603/2074-9414-2023-1-2418
- 29 Dent T., Campanella O., Maleky F. Enzymatic hydrolysis of soy and chickpea protein with Alcalase and Flavourzyme and formation of hydrogen bond mediated insoluble aggregates // *Current Research in Food Science*. 2023. V. 6. P. 100487. doi: 10.1016/j.crfs.2023.100487
- 30 Da Silva Crozatti T.T., Miyoshi J.H., Tonin A.P.P., Tomazini L.F., Oliveira M.A.S., Maluf J.U. et al. Obtaining of bioactive di- and tripeptides from enzymatic hydrolysis of soybean meal and its protein isolate using Alcalase® and Neutrase® // *International Journal of Food Science and Technology*. 2023. V. 58. № 3. P. 1586–1596. doi: 10.1111/ijfs.15886
- 31 Gao Y., Chen L., Chi H., Li L., Teng F. Insights into the soybean protein isolate hydrolysates: Performance characterization, emulsion construction and in vitro digestive behavior // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. V. 279. P. 135372. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135372

- 32 Nath A., Ahmad A.S., Amankwaa A., Csehi B., Mednyánszky Z., Szerdahelyi E. et al. Hydrolysis of soybean milk protein by papain: antioxidant, anti-angiotensin, antigenic and digestibility perspectives // *Bioengineering*. 2022. V. 9. № 9. P. 418. doi: 10.3390/bioengineering9090418
- 33 Laemmli U.K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4 // *Nature*. 1970. V. 227. № 5259. P. 680–685. doi: 10.1038/227680a0
- 34 Mora L., Toldrá F. Advanced enzymatic hydrolysis of food proteins for the production of bioactive peptides // *Current Opinion in Food Science*. 2023. V. 49. P. 100973. doi: 10.1016/j.cofs.2022.100973
- 35 Vogelsang-O'Dwyer M., Sahin A.W., Arendt E.K., Zannini E. Enzymatic hydrolysis of pulse proteins as a tool to improve techno-functional properties // *Foods*. 2022. V. 11. № 9. P. 1307. doi: 10.3390/foods11091307
- 36 Tsou M.J., Lin W.T., Lu H.C., Tsui Y.L., Chiang W.D. The effect of limited hydrolysis with Neutrase and ultrafiltration on the anti-adipogenic activity of soy protein // *Process Biochemistry*. 2010. V. 45. № 2. P. 217–222. doi: 10.1016/j.procbio.2009.09.010
- 37 Tsou M.J., Kao F.J., Tseng C.K., Chiang W.D. Enhancing the anti-adipogenic activity of soy protein by limited hydrolysis with Flavourzyme and ultrafiltration // *Food Chemistry*. 2010. V. 122. № 1. P. 243–248. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.02.070
- 38 Rostammiry L., Reza Saeidiasl M., Safari R., Javadian R. Optimization of the enzymatic hydrolysis of soy protein isolate by alcalase and trypsin // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2017. V. 14. № 1. P. 193–200. doi: 10.13005/bbra/2435
- 39 Yin C., Zhang X., Xu B., Zhao Q., Zhang S., Li Y. Effect of limited hydrolysis on the structure and gel properties of soybean isolate proteins: A comparative study of papain or/and trypsin // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. V. 282. P. 137398. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137398
- 40 Fathi P., Moosavi-Nasab M., Mirzapour-Kouhdasht A., Khalesi M. Generation of hydrolysates from rice bran proteins using a combined ultrasonication-Alcalase hydrolysis treatment // *Food Bioscience*. 2021. V. 42. P. 101110. doi: 10.1016/j.fbio.2021.101110
- 41 Gulcin I. Antioxidants and antioxidant methods: An updated overview // *Archives of Toxicology*. 2020. V. 94. № 3. P. 651–715. doi: 10.1007/s00204-020-02689-3
- 42 Wattanasiritham L., Theerakulkait C., Wickramasekara S., Maier C.S., Stevens J.F. Isolation and identification of antioxidant peptides from enzymatically hydrolyzed rice bran protein // *Food Chemistry*. 2016. V. 192. P. 156–162. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.06.057
- 43 Tkaczewska J., Borawska-Dziadkiewicz J., Kulawik P., Duda I., Morawska M., Mickowska B. The effects of hydrolysis condition on the antioxidant activity of protein hydrolysate from *Cyprinus carpio* skin gelatin // *LWT - Food Science and Technology*. 2020. V. 117. P. 108616. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108616
- 44 Ranamukhaarachchi S., Meissner L., Moresoli C. Production of antioxidant soy protein hydrolysates by sequential ultrafiltration and nanofiltration // *Journal of Membrane Science*. 2013. V. 429. P. 81–87. doi: 10.1016/j.memsci.2012.10.040

References

- 1 Nasri R., Abdelhedi O., Nasri M., Jridi M. Fermented protein hydrolysates: biological activities and applications. *Current Opinion in Food Science*. 2022. vol. 43. pp. 120–127. doi: 10.1016/j.cofs.2021.11.006.
- 2 Coscueta E.R., Campos D.A., Osório H., Nerli B.B., Pintado M. Enzymatic soy protein hydrolysis: A tool for biofunctional food ingredient production. *Food Chemistry: X*. 2019. vol. 1. article 100006. doi: 10.1016/j.fochx.2019.100006.
- 3 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.14380.
- 4 Tavano O.L. Protein hydrolysis using proteases: An important tool for food biotechnology. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. 2013. vol. 90. pp. 1–11. doi: 10.1016/j.molcatb.2013.01.011.
- 5 Czelej M., Garbacz K., Czernecki T., Wawrzykowski J., Waśko A. Protein hydrolysates derived from animals and plants – a review of production methods and antioxidant activity. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 13. article 1953. doi: 10.3390/foods11131953.
- 6 Gasparre N., Rosell C.M., Boukid F. Enzymatic hydrolysis of plant proteins: tailoring characteristics, enhancing functionality, and expanding applications in the food industry. *Food and Bioprocess Technology*. 2025. vol. 18. no. 4. pp. 3272–3287. doi: 10.1007/s11947-024-03648-x.
- 7 Solanki P., Putatunda C., Kumar A., Bhatia R., Walia A. Microbial proteases: ubiquitous enzymes with innumerable uses. *3 Biotech*. 2021. vol. 11. no. 10. article 428. doi: 10.1007/s13205-021-02928-z.
- 8 Razzaq A., Shamsi S., Ali A., Ali Q., Sajjad M., Malik A. et al. Microbial proteases applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. vol. 7. article 110. doi: 10.3389/fbioe.2019.00110.
- 9 Dos Santos Aguilar J.G., de Souza A.K.S., de Castro R.J.S. Enzymatic hydrolysis of chicken viscera to obtain added-value protein hydrolysates with antioxidant and antihypertensive properties. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*. 2020. vol. 26. no. 2. pp. 717–725. doi: 10.1007/s10989-019-09879-3.
- 10 Cui Q., Sun Y., Zhou Z., Cheng J., Guo M. Effects of enzymatic hydrolysis on physicochemical properties and solubility and bitterness of milk protein hydrolysates. *Foods*. 2021. vol. 10. no. 10. article 2462. doi: 10.3390/foods10102462.
- 11 Gao R., Yu Q., Shen Y., Chu Q., Chen G., Fen S. et al. Production, bioactive properties, and potential applications of fish protein hydrolysates: Developments and challenges. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. vol. 110. pp. 687–699. doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.031.
- 12 Soto-Sierra L., Wilken L.R., Mallawarachchi S., Nikolov Z.L. Process development of enzymatically-generated algal protein hydrolysates for specialty food applications. *Algal Research*. 2021. vol. 55. article 102248. doi: 10.1016/j.algal.2021.102248.
- 13 Chen H.J., Dai F.J., Chen C.Y., Fan S.L., Zheng J.H., Huang Y.C. et al. Evaluating the antioxidants, whitening and antiaging properties of rice protein hydrolysates. *Molecules*. 2021. vol. 26. no. 12. article 3605. doi: 10.3390/molecules26123605.
- 14 Pasković I., Popović L., Pongrac P., Polić Pasković M., Kos T., Jovanov P. et al. Protein hydrolysates – Production, effects on plant metabolism, and use in agriculture. *Horticulturae*. 2024. vol. 10. no. 10. article 1041. doi: 10.3390/horticulturae10101041.
- 15 Karges K., Bellingrath-Kimura S.D., Watson C.A., Stoddard F.L., Halwani M., Reckling M. Agro-economic prospects for expanding soybean production beyond its current northerly limit in Europe. *European Journal of Agronomy*. 2022. vol. 133. article 126415. doi: 10.1016/j.eja.2021.126415.

- 16 Zhang M., Liu S., Wang Z., Yuan Y., Zhang Z., Liang Q. et al. Progress in soybean functional genomics over the past decade. *Plant Biotechnology Journal*. 2022. vol. 20. no. 2. pp. 256–282. doi: 10.1111/pbi.13682.
- 17 Qin P., Wang T., Luo Y. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022. vol. 7. article 100265. doi: 10.1016/j.jafr.2021.100265.
- 18 Habinshuti I., Nsengumuremyi D., Muhoza B., Ebenezer F., Aregbe A.Y., Ndisanze M.A. Recent and novel processing technologies coupled with enzymatic hydrolysis to enhance the production of antioxidant peptides from food proteins: A review. *Food Chemistry*. 2023. vol. 423. article 136313. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136313.
- 19 Nemati M., Shahosseini S.R., Ariaii P. Review of fish protein hydrolysates: production methods, antioxidant and antimicrobial activity and nanoencapsulation. *Food Science and Biotechnology*. 2024. vol. 33. no. 8. pp. 1789–1803. doi: 10.1007/s10068-024-01554-8.
- 20 Aleksanochkin D.I., Fomenko I.A., Alekseeva E.A., Chernukha I.M., Mashentseva N.G. Production of plant protein from seeds and cake of industrial hemp: Overview of processing methods for food industry. *Food Systems*. 2024. vol. 7. no. 2. pp. 188–197. doi: 10.21323/2618-9771-2024-7-2-188-197.
- 21 Yao M., Xu F., Yao Y., Wang H., Ju X., Wang L. Assessment of novel oligopeptides from rapeseed napin (*Brassica napus*) in protecting HepG2 cells from insulin resistance and oxidative stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022. vol. 70. no. 39. pp. 12418–12429. doi: 10.1021/acs.jafc.2c03718.
- 22 Gharaviri M., Aleksanochkin D.I., Ahangaran M., Fomenko I.A., Kovalev L.I., Kovaleva M.A. et al. Chickpea protein hydrolysates: Production, bioactivity, functional profile, and technological properties. *Foods and Raw Materials*. 2026. vol. 14. no. 1. pp. 198–213. doi: 10.21603/2308-4057-2026-1-666.
- 23 Islam M., Huang Y., Islam S., Fan B., Tong L., Wang F. Influence of the degree of hydrolysis on functional properties and antioxidant activity of enzymatic soybean protein hydrolysates. *Molecules*. 2022. vol. 27. no. 18. article 6110. doi: 10.3390/molecules27186110.
- 24 Xu Y., Yang Y., Ma C.M., Bian X., Liu X.F., Wang Y. et al. Characterization of the structure, antioxidant activity and hypoglycemic activity of soy (*Glycine max* L.) protein hydrolysates. *Food Research International*. 2023. vol. 173. Article 113473. doi: 10.1016/j.foodres.2023.113473.
- 25 Knežević-Jugović Z., Culetu A., Mijalković J., Duta D., Stefanović A., Šekuljica N. et al. Impact of different enzymatic processes on antioxidant, nutritional and functional properties of soy protein hydrolysates incorporated into novel cookies. *Foods*. 2022. vol. 12. no. 1. article 24. doi: 10.3390/foods12010024.
- 26 Zhamsaranova S.D., Lebedeva S.N., Bolkhonov B.A., Sokolov D.V. Enzymatic food protein conversion and assessment of antioxidant activity of peptides. *ESSUTM Bulletin*. 2021. no. 4 (83). pp. 5–14. doi: 10.53980/24131997_2021_4_5 (in Russian).
- 27 Zorin S.N., Mazo V.K., Vorobyova I.S., Vorobyova V.M., Asafov V.A. The technology of producing the peptide of the module on the basis of the hydrolysate of soy protein. *Food Industry*. 2017. no. 10. pp. 20–23. (in Russian).
- 28 Sokolov D.V., Bolkhonov B.A., Zhamsaranova S.D., Lebedeva S.N., Bazhenova B.A. Enzymatic Hydrolysis of Soy Protein. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023. vol. 53. no. 1. pp. 86–96. doi: 10.21603/2074-9414-2023-1-2418 (in Russian).
- 29 Dent T., Campanella O., Maleky F. Enzymatic hydrolysis of soy and chickpea protein with Alcalase and Flavourzyme and formation of hydrogen bond mediated insoluble aggregates. *Current Research in Food Science*. 2023. vol. 6. article 100487. doi: 10.1016/j.crfs.2023.100487.
- 30 Da Silva Crozatti T.T., Miyoshi J.H., Tonin A.P.P., Tomazini L.F., Oliveira M.A.S., Maluf J.U. et al. Obtaining of bioactive di- and tripeptides from enzymatic hydrolysis of soybean meal and its protein isolate using Alcalase® and Neutrase®. *International Journal of Food Science and Technology*. 2023. vol. 58. no. 3. pp. 1586–1596. doi: 10.1111/ijfs.15886.
- 31 Gao Y., Chen L., Chi H., Li L., Teng F. Insights into the soybean protein isolate hydrolysates: Performance characterization, emulsion construction and in vitro digestive behavior. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. vol. 279. article 135372. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135372.
- 32 Nath A., Ahmad A.S., Amankwaa A., Csehi B., Mednyánszky Z., Szerdahelyi E. et al. Hydrolysis of soybean milk protein by papain: antioxidant, anti-angiotensin, antigenic and digestibility perspectives. *Bioengineering*. 2022. vol. 9. no. 9. article 418. doi: 10.3390/bioengineering9090418.
- 33 Laemmli U.K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*. 1970. vol. 227. no. 5259. pp. 680–685. doi: 10.1038/227680a0.
- 34 Mora L., Toldrá F. Advanced enzymatic hydrolysis of food proteins for the production of bioactive peptides. *Current Opinion in Food Science*. 2023. vol. 49. article 100973. doi: 10.1016/j.cofs.2022.100973.
- 35 Vogelsang-O'Dwyer M., Sahin A.W., Arendt E.K., Zannini E. Enzymatic hydrolysis of pulse proteins as a tool to improve techno-functional properties. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 9. article 1307. doi: 10.3390/foods11091307.
- 36 Tsou M.J., Lin W.T., Lu H.C., Tsui Y.L., Chiang W.D. The effect of limited hydrolysis with Neutrase and ultrafiltration on the anti-adipogenic activity of soy protein. *Process Biochemistry*. 2010. vol. 45. no. 2. pp. 217–222. doi: 10.1016/j.procbio.2009.09.010.
- 37 Tsou M.J., Kao F.J., Tseng C.K., Chiang W.D. Enhancing the anti-adipogenic activity of soy protein by limited hydrolysis with Flavourzyme and ultrafiltration. *Food Chemistry*. 2010. vol. 122. no. 1. pp. 243–248. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.02.070.
- 38 Rostammirya L., Saeidiasl M.R., Safari R., Javadian R. Optimization of the enzymatic hydrolysis of soy protein isolate by alcalase and trypsin. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2017. vol. 14. no. 1. pp. 193–200. doi: 10.13005/bbra/2435.
- 39 Yin C., Zhang X., Xu B., Zhao Q., Zhang S., Li Y. Effect of limited hydrolysis on the structure and gel properties of soybean isolate proteins: A comparative study of papain or/and trypsin. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. vol. 282. article 137398. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137398.
- 40 Fathi P., Moosavi-Nasab M., Mirzapour-kouhdasht A., Khalesi M. Generation of hydrolysates from rice bran proteins using a combined ultrasonication-Alcalase hydrolysis treatment. *Food Bioscience*. 2021. vol. 42. article 101110. doi: 10.1016/j.fbio.2021.101110.
- 41 Gulcin I. Antioxidants and antioxidant methods: An updated overview. *Archives of Toxicology*. 2020. vol. 94. no. 3. pp. 651–715. doi: 10.1007/s00204-020-02689-3.

42 Wattanasiritham L., Theerakulkait C., Wickramasekara S., Maier C.S., Stevens J.F. Isolation and identification of antioxidant peptides from enzymatically hydrolyzed rice bran protein. *Food Chemistry*. 2016. vol. 192. pp. 156–162. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.06.057.

43 Tkaczewska J., Borawska-Dziadkiewicz J., Kulawik P., Duda I., Morawska M., Mickowska B. The effects of hydrolysis condition on the antioxidant activity of protein hydrolysate from *Cyprinus carpio* skin gelatin. *LWT - Food Science and Technology*. 2020. vol. 117. article 108616. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108616.

44 Ranamukhaarachchi S., Meissner L., Moresoli C. Production of antioxidant soy protein hydrolysates by sequential ultrafiltration and nanofiltration. *Journal of Membrane Science*. 2013. vol. 429. pp. 81–87. doi: 10.1016/j.memsci.2012.10.040.

Сведения об авторах

Артём Э. Григорян аспирант, кафедра индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, Москва 125080, Россия, grigoryan@mgupp.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8750-8453>

Виктория В. Фоменко аспирант, кафедра биотехнологии и биоорганического синтеза, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, Москва 125080, Россия, Victoria-96@bk.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8677-0927>

Илья А. Детинкин магистр, кафедра биотехнологии и биоорганического синтеза, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, Москва 125080, Россия, detinkin02@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0004-0985-9505>

Ирина У. Кусова к.т.н., доцент, заведующий кафедрой, кафедра индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, Москва 125080, Россия, kusovaiu@mgupp.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8022-7229>

Наталья Г. Машенцева д.т.н., профессор, кафедра биотехнологии и биоорганического синтеза, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, 11, Москва 125080, Россия, natali-mng@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9287-0585>

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

Artem E. Grigoryan graduate student, food industry, hotel and service department, Russian Biotechnological University (ROSBIOTEX), 11, Volokolamsk highway, Moscow, 125080, Russia, grigoryan@mgupp.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8750-8453>

Victoria V. Fomenko graduate student, biotechnology and bioorganic synthesis department, Russian Biotechnological University (ROSBIOTEX), 11, Volokolamsk highway, Moscow, 125080, Russia, Victoria-96@bk.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8677-0927>

Ilya A. Detinkin master student, biotechnology and bioorganic synthesis department, Russian Biotechnological University (ROSBIOTEX), 11, Volokolamsk highway, Moscow, 125080, Russia, detinkin02@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0004-0985-9505>

Irina U. Kusova Cand. Sci. (Engin.), associate professor Head of the Department, food industry, hotel and service department, Russian Biotechnological University (ROSBIOTEX), 11, Volokolamsk highway, Moscow, 125080, Russia, kusovaiu@mgupp.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8022-7229>

Natalia G. Mashentseva Dr. Sci. (Engin.), professor, biotechnology and bioorganic synthesis department, Russian Biotechnological University (ROSBIOTEX), 11, Volokolamsk highway, Moscow, 125080, Russia, natali-mng@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9287-0585>

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 16/10/2025	После редакции 30/10/2025	Принята в печать 17/11/2025
Received 16/10/2025	Accepted in revised 30/10/2025	Accepted 17/11/2025

Конструкторские и технологические решения для производства антоциансодержащего экстракта черного риса

Ольга В. Золотовская	¹	olazoloto@bk.ru	 0000-0003-1758-0593
Ольга И. Коннова	¹	okonnova88@gmail.com	 0009-0007-1691-1780
Наталия П. Мемедейкина	¹	zolinatashka@mail.ru	 0009-0007-1691-1780
Светлана А. Свирина	¹	svetlanasv97@yandex.ru	 0009-0002-1646-2421
Юрий А. Максименко	¹	amxsl@yandex.ru	 0000-0001-7973-1903

¹ Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия

Аннотация. Известно, что черный рис содержит большое количество антоцианов, является доступным, технологически рациональным и экономически целесообразным сырьем для промышленного получения антоцианов. Актуальны исследования по разработке и научно-практическому обоснованию технологических и технических решений для производства антоцианов и антоцианового пищевого красителя из черного риса. Проанализированы научно-техническая и патентная литература в области техники и технологий извлечения антоцианов и их использования в качестве натурального красителя и функционального компонента в составе пищевых продуктов. В статье представлены технические и технологические решения, машинно-аппаратурная схема и режимные параметры основных технологических процессов для производства экстракта черного риса. В качестве объектов переработки использованы черный рис сорта «Мулатка» и черный рис сорта «Южная ночь». Антоциановый пищевой краситель из черного риса является высушенным распылительным способом экстрактом черного риса. Описаны основные технологические процессы: формирование гидромодуля, экстракция, фильтрование, концентрирование и сушка. Представлены показатели качества сухого экстракта черного риса. Предложена рациональная конструкция ультразвукового экстрактора для реализации водной экстракции антоцианов из черного риса. Разработанный запатентованный способ основан на водной ультразвуковой экстракции по принципу реперколяции при гидромодуле 1:4–1:6, температуре 30–40°C, с использованием ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и интенсивностью 50 Вт/см² в течение 70–120 минут при постоянном циркуляционном перемешивании экстрагента с кратностью циркуляции 15–25 объемов/час. Выход антоцианов по предлагаемому способу составляет до 96%. Концентрирование проводят путем вакуум-выпаривания при температуре 30–40°C до содержания сухих веществ 10–15%, с последующей распылительной сушкой при температуре 140–160°C. Сочетание экстракции по типу реперколяции, механического перемешивания и ультразвуковой обработки обеспечивает синергетический эффект, значительно ускоряя процесс по сравнению с традиционными методами. Предложенные конструкторские и технологические решения могут быть применимы на предприятиях по глубокой переработке сырья растительного происхождения для производства антоцианов, биологически активных добавок и функциональных продуктов питания.

Ключевые слова: антоцианы, пищевой краситель, экстракт черного риса, ультразвуковая экстракция, экстрактор.

Construction solutions and technological solutions for the production of anthocyanin-containing extract of black rice

Olga V. Zolotovskaya	¹	olazoloto@bk.ru	 0000-0003-1758-0593
Olga I. Konnova	¹	okonnova88@gmail.com	 0009-0007-1691-1780
Natalia P. Memedeikina	¹	zolinatashka@mail.ru	 0009-0007-1691-1780
Svetlana A. Svirina	¹	svetlanasv97@yandex.ru	 0009-0002-1646-2421
Yuri A. Maksimenko	¹	amxsl@yandex.ru	 0000-0001-7973-1903

¹ Astrakhan State Technical University, st. Tatishcheva, building 16/1, Astrakhan, 414056, Russia

Abstract. It is known that black rice contains a large amount of anthocyanins and is an accessible, technologically rational and economically feasible raw material for industrial production of anthocyanins. Research on the development and scientific-practical justification of technological and technical solutions for the production of anthocyanins and anthocyanin food colorant from black rice is relevant. Scientific-technical and patent literature in the field of techniques and technologies for anthocyanin extraction and their use as a natural colorant and functional component in food products has been analyzed. The article presents technical and technological solutions, machine-hardware scheme and operating parameters of the main technological processes for the production of black rice extract. Black rice varieties "Mulatka" and "Yuzhnaya Noch" were used as processing objects. The anthocyanin food colorant from black rice is a spray-dried extract of black rice. The main technological processes are described: formation of hydromodule, extraction, filtration, concentration and drying. Quality indicators of dry black rice extract are presented. A rational design of an ultrasonic extractor for implementing aqueous extraction of anthocyanins from black rice is proposed. The developed patented method is based on aqueous ultrasonic extraction according to the percolation principle at a hydromodule of 1:4–1:6, temperature of 30–40°C, using ultrasonic treatment with a frequency of 22 kHz and intensity of 50 W/cm² for 70–120 minutes with constant circulation mixing of the extractant at a circulation rate of 15–25 volumes/hour. The yield of anthocyanins by the proposed method reaches up to 96%. Concentration is carried out by vacuum evaporation at a temperature of 30–40°C to a dry matter content of 10–15%, followed by spray drying at a temperature of 140–160°C. The combination of percolation-type extraction, mechanical mixing and ultrasonic treatment provides a synergistic effect, significantly accelerating the process compared to traditional methods. The proposed design and technological solutions can be applied at enterprises for deep processing of plant raw materials for the production of anthocyanins, biologically active additives and functional food products.

Keywords: anthocyanins, food coloring, black rice extract, ultrasonic extraction, extractor.

Для цитирования

Золотовская О.В., Коннова О.И., Мемедейкина Н.П., Свирина С.А., Максименко Ю.А. Конструкторские и технологические решения для производства антоциансодержащего экстракта черного риса // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 193–199. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-193-199

For citation

Zolotovskaya O.V., Konnova O.I., Memedeikina N.P., Svirina S.A., Maksimenko Y.A. Construction solutions and technological solutions for the production of anthocyanin-containing extract of black rice. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 193–199. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-193-199

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

Введение

Многочисленными исследованиями доказаны положительные свойства антоцианов для организма человека, например, антиоксидантное действие, противовоспалительное действие, антираковая активность, антидиабетическая активность и др.

В настоящее время практически все натуральные антоцианы, применяемые в пищевой промышленности в качестве красителей или как биологически активные компоненты в составе функциональных продуктов питания, получают, преимущественно, из ягод, фруктов, овощей и злаков. Антоцианы используют для окрашивания широкого ассортимента пищевой продукции (соусов, напитков, марципана, шоколада, теста, мастики, мороженого и других продуктов) [1–6]. В связи с доказанным высоким содержанием антоцианов 60–140 мг на 100 г [7, 8], черный рис является технологически рациональным и экономически целесообразным источником антоцианов [9, 10].

В России для получения антоцианов в условиях предприятий различной мощности черный рис не используется ввиду отсутствия рациональной технологии комплексной переработки черного риса с получением антоцианов, пищевых красителей и других продуктов.

Следовательно, актуальны исследования по разработке и научно-практическому обоснованию технологических и технических решений для производства антоцианов и антоцианового пищевого красителя из черного риса.

Цель работы – разработка технологических решений для производства антоцианосодержащего экстракта черного риса в сухой форме, подбора рациональных режимных параметров и аппаратного оформления предложенной технологии.

Объекты и методы

Исследования по разработке способа и конструкторских решений для получения антоцианосодержащего экстракта черного риса выполнены на кафедре «Технологические машины и оборудование» и научно-исследовательской лаборатории «Пищевые системы и биотехнологии» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

В качестве объектов переработки использованы черный рис сорта «Мулалка» и черный рис сорта «Южная ночь». В работе применялись как традиционные, так и экспериментальные методы исследования. При проведении исследований использованы современные методики сбора, статистической обработки и анализа информации.

Качественное и количественное определение основного красящего вещества проводили спектрофотометрическим методом в соответствии с ГОСТ 33767–2016 «Добавки пищевые. Методы идентификации и определения массовой доли основного красящего вещества в пищевом красителе антоцианы E163».

Массовую долю концентрацию антоцианов, в пересчете на цианидин-3-глюкозид, определяли методом рН-дифференциальной спектрофотометрии в соответствии с ГОСТ 32709–2014 «Продукция соковая. Методы определения антоцианов».

Результаты и обсуждение

Традиционными стадиями при получении антоцианов из сырья растительного происхождения являются: подготовка и измельчение сырья, отделение сока или экстракция, фильтрование, ультрафильтрация, концентрирование и сушка.

Проведен анализ научной, научно-технической литературы и патентной информации. Разработке технологических решений для эффективного извлечения антоцианов из различного сырья и подбору растворителей посвящено большое количество исследований [4, 11–13]. Обоснованию различных методов интенсификации процессов извлечения ценных компонентов из растительного сырья посвящен ряд исследовательских работ [14, 15]. Актуальными являются разработки в области конструкторских решений для организации эффективной экстракции растительного сырья [16–19].

Для извлечения антоцианов из черного риса и последующего их использования в пищевой промышленности, в том числе как натурального красителя, предложен и запатентован способ [20], основанный на водной ультразвуковой экстракции по принципу реперколяции.

Разработанный способ включает: смешивание сырья с экстрагентом – водой, экстрагирование при ультразвуковой обработке смеси, отделение экстракта и его концентрирование при этом экстрагирование проводится методом реперколяции при гидромодуле 1: 4 – 1:6 и температуре 30–40 °С с использованием ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и интенсивностью 50 Вт/см² в течение 70–120 мин при постоянном циркуляционном перемешивании экстрагента с кратностью циркуляции 15–25 объемов/ч, затем экстракт отделяют фильтрованием, концентрирование проводят путем вакуум-выпаривания экстракта при температуре 30–40 °С до содержания сухих веществ 10–15%, затем экстракт подвергают распылительной сушке при температуре 140–160 °С. Выход антоцианов по предлагаемому способу – до 96%.

Антоциановый пищевой темно-фиолетовый краситель из черного риса является высушенным распылительным способом экстрактом черного риса с влажностью не более 5%. Изменяя рН красителя, можно получить весь цветовой спектр необходимых красителей.

Последовательность основных технологических операций представлена в виде разработанной машинно-аппаратурной схемы (рисунок 1), а режимные параметры основных операций, установленные в ходе исследований, представлены в таблице 1.

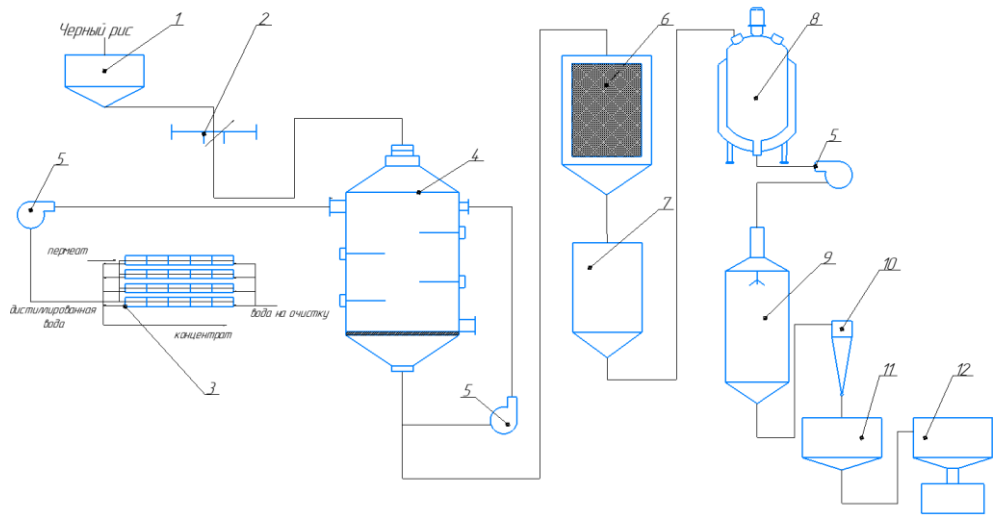


Рисунок 1. Машинно-аппаратурная схема производства экстракта черного риса: 1 – приемный бункер, 2 – весовой дозатор, 3 – водоподготовка, 4 – ультразвуковой экстрактор, 5 – насос, 6 – фильтрующее устройство, 7 – приемный бункер, 8 – вакуум-выпарной аппарат, 9 – распылительная сушилка, 10 – циклон, 11 – приемный бункер, 12 – фасовочное устройство

Figure 1. Machine and hardware scheme for the production of black rice extract: 1 – receiving hopper, 2 – weighing dispenser, 3 – water treatment, 4 – ultrasonic extractor, 5 – pump, 6 – filtering device, 7 – receiving hopper, 8 – vacuum evaporator, 9 – spray dryer, 10 – cyclone, 11 – receiving hopper, 12 – filling device

Таблица 1.
Режимные параметры технологических стадий производства экстракта черного риса

Table 1.

Operating parameters of the technological stages of black rice extract production

Технологическая стадия Technological stage	Описание и режимные параметры Description and Operating Parameters
Формирование экстракционной смеси – дозирование и смешивание сырья и экстрагента Formation of the extraction mixture – dosing and mixing of raw materials and extractant	Черный рис загружают в ультразвуковую экстракционную установку, затем заливают подготовленную воду с температурой 30–40 °С. Смешивание для получения экстракционной смеси происходит в соотношении сырье: вода от 1:4 до 1:6. Экстракционную смесь перемешивают и поддерживают ее температуру в диапазоне 30–40 °С Black rice is loaded into an ultrasonic extraction unit, then poured with prepared water at a temperature of 30–40°C. Mixing to obtain the extraction mixture occurs at a raw material:water ratio of 1:4 to 1:6. The extraction mixture is stirred and maintained at a temperature of 30–40°C.
Экстракция Extraction	Для извлечения водорастворимых компонентов – антоцианов из черного риса применяется ультразвуковая обработка экстракционной смеси воздействием ультразвуковых волн частотой 22 кГц и интенсивностью 50 Вт/см². Процесс экстракции длится от 70 до 120 мин. Экстракционную смесь перемешивают и поддерживают ее температуру в диапазоне 30–40 °С To extract water-soluble components—anthocyanins—from black rice, the extraction mixture is ultrasonically treated with ultrasonic waves at a frequency of 22 kHz and an intensity of 50 W/cm². The extraction process lasts 70 to 120 minutes. The extraction mixture is stirred and maintained at a temperature of 30–40°C.
Фильтрация Filtration	По завершению процесса экстракции полученную смесь разделяют на твердую фракцию – отработанный рис и жидкую фракцию – экстракт. Рис. отправляется на дальнейшую переработку (для получения кормовой продукции, рисовой муки крахмала, и др.) Once the extraction process is complete, the resulting mixture is separated into a solid fraction (spent rice) and a liquid fraction (extract). Fig. The extract is sent for further processing (to produce feed products, rice flour, starch, etc.).
Концентрирование Concentration	Концентрирование экстракта проводят путем вакуум-выпаривания при температуре 30–40 °С до содержания сухих веществ в концентрате 10–15% The extract is concentrated by vacuum evaporation at a temperature of 30–40°C to a dry matter content of 10–15% in the concentrate.
Сушка Drying	Проводят распылительную сушку концентрата при температуре воздуха 140–160 °С для получения сухой формы экстракта (порошка) влажностью не более 5,0% The concentrate is spray-dried at an air temperature of 140–160°C to obtain a dry extract (powder) with a moisture content of no more than 5.0%.

В таблице 2 приведены основные органолептические показатели качества антоцианового красителя – сухого экстракта черного риса (рисунок 2), полученного при рациональных режимах экстракции.

Таблица 2.
Органолептические показатели экстракта
черного риса

Table 2.
Organoleptic characteristics of black rice extract

Показатель Index	Характеристика Value
Внешний вид Appearance	Однородный порошок без сбившихся комочков и посторонних примесей A uniform powder without lumps or foreign impurities
Запах Smell	Чистый, свойственный запаху риса, без посторонних запахов Clean, with a characteristic rice aroma, free of foreign odors
Вкус Taste	Кислый или слабокислый, слегка терпкий, без посторонних привкусов Sour or slightly sour, slightly tart, without foreign flavors
Цвет Color	От темно-красного до темно- фиолетового From dark red to dark purple

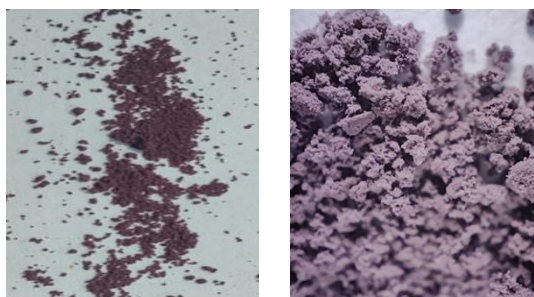


Рисунок 2. Тонкодисперсный порошок антоцианов
Figure 2. Fine powder of anthocyanins

Для эффективной реализации процесса ультразвуковой экстракции антоцианов из черного риса предложена конструкция экстрактора, представленная на рисунке 3.

Конструкция позволяет осуществлять экстракцию сырья путем реперколяции при циркуляции экстрагента и ультразвуковом

Разработанная машинно-аппаратурная схема (рисунок 1) позволяет спроектировать производственный участок с учетом норм технологического проектирования организаций по производству пищевой продукции.

Реализация основных стадий процесса производства сухого экстракта черного риса таких как экстрагирование, выпаривание и сушка напрямую влияет на производительность и эффективность всей технологической линии.

Следовательно, необходимо произвести подбор рациональных конструкторских решений для аппаратурного оформления предложенного способа получения антоцианового красителя из черного риса.

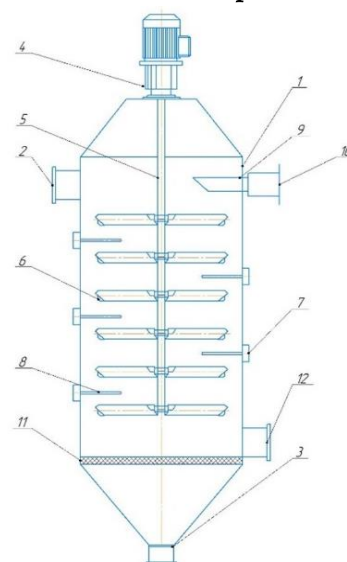


Рисунок 3. Ультразвуковой экстрактор: 1-цилиндрический корпус; 2, 3, 10, 12-технологические патрубки; 4 – приводная мешалка; 5-вал; 6 – загнутые горизонтальные лопасти; 7 – ультразвуковые генераторы; 8 – стержневые рабочие элементы; 9 – гидравлическая форсунка; 11-ложное дно
Figure 3. Ultrasonic extractor: 1-cylindrical body; 2, 3, 10, 12-process nozzles; 4-drive agitator; 5-shaft; 6 – curved horizontal blades; 7 – ultrasonic generators; 8 – rod working elements; 9 – hydraulic nozzle; 11-false bottom

Разработаны конструкции экстракторов [21, 22], вакуум-выпарного аппарата [23] и сушильных установок [24, 25], внедрение которых позволит на практике реализовать разработанные режимы процессов производства. Воздействию на систему сырье – экстрагент при ее механическом перемешивании.

Механическое объемное перемешивание перколяционного слоя при экстракции позволяет предотвращать образование застойных зон и улучшить контакт между сырьем и экстрагентом, тем самым ускоряя процесс диффузии и увеличивая скорость и эффективность экстракции.

Ультразвуковая обработка за счет кавитационного эффекта значительно усиливает процесс экстракции, обеспечивая ряд ключевых преимуществ. Кавитационные пузырьки, схлопываясь, создают микрогидродинамические ударные волны, которые ослабляют и частично разрушают клеточные стенки сырья, высвобождая целевые компоненты, увеличивают проницаемость сырья для экстрагента, улучшают диффузию экстрагента вглубь частиц. По сравнению с традиционными методами ультразвук ускоряет процесс в 2–10 раз. Ультразвуковая обработка позволяет снизить температуру процесса, сохраняя термолабильные соединения.

Сочетание таких факторов как экстракция по типу реперколяции, механическое перемешивание и ультразвуковая обработка перколяционного слоя обеспечивает синергетический эффект, значительно ускоряя процесс экстракции

по сравнению с традиционными методами, что и подтверждено в ходе реализации способа по патенту [20] и анализе показателей качества полученных образцов антоцианового красителя.

Заключение

Разработанные способ, машинно-аппаратурная схема, режимы технологических процессов и конструкции аппаратов необходимы

для внедрения на предприятиях, специализирующихся на переработке растительного сырья. Внедрение позволит наладить выпуск ценной продукции: антоцианов, антоцианосодержащих биологически-активных добавок из черного риса, антоцианового пищевого красителя, функциональных продуктов питания.

Литература

- 1 Панасюк А.Л., Кузьмина Е.И., Егорова О.С. Производство и применение натуральных антоциановых пищевых красителей (обзор) // Пищевая промышленность. 2021. № 10. С. 13–19.
- 2 Albuquerque B.R., Oliveira M.B.P.P., Barros L., Ferreira I.C.F.R. Could fruits be a reliable source of food colorants? Pros and cons of these natural additives // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020. V. 61. № 5. P. 805–835. doi: 10.1080/10408398.2020.1746904
- 3 Кайсина Д.А. Антоциановые природные пигменты – альтернатива искусственным пищевым красителям // Многополярный мир в фокусе новой действительности. 2023. С. 90–92.
- 4 Болотов В.М., Комарова Е.В., Саввин П.Н. Технология получения, свойства и применение пищевых красителей на основе природных антоциановых и каротиноидных соединений // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2018. Т. 24. № 1. С. 124–133. doi: 10.17277/vestnik.2018.01. pp.124-133
- 5 Технология получения натуральных антоциановых красителей и их использование в составе функциональных продуктов питания / Дейнека В.И., Мячикова Н.И., Дейнека Л.А., Блинова И.П. // Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. (Саратов, 24–25 марта 2021 г.) / Под общ. ред. О.М. Поповой, Н.В. Неповинных, В.А. Буховец. Саратов: ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2021. С. 251–255.
- 6 Swami S.B., Ghgare S.N., Swami S.S. et al. Natural pigments from plant sources: A review // The Pharma Innovation Journal. 2020. V. 9. № 10. P. 566–574.
- 7 Гончарова Ю.К., Бушман Н.Ю., Бруяко В.Н. Черноплодный рис как источник антиоксидантов в питании россиян // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. 2016. № 12. С. 108–110.
- 8 Яшин Я.И., Рыжнёв В.Ю., Яшин А.Я., Черноусова Н.И. Природные антиоксиданты. Содержание в пищевых продуктах и влияние их на здоровье и старение человека. Транс. Лит., 2009. С. 126–130.
- 9 Silva Fernandes T., Dias Ferreira G.M., da Silva G.A., Boggione Santos I.J., Barbosa Mageste A. Extraction of anthocyanins from the byproduct and wastes of black rice production by ecofriendly method // Separation Science and Technology. 2021. V. 57. № 9. P. 1442–1453. doi: 10.1080/01496395.2021.1992437
- 10 Leonarski E., Kuasnei M., Cesca K., Oliveira D. de, Zielinski A.A.F. Black rice and its by-products: anthocyanin-rich extracts and their biological potential // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. V. 64. № 25. P. 9261–9279. doi: 10.1080/10408398.2023.2211169
- 11 Кольцов В.А., Бочаров В.А. Изучение изменения антоцианов при ультразвуковой экстракции черноплодной рябины // Наука и Образование. 2021. Т. 4. № 4. С. ... (необходимо указать страницы).
- 12 Чеснокова Н.Ю., Кузнецова А.А., Кушнаренко Л.В. Влияние условий извлечения на экстрагирование антоцианов из ягодного сырья // Вестник КРАСГАУ. 2023. № 8 (197). С. 218–226. doi: 10.36718/1819-4036-2023-8-218-226
- 13 Kurkin V.A., Shaikhutdinov I.K., Pravdivtseva O.E. et al. Development of approaches to standardization of fresh fruits of *Crataegus submollis* Sarg. // Problems of Biological Medical and Pharmaceutical Chemistry. 2020. V. 23. № 3. P. 37–42. doi: 10.29296/25877313-2020-03-07
- 14 Чеснокова Н.Ю., Ашихмин Е.А. Влияние аскорбиновой кислоты на интенсивность извлечения антоцианового пигмента из ягод черной смородины и его стабильность // Индустрия питания. 2020. Т. 5. № 4. С. 68–73. doi: 10.29141/2500-1922-2020-5-4-10
- 15 Даудова Т.Н., Давудова Л.А. Влияние электромагнитного поля на интенсификацию процесса экстрагирования антоцианов из плодов терна и дикой черешни // Научные исследования: итоги и перспективы. 2021. Т. 2. № 3. С. 29–35. doi: 10.21822/2713-220X-2021-2-3-29-35
- 16 Герасимов М.А., Кошечкина А.С. Современные методы экстракции и очистки антоцианов // Вопросы питания. 2023. Т. 92. № S5 (549). С. 190–191. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-5s-234
- 17 Ультразвуковой экстрактор для растительного сырья / Коннова О.И., Золотовская О.В., Максименко Ю.А., Свирина С.А. // Наука и практика – 2023: материалы Всерос. междисциплинар. науч. конф. (Астрахань, 13–17 нояб. 2023 г.). Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2024. С. 253–254.
- 18 Пат. 204882 Российская Федерация, МПК B01D 11/02. Ультразвуковой экстрактор / Алексеев Г.В., Шанин В.А., Егорова О.А. и др.; заявитель Нац. исслед. ун-т ИТМО. № 2021106317; заявл. 11.03.2021; опубл. 16.06.2021.
- 19 Пат. 2796825 Российская Федерация, МПК B01D 11/02, B06B 1/06. Ультразвуковой экстрактор / Овсянников В.Ю., Дранникова Н.Е., Макеева Е.О.; заявитель Воронеж. гос. ун-т инженер. технологий. № 2022127334; заявл. 21.10.2022; опубл. 29.05.2023.
- 20 Пат. 2844558 Российская Федерация, МПК C09B 61/00. Способ получения антоцианового красителя из черного риса / Золотовская О.В., Максименко Ю.А., Неповинных Н.В. и др.; заявитель Астрахан. гос. техн. ун-т. № ...; заявл. 18.03.2025; опубл. 04.08.2025.
- 21 Пат. 225428 Российская Федерация, МПК B01D 11/02, F26B 5/02. Ультразвуковой экстрактор / Коннова О.И., Золотовская О.В., Свирина С.А. и др.; заявитель Астрахан. гос. техн. ун-т. № 2024107398; заявл. 21.03.2024; опубл. 22.04.2024.

- 22 Пат. 231856 Российская Федерация, МПК B01D 11/02. Ультразвуковой экстрактор / Коннова О.И., Мемедейкина Н.П., Теличкина Э.Р. и др.; заявитель Астрахан. гос. техн. ун-т. № ...; заявл. 11.10.2024; опубл. 13.02.2025.
- 23 Пат. 234730 Российская Федерация, МПК F26B 15/04, F26B 3/18. Выпарной аппарат для пенящихся материалов / Варданян М.А., Соколова Е.В., Мемедейкина Н.П. и др.; заявитель Астрахан. гос. техн. ун-т. № ...; заявл. 14.03.2025; опубл. 06.06.2025.
- 24 Пат. 225345 Российская Федерация, МПК F26B 17/10, F26B 3/12, F26B 3/30. Распылительная сушилка / Максименко Ю.А., Алексанян И.Ю., Свирина С.А. и др.; заявитель Астрахан. гос. техн. ун-т. № 2024105484; заявл. 04.03.2024; опубл. 17.04.2024.
- 25 Lu W., Shi Y., Wang R. et al. Antioxidant activity and healthy benefits of natural pigments in fruits: A review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. V. 22. № 9. P. 4945. doi: 10.3390/ijms22094945
- 26 Fernández-López J.A., Fernández-Lledó V., Angosto J.M. New insights into red plant pigments: more than just natural colorants // *RSC Advances*. 2020. V. 10. № 41. P. 24669–24682. doi: 10.1039/D0RA03514A
- 27 Singh T. et al. Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023. V. 12. P. 100628. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100628
- 28 Mohammad Azmin S.N.H. et al. A review on recent advances on natural plant pigments in foods: Functions, extraction, importance and challenges // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2022. V. 194. № 10. P. 4655–4672. doi: 10.1007/s12010-022-04050-z

References

- 1 Panasyuk A.L., Kuzmina E.I., Egorova O.S. Production and application of natural anthocyanin food colorants (review). *Food Industry*. 2021. no. 10. pp. 13–19. (in Russian).
- 2 Albuquerque B.R., Oliveira M.B.P.P., Barros L., Ferreira I.C.F.R. Could fruits be a reliable source of food colorants? Pros and cons of these natural additives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. vol. 61. no. 5. pp. 805–835. doi: 10.1080/10408398.2020.1746904.
- 3 Kaisina D.A. Anthocyanin natural pigments – an alternative to artificial food colorants. *Multipolar World in the Focus of New Reality*. 2023. pp. 90–92. (in Russian).
- 4 Bolotov V.M., Komarova E.V., Savvin P.N. Technology of production, properties and application of food colorants based on natural anthocyanin and carotenoid compounds. *Bulletin of Tambov State Technical University*. 2018. vol. 24. no. 1. pp. 124–133. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.124-133 (in Russian).
- 5 Technology of obtaining natural anthocyanin dyes and their use in functional food products. Deineka V.I., Myachikova N.I., Deineka L.A., Blinova I.P. In: *Food Technologies of the Future: Innovations in the Production and Processing of Agricultural Products: collection of articles of the II International Scientific-Practical Conference (Saratov, March 24–25, 2021)*. / Ed. by O.M. Popova, N.V. Nepovinnikh, V.A. Bukhovets. Saratov: Center for Social Agroinnovations of Saratov State Agrarian University, 2021. pp. 251–255. (in Russian).
- 6 Swami S.B., Ghgare S.N., Swami S.S. et al. Natural pigments from plant sources: A review. *The Pharma Innovation Journal*. 2020. vol. 9. no. 10. pp. 566–574.
- 7 Goncharova Yu.K., Bushman N.Yu., Bruyako V.N. Black-grained rice as a source of antioxidants in the nutrition of Russians. *New and Non-traditional Plants and Prospects for Their Use*. 2016. no. 12. pp. 108–110. (in Russian).
- 8 Yashin Ya.I., Ryzhnev V.Yu., Yashin A.Ya., Chernousova N.I. Natural antioxidants. Content in food products and their effect on human health and aging. *Translit*, 2009. pp. 126–130. (in Russian).
- 9 Silva Fernandes T., Dias Ferreira G.M., da Silva G.A., Boggione Santos I.J., Barbosa Mageste A. Extraction of anthocyanins from the byproduct and wastes of black rice production by ecofriendly method. *Separation Science and Technology*. 2021. vol. 57. no. 9. pp. 1442–1453. doi: 10.1080/01496395.2021.1992437.
- 10 Leonarski E., Kuasnei M., Cesca K., Oliveira D. de, Zielinski A.A.F. Black rice and its by-products: anthocyanin-rich extracts and their biological potential. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. vol. 64. no. 25. pp. 9261–9279. doi: 10.1080/10408398.2023.2211169.
- 11 Koltsov V.A., Bocharovov V.A. Study of anthocyanin changes during ultrasonic extraction of chokeberry. *Science and Education*. 2021. vol. 4. no. 4. [Note: Please insert the specific page range once available]. (in Russian).
- 12 Chesnokova N.Yu., Kuznetsova A.A., Kushnarenko L.V. Influence of extraction conditions on anthocyanin extraction from berry raw materials. *Bulletin of KrasGAU*. 2023. no. 8 (197). pp. 218–226. doi: 10.36718/1819-4036-2023-8-218-226 (in Russian).
- 13 Kurkin V.A., Shaikhutdinov I.K., Pravdivtseva O.E. et al. Development of approaches to standardization of fresh fruits of *Crataegus submollis* Sarg. *Problems of Biological Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2020. vol. 23. no. 3. pp. 37–42. doi: 10.29296/25877313-2020-03-07.
- 14 Chesnokova N.Yu., Ashikhmin E.A. Effect of ascorbic acid on the intensity of extraction of anthocyanin pigment from black currant berries and its stability. *Food Industry*. 2020. vol. 5. no. 4. pp. 68–73. doi: 10.29141/2500-1922-2020-5-4-10 (in Russian).
- 15 Daudova T.N., Daudova L.A. Influence of electromagnetic field on intensification of anthocyanin extraction process from sloe and wild cherry fruits. *Scientific Research: Results and Prospects*. 2021. vol. 2. no. 3. pp. 29–35. doi: 10.21822/2713-220X-2021-2-3-29-35 (in Russian).
- 16 Gerasimov M.A., Koshechikina A.S. Modern methods of extraction and purification of anthocyanins. *Problems of Nutrition*. 2023. vol. 92. no. S5 (549). pp. 190–191. doi: 10.33029/0042-8833-2023-92-5s-234 (in Russian).
- 17 Ultrasonic extractor for plant raw materials. Konnova O.I., Zolotovskaya O.V., Maksimenko Yu.A., Svirina S.A. In: *Science and Practice – 2023: Proceedings of the All-Russian Interdisciplinary Scientific Conference (Astrakhan, November 13–17, 2023)*. Astrakhan: Astrakhan State Technical University, 2024. pp. 253–254. (in Russian).
- 18 Patent no. 204882, Russian Federation, IPC B01D 11/02. Ultrasonic extractor. Alekseev G.V., Shanin V.A., Egorova O.A. et al.; applicant National Research University ITMO. no. 2021106317; filed 11.03.2021; publ. 16.06.2021. (in Russian).

19 Patent no. 2796825, Russian Federation, IPC B01D 11/02, B06B 1/06. Ultrasonic extractor. Ovsyannikov V.Yu., Drannikova N.E., Makeeva E.O.; applicant Voronezh State University of Engineering Technologies. no. 2022127334; filed 21.10.2022; publ. 29.05.2023. (in Russian).

20 Patent no. 2844558, Russian Federation, IPC C09B 61/00. Method for producing anthocyanin dye from black rice. Zolotovskaya O.V., Maksimenko Yu.A., Nepovinnikh N.V. et al.; applicant Astrakhan State Technical University. no. [Note: Please insert the application number once available]; filed 18.03.2025; publ. 04.08.2025. (in Russian).

21 Patent no. 225428, Russian Federation, IPC B01D 11/02, F26B 5/02. Ultrasonic extractor. Konnova O.I., Zolotovskaya O.V., Svirina S.A. et al.; applicant Astrakhan State Technical University. no. 2024107398; filed 21.03.2024; publ. 22.04.2024. (in Russian).

22 Patent no. 231856, Russian Federation, IPC B01D 11/02. Ultrasonic extractor. Konnova O.I., Memedeikina N.P., Telichkina E.R. et al.; applicant Astrakhan State Technical University. no. [Note: Please insert the application number once available]; filed 11.10.2024; publ. 13.02.2025. (in Russian).

23 Patent no. 234730, Russian Federation, IPC F26B 15/04, F26B 3/18. Evaporator for foaming materials. Vardanyan M.A., Sokolova E.V., Memedeikina N.P. et al.; applicant Astrakhan State Technical University. no. [Note: Please insert the application number once available]; filed 14.03.2025; publ. 06.06.2025. (in Russian).

24 Patent no. 225345, Russian Federation, IPC F26B 17/10, F26B 3/12, F26B 3/30. Spray dryer. Maksimenko Yu.A., Aleksanyan I.Yu., Svirina S.A. et al.; applicant Astrakhan State Technical University. no. 2024105484; filed 04.03.2024; publ. 17.04.2024. (in Russian).

25 Lu W., Shi Y., Wang R. et al. Antioxidant activity and healthy benefits of natural pigments in fruits: A review. International Journal of Molecular Sciences. 2021. vol. 22. no. 9. article 4945. doi: 10.3390/ijms22094945.

26 Fernández-López J.A., Fernández-Lledó V., Angosto J.M. New insights into red plant pigments: more than just natural colorants. RSC Advances. 2020. vol. 10. no. 41. pp. 24669–24682. doi: 10.1039/D0RA03514A.

27 Singh T. et al. Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing. Journal of Agriculture and Food Research. 2023. vol. 12. article 100628. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100628.

28 Mohammad Azmin S.N.H. et al. A review on recent advances on natural plant pigments in foods: Functions, extraction, importance and challenges. Applied Biochemistry and Biotechnology. 2022. vol. 194. no. 10. pp. 4655–4672. doi: 10.1007/s12010-022-04050-z.

Сведения об авторах

Ольга В. Золотовская ассистент, кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, olazoloto@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1758-0593>

Ольга И. Коннова ассистент, кафедра технологии товаров и товароведения, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, okonnova88@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-1691-1780>

Наталья П. Мемедейкина к.т.н., доцент, кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, zolinatashka@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-1691-1780>

Светлана А. Свирина к.т.н., доцент, кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, svetlanasv97@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0002-1646-2421>

Юрий А. Максименко д.т.н., профессор, кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, amxs1@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7973-1903>

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

Olga V. Zolotovskaya assistant, Department of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, olazoloto@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1758-0593>

Olga I. Konnova assistant, Department of Technology of Goods and Commodity Science, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, okonnova88@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-1691-1780>

Natalia P. Memedeikina Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, zolinatashka@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-1691-1780>

Svetlana A. Svirina Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, svetlanasv97@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0002-1646-2421>

Yuri A. Maksimenko Степень, должность, Department of Technological Machines and Equipment, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, amxs1@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7973-1903>

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 01/10/2025	После редакции 28/10/2025	Принята в печать 10/11/2025
Received 01/10/2025	Accepted in revised 28/10/2025	Accepted 10/11/2025

Методологический подход в исследованиях структурных, электрохимических и транспортных характеристик электробаромембранной очистки промышленных растворов

Дмитрий Н. Коновалов	¹	kdn1979dom@mail.ru	 0000-0002-9366-8661
Сергей И. Лазарев	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0003-0746-5161
Никита С. Наместников	¹	namestnikov-nikita@mail.ru	
Анна Г. Сысоева	¹	asus1301201@gmail.com	
Константин К. Полянский	^{2,3}	kaf-kit@vfreu.ru	 0000-0002-7333-4816

¹ Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия

² Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия

³ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Разработан комплексный методологический подход для исследования структурных, электрохимических и транспортных характеристик процессов электробаромембранной очистки промышленных растворов. Подход структурирован в виде многоуровневой иерархической схемы, охватывающей все этапы научного исследования: от аналитического обзора и выбора объектов до математического моделирования, инженерного расчета и оценки экономической эффективности. Методология обеспечивает системность исследований, повышая достоверность и воспроизводимость результатов. В качестве ключевых объектов экспериментальных исследований были определены модельные и реальные промышленные растворы из трех экологически значимых отраслей: производства минеральных удобрений (растворы солей аммония, калия), получения биотоплива (водно-эфирные смеси) и гальванических покрытий (многокомпонентные растворы, содержащие ионы тяжелых металлов, аммония, сульфатов и фосфатов). Исследования проводились с использованием ряда промышленных пористых полимерных мембран (нано-, ультра- и микрофильтрационных) от отечественных производителей. В работе представлены и проанализированы экспериментальные графические зависимости, иллюстрирующие влияние процесса на характеристики мембран и эффективность разделения. Методами рентгеноструктурного анализа, термогравиметрии и ДСК изучены структурные изменения микрофильтрационной мембраны после контакта с компонентами промывочных вод производства биотоплива. Для процессов электронанофильтрации модельных растворов минеральных удобрений получены вольт-амперные характеристики, зависимости сопротивления и электропроводности мембранных систем от напряжения и трансмембранного давления. В ходе очистки реального гальванического раствора исследованы транспортные характеристики: установлены зависимости коэффициента задержания ионов (Zn^{2+} , PO_4^{3-}) и удельного потока через мембраны от плотности электрического тока. Полученные данные служат основой для математического моделирования, оптимизации режимов работы и инженерного расчета электробаромембранных аппаратов. Разработанный методологический подход и полученные результаты вносят вклад в развитие научных основ ресурсосберегающих и экологических технологий очистки промышленных стоков, обеспечивающих возврат ценных компонентов в производственный цикл.

Ключевые слова: Методология, экспериментальные исследования, характеристики, очистка, разделение, раствор, мембрана.

Methodological approach to the study of structural, electrochemical and transport characteristics of electrobaromembrane purification of industrial solutions

Dmitry N. Konovalov	¹	kdn1979dom@mail.ru	 0000-0002-9366-8661
Sergey I. Lazarev	¹	sergey.lazarev.1962@mail.ru	 0000-0003-0746-5161
Nikita S. Namestnikov	¹	namestnikov-nikita@mail.ru	
Anna G. Sysoeva	¹	asus1301201@gmail.com	
Konstantin K. Polyansky	^{2,3}	kaf-kit@vfreu.ru	 0000-0002-7333-4816

¹ Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia

² Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia

³ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Для цитирования

Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Наместников Н.С., Сысоева А.Г., Полянский К.К. Методологический подход в исследованиях структурных, электрохимических и транспортных характеристик электробаромембранной очистки промышленных растворов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 200–211. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-200-211

For citation

Konovalov D.N., Lazarev S.I., Namestnikov N.S., Sysoeva A.G., Polyansky K.K. Methodological approach to the study of structural, electrochemical and transport characteristics of electrobaromembrane purification of industrial solutions. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 200–211. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-200-211

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

Abstract. A comprehensive methodological approach has been developed for studying the structural, electrochemical, and transport characteristics of industrial solution purification processes using electrobaromembrane technology. The approach is structured as a multi-level hierarchical framework encompassing all stages of the research: from an analytical review and selection of objects to mathematical modeling, engineering calculations, and cost-effectiveness assessment. The methodology ensures a systematic approach to research, increasing the reliability and reproducibility of results. Model and real industrial solutions from three environmentally significant industries were identified as key objects of experimental research: mineral fertilizer production (ammonium and potassium salt solutions), biofuel production (water-ether mixtures), and electroplating (multicomponent solutions containing ions of heavy metals, ammonium, sulfates, and phosphates). The research was conducted using a range of industrial porous polymer membranes (nano-, ultra-, and microfiltration) from domestic manufacturers. The paper presents and analyzes experimental graphical dependencies illustrating the effect of the process on membrane characteristics and separation efficiency. X-ray diffraction, thermogravimetry, and differential scanning calorimetry (DSC) were used to study structural changes in a microfiltration membrane after exposure to components of biofuel production washwater. Current-voltage characteristics, as well as the dependences of membrane system resistance and conductivity on voltage and transmembrane pressure, were obtained for the electron-nanofiltration of model mineral fertilizer solutions. Transport characteristics were studied during the purification of a real galvanic solution: the dependences of the ion retention coefficient (Zn^{2+} , PO_4^{3-}) and the specific membrane flux on electric current density were determined. The obtained data serve as the basis for mathematical modeling, optimization of operating modes, and engineering calculations for electromembrane devices. The developed methodological approach and the obtained results contribute to the development of scientific foundations for resource-saving and environmentally friendly technologies for industrial wastewater treatment, ensuring the return of valuable components to the production cycle.

Keywords: Methodology, experimental studies, characteristics, purification, separation, solution, membrane.

Введение

Современные химические, гальванические и производства минеральных удобрений сопровождаются большим объемом технологических растворов и сточных вод, которые необходимо перерабатывать и утилизировать. В настоящее время в Российской Федерации только по производству гальванопокрытий существует около 1000 цехов. В Российском Федеральном классификаторе 444 вида токсичных отходов 1–2 классов опасности, в том числе 95 неорганических, 217 органических (растворители, полимеры, нефтепродукты), а также смешанных (органических и неорганических) отходов. С каждым годом требования контрольных органов РФ к очистке, разделению и утилизации технологических растворов и сточных вод для вышеперечисленных производств ужесточаются по предельно допустимым концентрациям, особенно по концентрациям тяжелых металлов.

Подлежащие очистке технологические растворы и сточные воды химических, гальванических и производств минеральных удобрений необходимо утилизировать по безотходной или малоотходной технологии, предпочтительно с возвратом компонентов раствора в процесс производства. Это приведет к ресурсо- и энергосбережению и позволит снизить экологическую нагрузку на водоемы Российской Федерации в целях сохранения флоры и фауны.

Для очистки, разделения и утилизации технологических растворов и сточных вод требуется применение современных методов, обладающих малой энерго- и металлоемкостью и экологичностью, то есть способностью метода разделения возвращать ценные компоненты раствора в процесс производства. К таким методам разделения относятся современные методы мембранной технологии, очистки и концентрирования технологических растворов и дифференцированного извлечения ионов из них, где затраты энергии сведены к минимальным,

используемым только на разрыв межмолекулярных связей. Для эффективного применения методов мембранной технологии требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований по разработке методологии и методик исследования, изучению электрохимических и структурных характеристик полупроницаемых мембран, кинетики процесса, математическому моделированию, а также по созданию современного конструктивно-технологического оформления процессов с использованием мембранной техники.

На предприятиях химических, гальванических и производств минеральных удобрений Центрального Черноземья остро стоит задача по разработке и внедрению технологий с применением мембран по очистке и концентрированию промышленных растворов и сточных вод, которая в настоящее время является востребованной и актуальной, так как существует целенаправленная программа по модернизации устаревающего очистного оборудования. Поэтому фундаментом исследования настоящей работы является развитие научных и технологических основ электромембранных методов очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий.

Большой вклад в развитие теоретических основ по электромембранной технологии внесли отечественные и зарубежные ученые, такие как: Н.А. Платэ, Ю.И. Дытнерский, М. Мулдер, С.Т. Хванг, К. Каммермейер, В.А. Шапошник, В.И. Заболоцкий, В.И. Васильева, А.Г. Первов, К.К. Полянский, В.В. Котов, И.Т. Кретов, В.М. Седелкин, С.В. Шахов, С.А. Титов, А.В. Клинов, А.Ф. Дресвянников и др.

Цель работы – разработка методологии проведения научного исследования, представленной в виде многоуровневой взаимосвязанной структурно-иерархической схемы, основными этапами которой являются методики исследования

электрохимических, структурных, транспортных (кинетических) характеристик, математическое моделирование, методики оптимизации и инженерного расчета, разработка аппаратурно-технологического оформления и практическое применение в очистке промышленных растворов, экономическая оценка эффективности.

Материалы и методы

Достоверность и надежность научных работ невозможно обеспечить без разработки методологии исследований и расчета электро-мембранных процессов очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий.

Поставленные цель и задачи исследования, а также подбор, анализ и интерпретация данных основаны на подходах, принципах и методах корректно разработанной методологии, позволяющей снизить или исключить возможные неточности и отклонения данных. Методология для исследователя является обоснованным

и структурированным рамочным инструментарием, позволяющим обеспечить высокую достоверность и надежность точности полученных результатов.

На рисунке 1 представлена разработанная систематизированная схема методологии исследования, определяющая структуру, содержание и взаимосвязь каждого этапа исследования. На каждом этапе методологии осуществляется определенный вклад в общий контекст исследования, который имеет свои цели и задачи. Четко структурированная методология позволяет обеспечить полноту и поэтапность исследования с подобранными методами и инструментами, а также получить достоверные результаты и сформулировать выводы в соответствии с целью и задачами исследования.

Исходя из вышеизложенного, разработанная систематизированная методология исследования – это важнейший инструмент для достижения поставленных цели и задач, обеспечивающий на высоком уровне качество, надежность и достоверность исследования.

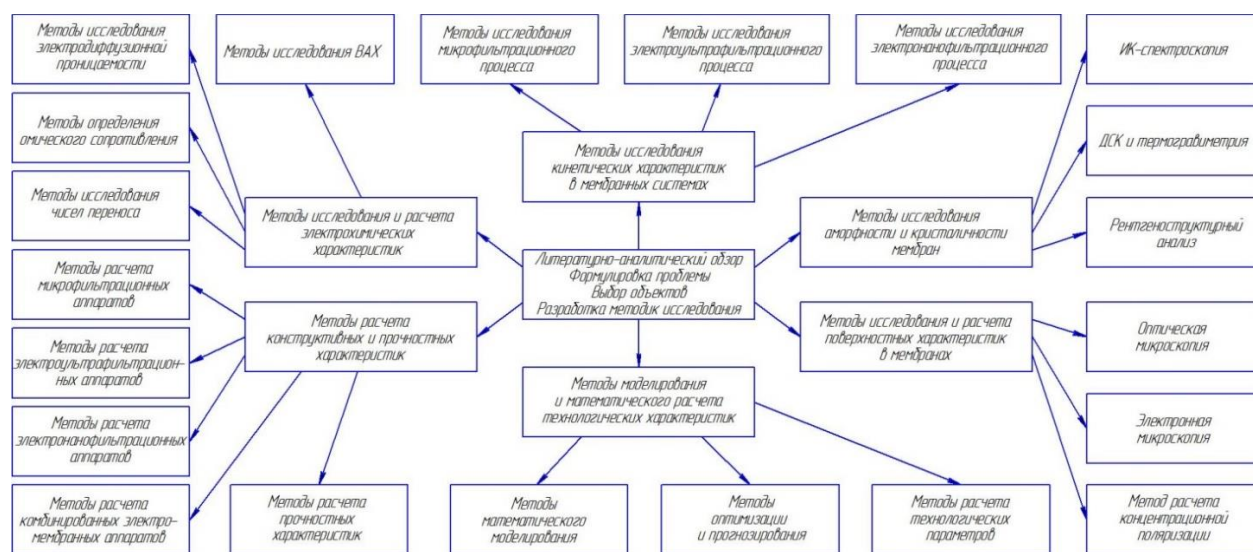


Рисунок 1. Методология исследования и расчета электромембранных процессов очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий

Figure 1. Methodology for research and calculation of electromembrane processes for purification and concentration of industrial solutions in the production of mineral fertilizers, biofuels and electroplating

I эман.

На первом этапе проводится литературно-аналитический обзор по тематике исследования, формулировка научной проблемы, выбор объектов и разработка методик исследования. Начальной и основной частью этапа является обобщенный критический анализ научных работ (публикации, научные статьи, годовые отчеты и т. п.), позволяющий ознакомиться, изучить, проанализировать и сформулировать проблему исследования в данной области научных интересов.

На основании литературно-аналитического обзора также производится выбор объектов исследования, являющийся важным аспектом первого этапа. В качестве объектов исследования могут быть подобраны модельные (содержащие в своем составе определенные компоненты) и промышленные (многокомпонентные) растворы, типы мембран, связанные с поставленной целью работы и подвергнующиеся детальному изучению.

Подбор и разработка методик исследования также являются неотъемлемой частью первого

этапа, включающей в себя методы исследования и расчета электрохимических характеристик, структурных характеристик мембран, кинетических характеристик в мембранных системах, а также методы моделирования и расчета конструктивных, прочностных и технологических параметров электромембранных аппаратов.

Общая валидность и надежность исследования, корректный подбор исследуемых объектов, экспериментальных методов и разработка методик позволяют на первом этапе заложить прочный фундамент для дальнейших этапов методологии исследования с достижением высокой точности научных результатов и достоверности полученных данных.

II этап.

На втором этапе проводится выбор методов исследования и расчета электрохимических характеристик мембран, такие как вольт-амперные характеристики (ВАХ), электродиффузионная проницаемость, определение омического сопротивления и чисел переноса мембран.

Вольтамперные характеристики позволяют определить зависимость плотности тока от напряжения при исследовании электрохимических характеристик мембран. Проанализировав их, можно определить диапазон напряжения, при котором будут достигнуты наилучшие показатели электромембранного процесса разделения. На основании ВАХ рассчитываются омическое сопротивление и электропроводность мембранной системы, которые также являются основными электрохимическими характеристиками мембран.

Методы исследования электродиффузионной проницаемости и расчет чисел переноса позволяют определить миграцию компонентов через мембрану, влияющую непосредственно на качество и эффективность электромембранного процесса. Второй этап позволяет оценить электрические свойства мембран, а также их потенциал для дальнейшего использования в электромембранных процессах, являясь неотъемлемой частью дальнейшей детальной проработки.

III этап.

Третий этап посвящен методам исследования структурных характеристик мембран, таких как аморфность и кристалличность, а также расчету поверхностных характеристик мембран. Для достижения поставленной цели исследования структурных характеристик мембран использованы методы ИК-спектроскопии (позволяет определить перестройку молекул активного слоя мембран), ДСК (позволяет определить фазовые переходы в мембране и их термодинамические характеристики) и термогравиметрии (позволяет измерить изменение массы мембраны в зависимости от температуры и определить

термостабильность и термоокислительную стабильность материала), рентгеноструктурного анализа (позволяет определить структуру мембраны и выявить наличие дефектов в кристаллической решетке), оптической и электронной микроскопии (позволяют определить изменения в активном слое, а также подложке мембран при действии движущей силы электромембранного процесса), расчет концентрационной поляризации.

Всесторонний подход к исследованию структуры мембран позволяет определить важнейшие параметры и свойства материала активного слоя, которые напрямую влияют на дальнейшие исследования кинетических характеристик, а также моделирование и модернизацию технологий, повышающих производительность электромембранного процесса.

Третий этап является экваторным, но также немаловажным для последующих этапов экспериментальных исследований.

IV этап.

Четвертый этап посвящен методам исследования кинетических характеристик мембранных систем, таких как электронанофильтрация, электроультрафильтрация, микрофильтрация, фильтрация. На этом этапе проводятся подробные исследования по определению удельного выходного потока и коэффициента задержания в процессе электромембранного разделения.

Полученные на предыдущих этапах результаты используются для изучения кинетических характеристик мембран и также являются фундаментом для последующего этапа. Удельный выходной поток позволяет оценить производительность мембраны, а коэффициент задержания – качество процесса разделения и концентрирования растворов.

Результаты второго, третьего и четвертого этапов важны для последующих методов моделирования и математического расчета заключительного этапа методологии.

V этап.

Пятый этап основан на методах моделирования и математического расчета конструктивных, прочностных и технологических характеристик электромембранных аппаратов. Моделирование проводится на основе поэтапного решения математической модели электронанофильтрационного разделения путем аналитического решения уравнений конвективной диффузии, уравнения Навье–Стокса и уравнения неразрывности потока с применением полярной системы координат при начальных и граничных условиях. Полученные результаты работы по моделированию процесса электронанофильтрации могут быть использованы специалистами

в области мембранных технологий при разработке и проектировании мембранных установок и технологических схем очистки сточных вод.

При практическом применении математическая модель предоставляет возможность перейти к инженерной методике расчета аппаратов, включающей в себя методы расчета конструктивных и прочностных характеристик аппаратов различных конструкций.

Также пятый этап включает метод оптимизации и прогнозирования удельного выходного потока с ограничениями по току, электроосмотической проницаемости, коэффициенту задержания, выходу по току при постоянном трансмембранном давлении. На основании аналитических и эмпирических исследований получены инженерные формулы, позволяющие в широком диапазоне изменений плотности электрического тока, электрической проницаемости, трансмембранного давления и коэффициентов задержания определить удельный выходной поток для электромембранных аппаратов и выбрать методы расчета их технологических параметров.

Корректно полученные экспериментальные данные из предыдущих этапов позволяют адекватно смоделировать мембранный процесс и провести оптимизацию и прогнозирование удельного выходного потока, а также модернизировать конструкции мембранных аппаратов, используемых для очистки растворов.

На основании разработанных конструкций аппаратов и ранее проведенных исследований модернизируются технологические схемы очистки с применением высокоэффективных электро-мембранных и мембранных методов, в результате чего получена экономическая эффективность, являющаяся логическим завершением как пятого этапа методологии, так и всего научного исследования с предоставлением новых научных и технологических основ электромембранных процессов очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий.

В процессе производства минеральных удобрений образуются технологические растворы и сточные воды, которые содержат в своем составе ценные компоненты, например при производстве нитрата аммония побочным продуктом является конденсат сокового пара, содержащий ионы NH_4^+ и NO_3^- , представляющие большой интерес в целях обеспечения возврата в основной производственный цикл и экономии материальных ресурсов.

В качестве объектов экспериментальных исследований были приняты водные растворы хлорида аммония, сульфата калия, нитрата аммония, нитрата аммония и сульфата калия, сульфата цинка, характеристики и показатели которых представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики и показатели исследуемых водных растворов

Table 1.

Main characteristics and indicators of the studied aqueous solutions

Раствор Solution	Цвет Color	pH	c , кг/м ³ c , kg/m ³
водный раствор хлорида аммония (NH_4Cl) aqueous solution of ammonium chloride (NH_4Cl)	прозрачный transparent	8,0	0,5
			1,0
			2,0
водный раствор сульфата калия (K_2SO_4) aqueous solution of potassium sulfate (K_2SO_4)		8,0	0,2
			0,5
			0,8
водный раствор нитрата аммония (NH_4NO_3) aqueous solution of ammonium nitrate (NH_4NO_3)		7,0	0,2
			0,4
			0,8
водный раствор нитрата аммония и сульфата калия ($\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{K}_2\text{SO}_4$) an aqueous solution of ammonium nitrate and potassium sulfate ($\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{K}_2\text{SO}_4$)		7,0	0,2/0,04
			0,4/0,04
			0,8/0,04
водный раствор сульфата цинка (ZnSO_4) aqueous solution of zinc sulfate (ZnSO_4)		6,0	0,4

После выполнения электрохимических операций нанесения защитных покрытий (цинкование, хромирование и др.) и проведения последующих процессов обработки отработанных электролитов, образуемые технологические растворы и сточные воды содержат несколько

важных для исследования и производства катионов и анионов (NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}^{2+}$, Zn^{2+} , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Ni^{2+} и др.).

Еще одним объектом экспериментальных исследований стала смесь метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды, образующаяся в процессе производства биотоплива, таблица 2.

В качестве объекта экспериментального исследования также выбран технологический раствор гальванического производства (АО «ТАГАТ»

им. С.И. Лившица, г. Тамбов), характеристики и показатели которого приведены в таблице 3.

Таблица 2.

Основные характеристики и показатели исследуемой смеси метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды

Table 2.

Main characteristics and indicators of the studied mixture of vegetable oil methyl ester (E-phase) and water

Раствор Solution	Цвет Color	pH	Отношение, % Attitude, %
Смесь метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды A mixture of vegetable oil methyl ester (E-phase) and water	Светло-молочно-коричневый Light milky brown	9,5	50:50 52:48

Таблица 3.

Основные характеристики и показатели технологического раствора АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица, г. Тамбов

Table 3.

Main characteristics and indicators of the technological solution of JSC "TAGAT" named after S.I. Livshits, Tambov

Раствор Solution	Цвет Color	pH	Ион Ion	Концентрация, мг/дм ³ Concentration, mg/dm ³
Промышленный раствор АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица, г. Тамбов Industrial solution JSC "TAGAT" named after S.I. Livshits, Tambov	Прозрачно-молочный Transparent milky	8,5	NH ₄ ⁺	1,358
			Fe _{общ}	0,068
			Zn ²⁺	0,340
			PO ₄ ³⁻	0,580
			SO ₄ ²⁻	50,900
			Тяжелые металлы (Ni ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Cr ³⁺) Heavy metals (Ni ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Cr ³⁺)	0,022

Наибольший интерес в промышленном растворе АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица представляют исследования ионов NH₄⁺, Zn²⁺, PO₄³⁻, SO₄²⁻ и др., так как эти компоненты являются малоисследованными, особенно при переносе их через нанофильтрационные полупроницаемые мембраны. Другие ионы (Fe_{общ}, Ni²⁺, Cu²⁺, Cr⁶⁺, Cr³⁺ и др.), встречающиеся в технологических растворах и сточных водах гальванических производств, достаточно подробно исследованы в работах [1–4].

Другими объектами экспериментальных исследований являлись пористые полимерные промышленные нанофильтрационные (таблица 4), ультрафильтрационные (таблица 5) и микрофильтрационные (таблица 6) мембраны и предварительный фильтр (таблица 7) производителей ЗАО НТЦ «Владипор» [5] и ООО НПП «Техно-фильтр» [6], г. Владимир.

Таблица 4.

Характеристики нанофильтрационных мембран [5]

Table 4.

Characteristics of nanofiltration membranes [5]

Тип мембраны Membrane type	Рабочие характеристики мембран Performance characteristics of membranes				
	Рабочее давление, МПа Working pressure, MPa	Минимальная производительность по воде, при T = 298 K, м ³ /(м ² ·с) Minimum water capacity at T = 298 K, m ³ /(m ² s)	Коэффициент задержания по 0,15 % NaCl, не менее Retention coefficient for 0,15 % NaCl, not less than	Максимальная температура, K Maximum temperature, K	Рабочий диапазон pH Operating pH range
АМН-П AMN-P	1,6	1,66·10 ⁻⁵	–	318	3...8
ОФАМ-К OFAM-K	3,0	2,22·10 ⁻⁵	0,95	323	2...12
ОПМН-П OPMN-P	1,6	2,77·10 ⁻⁵	0,55		

Нанофильтрационная мембрана типа АМН-П представляет собой пористую полимерную пленку на основе эфиров целлюлозы [5].

Обратноосмотическая композитная мембрана среднего давления типа ОФАМ-К состоит из активного слоя, являющегося продуктом поликонденсации ароматического диамина (м-фенилендиамина) и производных ароматических дикарбоновых кислот (изофталевой кислоты),

и пористой подложки из полипропилена (ПП) или тканого лавсана; структура – капиллярно-пальчиковая» [5, 7].

Нанофильтрационная композитная полимерная пористая пленка типа ОПМН-П состоит из селективного слоя на полиамидной основе и пористой подложки из нетканого полипропилена; структура – вакуольная с губчатой прослойкой» [5, 7].

Таблица 5.

Характеристики ультрафильтрационных мембран [5]

Table 5.

Characteristics of ultrafiltration membranes [5]

Тип мембраны Membrane type	Рабочие характеристики мембран Performance characteristics of membranes				
	Рабочее давление P , МПа Working pressure P , MPa	Удельный поток растворителя J , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ Specific flow of solvent J , $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Коэффициент задержания по альбумину 67000Д Albumin retention coefficient 67000D	Максимальная температура, К Maximum temperature, K	Рабочий диапазон pH Operating pH range
УАМ-50 UAM-50	0,15	$3,33 \cdot 10^{-6}$	0,97	323	3...8
УАМ-100 UAM-100		$1,67 \cdot 10^{-6}$			
УПМ-К UPM-K	0,1	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,98	373	2...12
УПМ-100 UPM-100		$2,33 \cdot 10^{-4}$	0,97		

Мембрана типа УАМ представляет собой пористую полимерную полупрозрачную или белого цвета пленку на основе ацетатов целлюлозы на подложках: нетканый полипропилен, лавсан [5].

Мембрана типа УПМ представляет собой пористую полимерную пленку на основе ароматического полисульфонамида «Сульфон-4Т» на подложках: нетканый лавсан и полипропилен [5].

Таблица 6.

Характеристики микрофильтрационных мембран [5, 6]

Table 6.

Characteristics of microfiltration membranes [5, 6]

Тип мембраны Membrane type	Рабочие характеристики мембран Performance characteristics of membranes				
	Средний диаметр пор, мкм Average pore diameter, μm	Рабочее давление, МПа Working pressure, MPa	Производительность J , $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ Productivity J , $\text{dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	Максимальная температура, К Maximum temperature, K	Рабочий диапазон pH Operating pH range
МФФК-3 MFFK-3	0,45	0,56	7500 (по этанолу, при $P = 0,05$ МПа) 7500 (for ethanol, at $P = 0,05$ MPa)	353	1...13
МФФК-3Г MFFK-3G		0,50	7000 (по этанолу, при $P = 0,05$ МПа) 7000 (for ethanol, at $P = 0,05$ MPa)		
МФФК-2Г MFFK-2G	0,25	0,26	3200 (по этанолу, при $P = 0,05$ МПа) 3200 (for ethanol, at $P = 0,05$ MPa)	343	3...14
ММК – 0,45 ММК – 0,45	0,45	0,50	21000 (по очищенной воде, при $P = 0,1$ МПа) 21000 (for purified water, at $P = 0,1$ MPa)		

Микрофильтрационная фторопластовая композиционная гидрофильная и гидрофобная мембрана типа МФФК представляет собой пористый пленочный материал на основе фторопласта Ф42Л на подложке из нетканых материалов (полипропилен, лавсан) [5].

Микропористая капроновая гидрофильная мембрана марки ММК представляет собой пористую пленку белого цвета на основе полиамида [6].

Таблица 7.

Характеристики предварительного фильтра ПП-190 [6]

Table 7.

Characteristics of the pre-filter PP-190 [6]

Эффективность удержания частиц, мкм Particle retention efficiency, μm		Максимальный перепад давления, МПа Maximum pressure drop, MPa	Начальная производительность по дистиллированной воде, при $P = 0,05$ МПа, $\text{см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ Initial capacity for distilled water, at $P = 0,05$ MPa, $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$	Максимальная температура, К Maximum temperature, K	Рабочий диапазон pH Operating pH range
не менее 98 % at least 98 %	не менее 95 % at least 95 %				
3	2	0,5 при 293 К; 0,2 при 353 К 0,5 at 293 K; 0,2 at 353 K	Не менее 400 Not less than 400	363	2...13

Фильтрационная мембрана ПП представляет собой пористую пленку из полипропиленового нетканого материала без подложки [6].

Методика подготовки мембран.

Методика предварительной подготовки полупроницаемых мембран для проведения экспериментальных исследований заключалась в следующем:

– визуально определялось место на полотне исследуемой мембраны без наличия дефектов (смятий, сжатий, трещин и др.), проводилась

обрезка необходимой геометрической формы и размера;

– мембрана замачивалась в растворе дистиллированной воды в течение суток;

– мембрана, в зависимости от необходимости расположения на конкретном электроде (анод или катод), предварительно обрабатывалась разбавленным раствором кислоты (серная кислота, pH = 5...6) или щелочи (гидроксид натрия, pH = 9) и проводилась промывка дистиллированной водой;

- образец мембраны располагался в ячейке баромембранной установки для обжата (при максимальном избыточном давлении) при перекачивании дистиллированной воды;
- подготовленные мембраны располагались на пористом электроде-катоде и пористом электроде-аноде;
- осуществлялась сборка электробаромембранной ячейки с прикатодными и прианодными мембранами.

Результаты и обсуждение

Разработанная методология и подобранные объекты исследования позволили провести ряд экспериментальных исследований и получить графические результаты по структурным характеристикам различными методами, такими как рентгеноструктурный анализ (рисунок 2), термогравиметрия (рисунок 3), дифференциально-сканирующая калориметрия (рисунок 4), электрохимическим: вольт-амперным (рисунок 5), сопротивлению (рисунок 6), электропроводности (рисунок 7) мембранных систем, а также транспортным: коэффициенту задержания (рисунок 8) и удельному выходному потоку (рисунок 9).

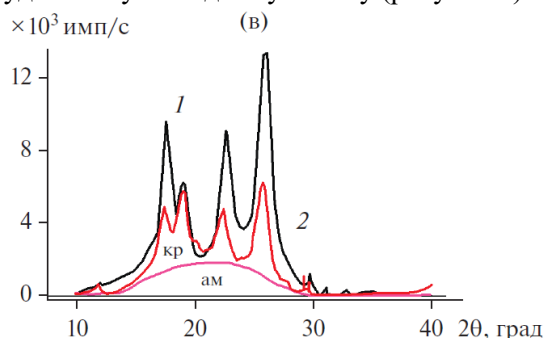


Рисунок 2. Экспериментальные зависимости для пленки МФФК-3, полученные методом рентгеноструктурного анализа: 1 – исходная; 2 – рабочая
Figure 2. Experimental dependencies for the MFFK-3 film obtained by X-ray structural analysis: 1 – initial; 2 – working

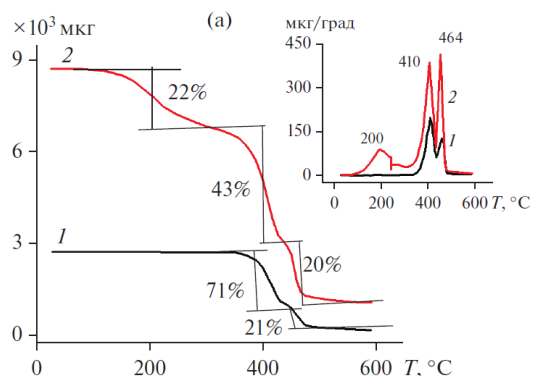


Рисунок 3. Экспериментальные зависимости для пленки МФФК-3, полученные методом термогравиметрии: 1 – исходная; 2 – рабочая
Figure 3. Experimental dependencies for the MFFK-3 film obtained by thermogravimetry: 1 – initial; 2 – working

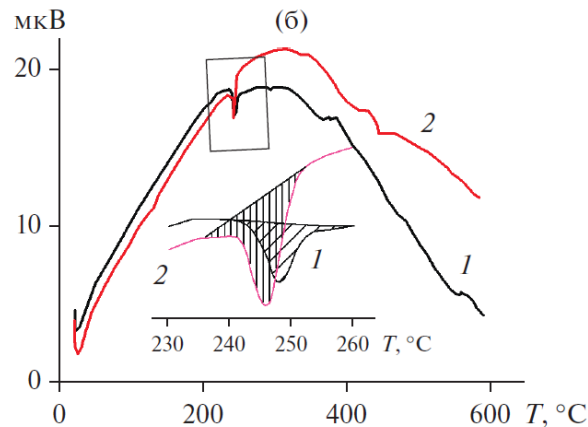


Рисунок 4. Экспериментальные зависимости для пленки МФФК-3, полученные методом дифференциально-сканирующей калориметрии: 1 – исходная; 2 – рабочая

Figure 4. Experimental dependencies for the MFFK-3 film obtained by differential scanning calorimetry: 1 – initial; 2 – working

Экспериментальные зависимости структурных характеристик различными методами получены для образцов мембраны МФФК-3 до и после действия трансмембранного давления и диффузии эфирных масел при микрофильтрационной очистке промывочной воды, образующейся в процессе синтеза биотоплива [8, 9].

Электрохимические характеристики мембранной системы исследованы при электронанофильтрационном разделении модельного раствора производства минерального удобрения [10].

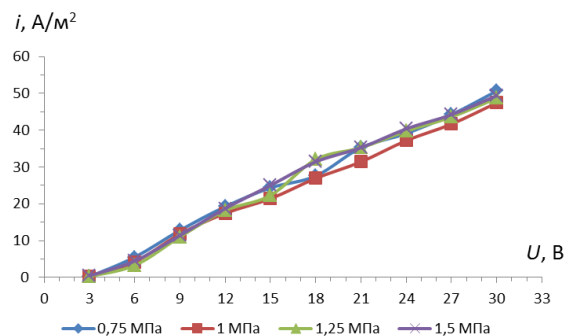


Рисунок 5. Зависимости ВАХ мембранной системы, оснащенной прианодной АМН-П и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении водного раствора хлорида аммония ($c = 0,5 \text{ кг/м}^3$) от трансмембранного давления

Figure 5. Dependences of the current-voltage characteristics of a membrane system equipped with anode AMN-P and cathode OPMN-P membranes during the separation of an aqueous solution of ammonium chloride ($c = 0,5 \text{ kg/m}^3$) on the transmembrane pressure

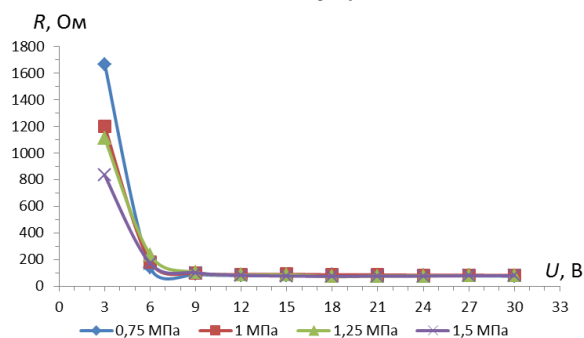


Рисунок 6. Зависимости сопротивления мембранной системы, оснащенной прианодной АМН-П и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении водного раствора хлорида аммония ($c = 0,5 \text{ кг/м}^3$) от напряжения и трансмембранного давления

Figure 6. Dependences of the resistance of a membrane system equipped with anode AMN-P and cathode OPMN-P membranes, when separating an aqueous solution of ammonium chloride ($c = 0,5 \text{ kg/m}^3$) on voltage and transmembrane pressure

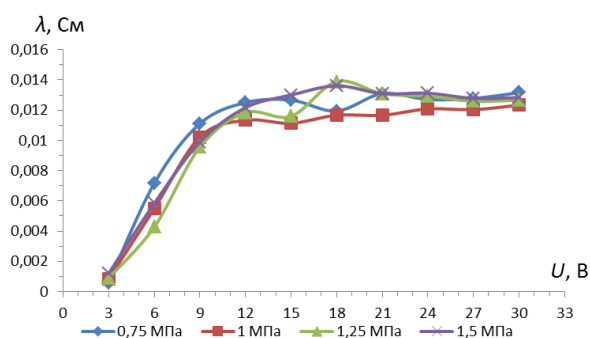


Рисунок 7. Зависимости электропроводности мембранной системы, оснащенной прианодной АМН-П и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении водного раствора хлорида аммония ($c = 0,5 \text{ кг/м}^3$), от напряжения и трансмембранного давления

Figure 7. Dependences of the electrical conductivity of a membrane system equipped with anode AMN-P and cathode OPMN-P membranes, when separating an aqueous solution of ammonium chloride ($c = 0,5 \text{ kg/m}^3$), on voltage and transmembrane pressure

Транспортные характеристики мембранной системы представлены для процесса электробаромембранного разделения промышленного раствора гальванического производства АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица [11].

Закключение

1. Разработана методология проведения научного исследования, представленная в виде многоуровневой взаимосвязанной структурно-иерархической схемы, основными этапами которой являются методики исследования электрохимических, структурных, кинетических

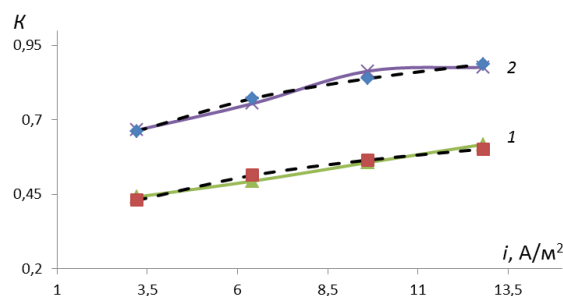


Рисунок 8. Зависимости коэффициента задержания для прикатодной мембраны ОПМН-П от плотности тока при постоянном трансмембранном давлении $P = 1,6 \text{ МПа}$ и разделении технологического раствора гальванического производства АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица по ионам: 1 – PO_4^{3-} ; 2 – Zn^{2+} (сплошная линия – эксперимент; штриховая линия – расчет)

Figure 8. Dependences of the retention coefficient for the OPMN-P cathode membrane on the current density at a constant transmembrane pressure $P = 1,6 \text{ MPa}$ and separation of the process solution of the galvanic production of JSC TAGAT named after S.I. Livshits by ions: 1 – PO_4^{3-} ; 2 – Zn^{2+} (solid line – experiment; dashed line – calculation)

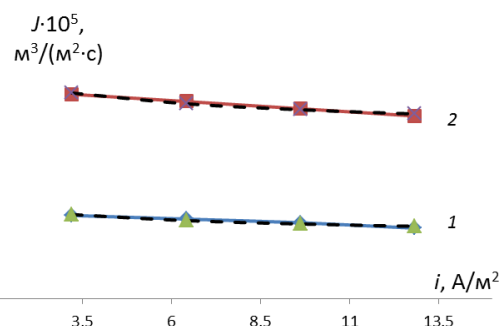


Рисунок 9. Зависимости удельного выходного потока для прианодной ОФАМ-К (1) и прикатодной ОПМН-П (2) мембран при разделении технологического раствора гальванического производства АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица от плотности тока с постоянным трансмембранным давлением $P = 1,6 \text{ МПа}$ (сплошная линия – эксперимент; штриховая линия – расчет)

Figure 9. Dependences of the specific output flow for the anode OFAM-K (1) and cathode OPMN-P (2) membranes during the separation of the process solution of the galvanic production of JSC TAGAT named after S.I. Livshits on the current density with a constant transmembrane pressure $P = 1,6 \text{ MPa}$ (solid line – experiment; dashed line – calculation)

характеристик, математическое моделирование, методики оптимизации и инженерного расчета, разработка аппаратно-технологического оформления и практическое применение в очистке промышленных растворов, экономическая оценка эффективности.

2. На основе проведенного аналитического обзора по традиционным и электрохимическим мембранным методам очистки и концентрирования промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий и в соответствии с целью и задачами работы проведен выбор объектов экспериментального исследования. Такими объектами выступают модельные, технологический и промышленные растворы в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий, а также нанофильтрационные, ультрафильтрационные, микрофильтрационные мембраны и предварительный фильтр производителей ЗАО НТЦ «Владипор» и ООО НПП «Технофильтр», г. Владимир.

3. Получены результаты экспериментальных исследований и представлены некоторые

графические зависимости структурных, электрохимических и транспортных характеристик мембранных систем при электробаромембранной и баромембранной очистке и концентрировании промышленных растворов в производствах минеральных удобрений, биотоплива и гальванопокрытий.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электробаромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024–0011).

Литература

- 1 Абоносимов О.А. Научные и практические основы электробаромембранной технологии в процессах химической водоподготовки и регенерации промышленных растворов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.03. Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2016. 364 с.
- 2 Акулиничев А.Н. Кинетические зависимости и технологическая эффективность процесса электробаромембранного удаления ионов тяжелых металлов (Fe, Cd, Pb) из сточных вод очистных предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.03. Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2017. 160 с.
- 3 Лазарев Д.С., Хорохорина И.В. Кинетические характеристики электронанофильтрационной очистки технологических растворов гальванических производств от ионов Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} // Вестник Технологического университета. 2025. Т. 31. № 1. С. 118–128.
- 4 Абоносимов Д.О., Протасов Д.Н., Абоносимов О.А. и др. Математическая модель электрогиперфильтрационного процесса очистки технологических растворов медно-гальванических производств // Вестник российских университетов. Математика. 2017. Т. 22. № 6-1. С. 1383–1388.
- 5 Владипор: сайт ЗАО НТЦ Владипор. URL: <http://www.vladipor.ru/catalog/show/> (дата обращения: 07.02.2021).
- 6 Технофильтр: сайт ООО НПП Технофильтр. URL: <https://www.technofilter.ru/catalog/laboratory-filtration/filtry-dlya-laboratorii/> (дата обращения: 07.02.2021).
- 7 Лазарев С.И., Головин Ю.М., Ковалев С.В. и др. Влияние трансмембранного давления и диффузии эфирных субстанций на трансформацию структуры в полимерных пленках вида УПМ 100 и ПП 190 // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58. № 4. С. 421–427.
- 8 Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V. et al. Thermal, X-ray Diffraction, and Kinetic Characteristics of Filtration Films in the Study of Ethereal Substances // High Temperature. 2022. V. 60. № 4. P. 485–491.
- 9 Коновалов Д.Н., Луа П., Лазарев С.И. и др. Исследование процесса электронанофильтрации при разделении раствора хлорида аммония на мембранах АМН-П и ОПМН-П // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25. № 2. С. 14–19.
- 10 Лазарев С.И., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н. и др. Электрохимические и транспортные характеристики мембранных систем при электронанофильтрационном разделении растворов, содержащих нитрат аммония и сульфат калия // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 6. С. 355–376.
- 11 Хорохорина И.В. Сорбционная емкость слабоионизированных мембран ОПМН-К и ОПМН-П при нанофильтрационном разделении технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. № 3. С. 67–70.
- 12 Kharchenko I.A., Volkova I.R., Fadeeva N.P. et al. Application of Electrobaromembrane Process for Separation of Aqueous Solutions of Ionic Dyes // Membranes and Membrane Technologies. 2025. V. 7. № 2. P. 144–153.
- 13 Butylskii D., Troitskiy V., Chupryna D. et al. Selective separation of singly charged chloride and dihydrogen phosphate anions by electrobaromembrane method with nanoporous membranes // Membranes. 2023. V. 13. № 5. P. 455.
- 14 Pismenskaya N., Bdiri M., Sarapulova V. et al. A review on ion-exchange membranes fouling during electrodialysis process in food industry, part 2: Influence on transport properties and electrochemical characteristics, cleaning and its consequences // Membranes. 2021. V. 11. № 11. P. 811.
- 15 Sarapulova V.V., Pasechnaya E.L., Titorova V.D. et al. Electrochemical properties of ultrafiltration and nanofiltration membranes in solutions of sodium and calcium chloride // Membranes and Membrane Technologies. 2020. V. 2. № 5. P. 332–350.
- 16 Giacobbo A., Bernardes A.M. Membrane separation process in wastewater and water purification // Membranes. 2022. V. 12. № 3. P. 259. doi: 10.3390/membranes12030259
- 17 Castro-Muñoz R., Díaz-Montes E., Cassano A., Gontarek E. Membrane separation processes for the extraction and purification of steviol glycosides: an overview // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. V. 61. № 13. P. 2152–2174. doi: 10.1080/10408398.2020.1772717

18 Stenina I., Golubenko D., Nikonenko V., Yaroslavl'tsev A. Selectivity of transport processes in ion-exchange membranes: Relationship with the structure and methods for its improvement // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. V. 21. № 15. P. 5517. doi: 10.3390/ijms21155517

19 Foorginezhad S., Zerafat M.M., Ismail A.F., Goh P.S. Emerging membrane technologies for sustainable water treatment: a review on recent advances // *Environmental Science: Advances*. 2025. V. 4. № 4. P. 530–570. doi: 10.1039/D4VA00378K

20 Lin Q., Zeng G., Yan G., Luo J. et al. Self-cleaning photocatalytic MXene composite membrane for synergistically enhanced water treatment: Oil/water separation and dyes removal // *Chemical Engineering Journal*. 2022. V. 427. P. 131668. doi: 10.1016/j.cej.2021.131668

References

1 Abonosimov O.A. Scientific and practical foundations of electrobaromembrane technology in the processes of chemical water treatment and regeneration of industrial solutions. Doctoral Dissertation (Dr. Sci. Tech.). Tambov: FSBEI HE "TSTU", 2016. 364 p. (in Russian).

2 Akulinichev A.N. Kinetic dependences and technological efficiency of the process of electrobaromembrane removal of heavy metal ions (Fe, Cd, Pb) from wastewater treatment plants. Candidate Dissertation (Cand. Sci. Tech.). Tambov: FSBEI HE "TSTU", 2017. 160 p. (in Russian).

3 Lazarev D.S., Khorokhorina I.V. Kinetic characteristics of electronanofiltration treatment of technological solutions from galvanic industries from Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} ions. *Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2025. vol. 31. no. 1. pp. 118–128. (in Russian).

4 Abonosimov D.O., Protasov D.N., Abonosimov O.A. et al. Mathematical model of electrohyperfiltration process for purification of technological solutions of copper-galvanic industries. *Bulletin of Russian Universities. Mathematics*. 2017. vol. 22. no. 6-1. pp. 1383–1388. (in Russian).

5 Vladipor. Available at: <http://www.vladipor.ru/catalog/show/> (accessed: 07.02.2021) (in Russian).

6 Technofilter. Available at: <https://www.technofilter.ru/catalog/laboratory-filtration/filtry-dlya-laboratoriy/> (accessed: 07.02.2021) (in Russian).

7 Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V. et al. Influence of transmembrane pressure and diffusion of ethereal substances on the transformation of structure in polymer films of UPM 100 and PP 190 types. *Surface and Interface Science and Materials Protection*. 2022. vol. 58. no. 4. pp. 421–427. (in Russian).

8 Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V. et al. Thermal, X-ray Diffraction, and Kinetic Characteristics of Filtration Films in the Study of Ethereal Substances. *High Temperature*. 2022. vol. 60. no. 4. pp. 485–491. doi: 10.1134/S0018151X22040116.

9 Konovalov D.N., Lua P., Lazarev S.I. et al. Study of the electronanofiltration process during the separation of ammonium chloride solution on AMN-P and OPMN-P membranes. *Bulletin of the Technological University*. 2022. vol. 25. no. 2. pp. 14–19. (in Russian).

10 Lazarev S.I., Kovalev S.V., Konovalov D.N. et al. Electrochemical and transport characteristics of membrane systems during electronanofiltration separation of solutions containing ammonium nitrate and potassium sulfate. *Electrochemistry*. 2021. vol. 57. no. 6. pp. 355–376. (in Russian).

11 Khorokhorina I.V. Sorption capacity of weakly ionized OPMN-K and OPMN-P membranes during nanofiltration separation of technological solutions containing heavy metal ions. *Bulletin of the Technological University*. 2020. vol. 23. no. 3. pp. 67–70. (in Russian).

12 Kharchenko I.A., Volkova I.R., Fadeeva N.P. et al. Application of Electrobaromembrane Process for Separation of Aqueous Solutions of Ionic Dyes. *Membranes and Membrane Technologies*. 2025. vol. 7. no. 2. pp. 144–153. doi: 10.1134/S2517751624020062.

13 Butyl'skii D., Troitskiy V., Chuprykina D. et al. Selective separation of singly charged chloride and dihydrogen phosphate anions by electrobaromembrane method with nanoporous membranes. *Membranes*. 2023. vol. 13. no. 5. article 455. doi: 10.3390/membranes13050455.

14 Pismenskaya N., Bdiri M., Sarapulova V. et al. A review on ion-exchange membranes fouling during electrodialysis process in food industry, part 2: Influence on transport properties and electrochemical characteristics, cleaning and its consequences. *Membranes*. 2021. vol. 11. no. 11. article 811. doi: 10.3390/membranes11110811.

15 Sarapulova V.V., Pasechnaya E.L., Titorova V.D. et al. Electrochemical properties of ultrafiltration and nanofiltration membranes in solutions of sodium and calcium chloride. *Membranes and Membrane Technologies*. 2020. vol. 2. no. 5. pp. 332–350. doi: 10.1134/S2517751620050078.

16 Giacobbo A., Bernardes A.M. Membrane separation process in wastewater and water purification. *Membranes*. 2022. vol. 12. no. 3. article 259. doi: 10.3390/membranes12030259.

17 Castro-Muñoz R., Díaz-Montes E., Cassano A., Gontarek E. Membrane separation processes for the extraction and purification of steviol glycosides: an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. vol. 61. no. 13. pp. 2152–2174. doi: 10.1080/10408398.2020.1772717.

18 Stenina I., Golubenko D., Nikonenko V., Yaroslavl'tsev A. Selectivity of transport processes in ion-exchange membranes: Relationship with the structure and methods for its improvement. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. vol. 21. no. 15. article 5517. doi: 10.3390/ijms21155517.

19 Foorginezhad S., Zerafat M.M., Ismail A.F., Goh P.S. Emerging membrane technologies for sustainable water treatment: a review on recent advances. *Environmental Science: Advances*. 2025. vol. 4. no. 4. pp. 530–570. doi: 10.1039/D4VA00378K.

20 Lin Q., Zeng G., Yan G., Luo J. et al. Self-cleaning photocatalytic MXene composite membrane for synergistically enhanced water treatment: Oil/water separation and dyes removal. *Chemical Engineering Journal*. 2022. vol. 427. Article 131668. doi: 10.1016/j.cej.2021.131668.

Сведения об авторах

Дмитрий Н. Коновалов к.т.н., доцент, кафедра техники и технологии автомобильного транспорта, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, kdn1979dom@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9366-8661>

Сергей И. Лазарев д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, sergey.lazarev.1962@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0746-5161>

Никита С. Наместников аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, namestnikov-nikita@mail.ru

Анна Г. Сысоева аспирант, кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, asus1301201@gmail.com

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра коммерции и товароведения, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия, профессор консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036 kaf-kit@vfreu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7333-4816>

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

Dmitry N. Konovalov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technique and technology of road transport department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, kdn1979dom@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9366-8661>

Sergey I. Lazarev Dr. Sci. (Engin.), head of department, mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, sergey.lazarev.1962@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0746-5161>

Nikita S. Namestnikov graduate student, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, namestnikov-nikita@mail.ru

Anna G. Sysoeva graduate student, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, asus1301201@gmail.com

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, commerce and commodity science department, Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia; consultant professor, technology of animal products department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, kaf-kit@vfreu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7333-4816>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/11/2025	После редакции 20/11/2025	Принята в печать 15/12/2025
Received 03/11/2025	Accepted in revised 20/11/2025	Accepted 15/12/2025

Математическое моделирование процесса получения функционализированных статистических бутадиен-стирольных сополимеров

Сергей Г. Тихомиров ¹	tikhomirov_57@mail.ru	 0000-0002-8192-0049
Ольга В. Карманова ¹	kaf-tospp@vsuet.ru	 0000-0003-2226-6582
Алена В. Фирсова ²	firsova_alen@mail.ru	 0000-0001-8175-6210
Виталий К. Битюков ¹	kaf-ius@vsuet.ru	 0000-0003-1439-9318
Игорь А. Хаустов ¹	kaf-ius@vsuet.ru	 0000-0002-8897-5763

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

² Воронежский филиал ФГБУ «НИИСК им. Академика С.В. Лебедева», ул. Менделеева, д. 36, г. Воронеж, 394014, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к математическому моделированию процесса синтеза бутадиен-стирольных статистических сополимеров (ДССК), полученных растворной полимеризацией в присутствии иницирующей системы «литийалкил-модификатор». Объектом исследования являлся функционализированный статистический бутадиен-стирольный каучук ДССК-2560Ф, полученный сополимеризацией бутадиена-1,3 со стиролом периодическим способом, при этом иницирующий комплекс «*n*-бутиллитий + модификатор» образуется в режиме *in situ* в присутствии мономеров. Процесс синтеза сополимера проводили при постоянной температуре. Конверсию мономеров определяли методом сухого остатка. С учетом того, что статистическое распределение стирола в сополимере определяется соотношением Me/Li в иницирующей системе, разработана кинетическая схема процесса синтеза статистического бутадиен-стирольного каучука. Для предложенной кинетической схемы представлена система бесконечных дифференциальных уравнений. С использованием метода моментов бесконечная система уравнений сведена к конечной. С использованием полученной системы уравнений проведена оценка степени превращения мономеров, значений среднечисленной, среднемассовой молекулярной массы и коэффициента полидисперсности в зависимости от условий синтеза в периодическом процессе. Кинетические параметры модели оценены с использованием процедур нелокальной оптимизации. В результате идентификации параметров математической модели рассчитаны значения констант скоростей элементарных реакций. Получены аналитические зависимости, описывающие влияние температуры полимеризации на степень конверсии и молекулярно-массовые характеристики каучука. Разработанная математическая модель может быть использована в технологии получения растровых бутадиен-стирольных статистических сополимеров, где в качестве иницирующей системы выступают алколат натрия и *n*-бутиллитий. Применение разработанной математической модели позволит установить влияние технологических параметров (температуры, соотношения компонентов иницирующей системы) на молекулярно-массовые характеристики получаемого каучука.

Ключевые слова: сополимеризация, математическая модель, кинетика полимеризации, конверсия, бутадиен-стирольный каучук, модификатор

Mathematical modeling of obtaining functionalized statistical butadiene-styrene copolymers

Sergey G. Tikhomirov ¹	tikhomirov_57@mail.ru	 0000-0002-8192-0049
Olga V. Karmanova ¹	kaf-tospp@vsuet.ru	 0000-0003-2226-6582
Alena V. Firsova ²	firsova_alen@mail.ru	 0000-0001-8175-6210
Vitaly K. Bitjukov ¹	kaf-ius@vsuet.ru	 0000-0003-1439-9318
Igor A. Khaustov ¹	kaf-ius@vsuet.ru	 0000-0002-8897-5763

¹ 1. Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

² 2. Voronezh branch of the Research Institute of Building Structures named after Academician S.V. Lebedev, Mendeleyev St., Bldg. 3b, Voronezh, 394014

Abstract. The article considers approaches to mathematical modeling of the synthesis of butadiene-styrene random copolymers (DSSK). These rubbers are obtained by solution polymerization in the presence of an alkyl lithium modifier initiating system. The object of the study was the functionalized random butadiene-styrene rubber DSSK-2560F. The rubber was obtained by copolymerization of butadiene-1,3 with styrene in a periodic manner. The initiating complex (*n*-butyl lithium + modifier) is formed *in situ* in the presence of monomers. The synthesis temperature was constant. The conversion of monomers was determined using the dry residue method. It was taken into account that the random distribution of styrene in the copolymer is determined by the Me/Li ratio in the initiating system. A kinetic scheme for the synthesis of random butadiene-styrene rubber has been developed. A system of infinite differential equations is presented for the proposed kinetic scheme. Using the method of moments, an infinite system of equations is reduced to a finite system of equations. The degree of monomer conversion, the values of the number-average and weight-average molecular weight, and the polydispersity coefficient are estimated depending on the synthesis conditions under batch conditions. The kinetic parameters of the model are estimated using nonlocal optimization procedures. The values of the rate constants of elementary reactions are calculated. Analytical dependences of the effect of polymerization temperature on the degree of conversion and molecular weight characteristics of the rubber are obtained. The developed mathematical model can be used in the technology of producing solution-based butadiene-styrene random copolymers, where sodium alcoholate and *n*-butyl lithium act as the initiating system. Application of the developed mathematical model will allow us to determine the influence of process parameters (temperature, ratio of components of the initiating system) on the molecular weight characteristics of the resulting rubber..

Keywords: copolymerization, mathematical model, polymerization kinetics, conversion, styrene-butadiene rubber, modifier

Для цитирования

Тихомиров С.Г., Карманова О.В., Фирсова А.В., Битюков В.К., Хаустов И.А. Математическое моделирование процесса получения функционализированных статистических бутадиен-стирольных сополимеров // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 212–218. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-212-218

For citation

Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Firsova A.V., Bitjukov V.K., Khaustov I.A. Mathematical modeling of obtaining functionalized statistical butadiene-styrene copolymers. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 212–218. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-212-218

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

Введение

При производстве «зеленых» шин нашли применение бутадиен-стирольные каучуки анионной полимеризации (ДССК), в особенности с функциональными группами в «голове» и «хвосте» полимерной цепи, применение которых обеспечивает получение шин с высоким сцеплением с сухим и мокрым дорожным покрытием, а также с улучшенными показателями устойчивости против заноса без повышения сопротивления качению и снижения износостойкости [1–2].

Согласно последним данным 58% мирового использования ДССК приходится на шинную промышленность, а ужесточение требований к зимним шинам приведет к увеличению использования ДССК еще на 20% [3]. Растущий спрос автомобильного сектора на высокоэффективные шины обусловлен потребностью в снижении сопротивления качению при использовании в протекторных резинах ДССК в сочетании с диоксидом кремния. В этой связи особую актуальность приобретают исследования, направленные на установление оптимального сочетания между основными эксплуатационными характеристиками шин. Например, для снижения сопротивления качению необходимо применение каучуков с высокими показателями эластичности по отскоку, в то же время показатели устойчивости при движении по мокрой дороге, которые являются результатом высокочастотного деформирования скользящей поверхности, определяются гистерезисными свойствами протекторных резин [4–6]. Поэтому в составе протекторных резиновых смесей применяются разные марки каучуков, в том числе ДССК для достижения баланса между такими противоречивыми характеристиками, а также для возможности регулирования молекулярно-массовых характеристик и количества 1,2-звеньев бутадиеновой части сополимера, что влияет на температуру стеклования и степень разветвленности макромолекул. В настоящее время главной задачей является оптимизация этих характеристик с целью улучшения комплекса эксплуатационных свойств протекторных резин на его основе, одним из путей решения которой является функционализация каучука.

Получение функционализированных полимеров возможно с применением аминоксодержащих инициаторов, которые образуются в результате взаимодействия *n*-бутиллития и модификатора, содержащего в своем составе >NH группу [7]. Таким образом, часть полимерных цепей содержит в «голове» аминную функциональную группу.

Математическое моделирование процессов полимеризации и сополимеризации играет важную роль в изучении различных аспектов их протекания, а, соответственно, и в оптимизации рассматриваемых процессов. Исследования на основе построения математической модели ориентированы на вычисление характеристик формируемого сополимера и продукта, получаемого на его основе, на поиск режимов оптимизации управления параметрами процесса и анализ их взаимного влияния в условиях промышленного производства [8–10].

Цель исследований – разработка математической модели статистической сополимеризации бутадиена со стиролом в присутствии иницирующей системы «литийалкил-модификатор», позволяющей установить влияние технологических параметров – температуры, соотношения компонентов иницирующей системы – на молекулярно-массовые характеристики получаемого каучука.

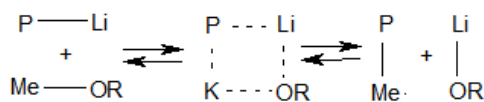
Материалы и методы

Объектом исследования являлся функционализированный статистический бутадиен-стирольный каучук ДССК-2560Ф, полученный сополимеризацией бутадиена-1,3 со стиролом в атмосфере азота в гексановом растворителе. Синтез опытных образцов ДССК2560Ф осуществляли периодическим способом в реакторе емкостью 13 л, снабженном мешалкой, рубашкой для теплоносителя, системой дозирования компонентов и выгрузки полимера. В качестве растворителя использовали Нефрас П1–65/75. В реактор загружали шихту с концентрацией мономеров $13 \pm 1\%$, затем подавали последовательно модификатор и *n*-бутиллитий. Иницирующий комплекс «*n*-бутиллитий + модификатор» образуется в режиме *in situ* в присутствии мономеров. Процесс синтеза сополимера проводили при постоянной температуре. Конверсию мономеров определяли методом сухого остатка.

Результаты и обсуждение

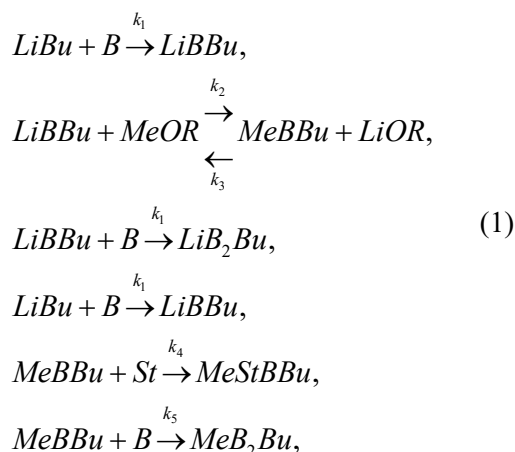
При анионной сополимеризации с использованием литийорганических инициаторов в сочетании с алкоголями щелочных и щелочноземельных металлов можно получать линейные полимеры с узким ММР и заданной молекулярной массой. Введение модификаторов резко повышает скорость полимеризации бутадиена и стирола, которая зависит от температуры процесса, типа мономера, природы щелочного металла, молярного отношения компонентов иницирующей системы [7, 11]. Алкоголи металлов (соединения типа R-OMe) при добавлении в небольших количествах к алкиллитию, обеспечивают образование статистического

сополимера, при этом структура бутadiеновой части меняется незначительно [12]. При использовании инициатора, который представляет собой смесь алкиллития и алкоголя щелочного металла, центр роста цепи находится в динамическом таутомерном равновесии с двумя металлами, статистическое распределение стирола в сополимере определяется соотношением Me/Li в иницирующей системе [13]:



где P – полимерная цепь, Me – катион металла (натрия, кальция), R – аллил.

Кинетическую схему процесса можно представить как:



где B – бутadiен, St – стирол, $LiBu$ – бутиллитий.

Предложенной кинетической схеме соответствует бесконечная система дифференциальных уравнений (2). Бесконечную систему дифференциальных уравнений можно свести к конечной (3), используя метод моментов [14].

$$\begin{aligned} \frac{d[LiBu]}{dt} &= -k_1[LiBu][B] \\ \frac{d[B]}{dt} &= -k_2[B]\sum_i LiP_i - k_1[B][LiBu] - k_5[B]\sum_i MeP_i \\ \frac{d[St]}{dt} &= -k_4[St]\sum_i MeP_i \\ \frac{d[LiOR]}{dt} &= k_2[MeOR]\sum_i LiP_i - k_3[LiOR]\sum_i MeP_i \\ \frac{d[MeOR]}{dt} &= -k_2[MeOR]\sum_i LiP_i + k_3[LiOR]\sum_i MeP_i \\ \frac{d[LiP_1]}{dt} &= -k_2[MeOR][LiP_1] + k_3[LiOR][MeP_1] - \\ &\quad - k_1[B][LiP_1] + k_1[LiBu][B] \\ \frac{d[LiP_2]}{dt} &= -k_2[MeOR][LiP_2] + k_3[LiOR][MeP_2] - \\ &\quad - k_1[B][LiP_2] + k_1[LiP_1][B] \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-k_1[B][LiP_2] + k_1[LiP_1][B] \\ \frac{d[LiP_n]}{dt} &= -k_2[MeOR][LiP_n] + k_3[LiOR][MeP_n] - \\ &-k_1[B][LiP_n] + k_1[LiP_{n-1}][B] \\ \frac{d[MeP_1]}{dt} &= k_2[LiP_1][MeOR] - k_3[LiOR][MeP_1] - \\ &-k_4[St][MeP_1] - k_5[B][MeP_1] \\ \frac{d[MeP_2]}{dt} &= k_2[LiP_2][MeOR] - k_3[LiOR][MeP_2] - \\ &-k_4[St][MeP_2] - k_5[B][MeP_2] + k_4[St][MeP_1] + \\ &+ k_5[B][MeP_1] \frac{d[MeP_n]}{dt} = k_2[LiP_n][MeOR] - \\ &-k_3[LiOR][MeP_n] - k_4[St][MeP_n] - k_5[B][MeP_n] + \\ &+ k_4[St][MeP_{n-1}] + k_5[B][MeP_{n-1}] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mu_1^0}{dt} &= -k_2[NaOR]\mu_1^0 + k_3[LiOR]\mu_2^0 \\ \frac{d\mu_2^0}{dt} &= k_2[NaOR]\mu_1^0 - k_3[LiOR]\mu_2^0 \\ \frac{d\mu_1^1}{dt} &= -k_2[NaOR]\mu_1^1 + k_3[LiOR]\mu_2^1 + k_1[B]\mu_1^0 \\ \frac{d\mu_2^1}{dt} &= k_2[NaOR]\mu_1^1 - k_3[LiOR]\mu_2^1 + \\ &+ k_4[St]\mu_2^0 + k_5[B]\mu_2^0 \\ \frac{d\mu_1^2}{dt} &= -k_2[NaOR]\mu_1^2 + k_3[LiOR]\mu_2^2 + \\ &+ k_1[B](2\mu_1^1 + \mu_1^0) \\ \frac{d\mu_2^2}{dt} &= k_2[NaOR]\mu_1^2 - k_3[LiOR]\mu_2^2 + \\ &+ k_4[St](2\mu_2^1 + \mu_2^0) + k_5[B](2\mu_2^1 + \mu_2^0) \end{aligned} \quad (3)$$

Начальные условия определены как:

$$\begin{aligned} \mu_1^0 &= [LiBu] \\ \mu_2^0 &= \mu_2^1 = \mu_2^2 = \mu_1^1 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mu_1^j = \sum_k k^j LiP_k$ и $\mu_2^j = \sum_k k^j NaP_k$

В результате получена система (3), состоящая из шести дифференциальных уравнений с пятью неизвестными константами k_i , $i = 1, 5$. С использованием полученной системы уравнений можно оценивать степень превращения мономеров (x) и значения среднечисленной (P_n), среднемассовой (P_w) степени полимеризации и коэффициента полидисперсности (K_n) в зависимости от условий синтеза в периодическом процессе:

$$x = \frac{[B]_0 + [St]_0 - [St][B]}{[B]_0 + [St]_0} \quad (5)$$

$$P_n = \frac{[B]_0 + [St]_0 - [B] - [St]}{[LiBu]_n} \quad (6)$$

$$P_w = \frac{\mu_1^2 + \mu_2^2}{\mu_1 + \mu_2} = \frac{\mu_1^2 + \mu_2^2}{[B]_0 + [St]_0 - [B] - [St]} \quad (7)$$

$$K_n = \frac{M_w}{M_n} \quad (8)$$

Параметрическая идентификация модели сводилась к оценке значений 5 констант. Устанавливали зависимость суммарной степени превращения бутадиена и стирола от времени полимеризации при известных значениях концентрации мономеров и инициатора (*LiBu* и *MeOR*).

Кинетические параметры оценивали с использованием процедур нелокальной оптимизации [14]. В качестве критерия минимизации использован модульный критерий:

$$\sum_{i=1}^n |x_i^{\text{эксп}} - x_i^{\text{расч}}| \rightarrow \min$$

где n – количество экспериментальных точек.

В результате идентификации математической модели получены следующие значения параметров (константы скоростей элементарных реакций), представленные в таблице 1.

Таблица 1.

Значения констант скоростей элементарных реакций (дм³/моль·мин)

Table 1.
Rate constants of elementary reactions (дм³/моль·мин)

Т, К	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
313	24,07	226,14	240,32	552,53	1,78
333	360,92	291,52	480,92	3358,54	8,24

Константы скоростей элементарных реакций описываются согласно закону Аррениуса:

$$K_j = K_0 j e^{-\left(\frac{E_j}{RT}\right)} \quad (9)$$

где K_0 – предэкспонента; E_j – энергия активации реакции; R – универсальная газовая постоянная.

Получены следующие значения: $E_1 = 115,28$ кДж/моль; $E_2 = 109,82$ кДж/моль; $E_3 = 32,18$ кДж/моль; $E_4 = 72,22$ кДж/моль; $E_5 = 65,36$ кДж/моль.

Применимость полученной математической модели оценивалась путем сравнения экспериментальных данных конверсии с соответствующими характеристиками, полученными по модели.

На рисунках 1–2 представлены экспериментальные данные и результаты вычислительного эксперимента по модели для следующего набора исходных данных: температура синтеза $T = 313$ К; концентрация стирола $[St]_0 = 0,41$ моль/дм³; концентрация бутадиена $[B]_0 = 0,95$ моль/дм³; концентрация *n*-бутиллития $[LiBu]_0 = 1,37 \times 10^{-3}$ моль/дм³; концентрация модификатора $[NaOR]_0 = 8,55 \times 10^{-5}$ моль/дм³; сухой остаток $G_0 = 15,3\%$ мас.

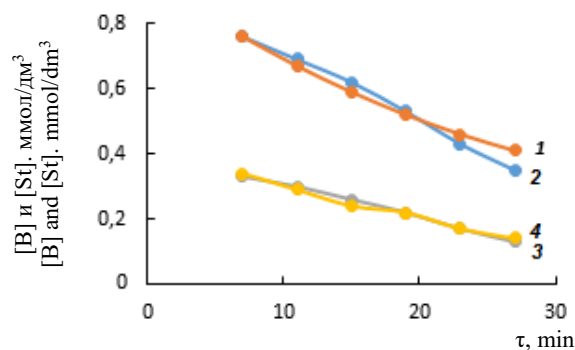


Рисунок 1. Кинетика сополимеризации бутадиена со стиролом и результаты вычислительного эксперимента по модели синтеза ДССК-2560Ф: 1, 2 – изменение концентрации бутадиена $[B]$ от времени τ ; 3, 4 – изменение концентрации стирола $[St]$ от времени τ ; 1, 3 – расчет; 2, 4 – эксперимент

Figure 1. Kinetics of copolymerization of butadiene with styrene and results of computational experiment using the model: 1, 2 – change in butadiene concentration $[B]$ over time τ ; 3, 4 – change in styrene concentration $[St]$ over time τ ; 1, 3 – calculation; 2, 4 – experiment

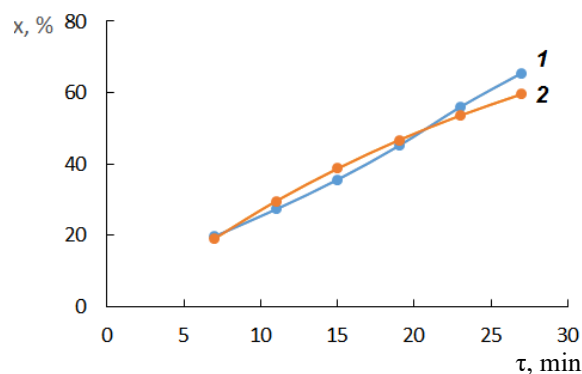


Рисунок 2. Зависимости изменения конверсии (x) от времени синтеза (τ) каучука ДССК-2560Ф: 1 – эксперимент; 2 – расчет

Figure 2. Dependences of the change in conversion (x) on the synthesis time (τ) of rubber DSSK-2560F: 1 – experiment; 2 – calculation

Средняя ошибка отклонения расчетных значений степени превращения мономеров от экспериментальных соответствует 5% отн., что с одной стороны не превышает точности измерения данной величины, а с другой – это отклонение обусловлено нарушением изотермичности процесса и наличием неконтролируемых возмущений, воздействующих на процесс.

Результаты исследования влияния температуры полимеризации на кинетику процесса и параметры молекулярно-массового распределения (P_n , P_w , K_r) представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Влияние температуры полимеризации на степень конверсии и молекулярные параметры каучука ДССК-2560Ф

Table 2.

The influence of polymerization temperature on the degree of conversion and molecular parameters of rubber DSSK-2560F

T, K	τ	$x, \%$	$P_n \times 10^{-3}$	$P_w \times 10^{-3}$	K_n
313	100	50	1,7	2,9	1,7
323	100	88	2,9	3,8	1,3
333	47	100	3,3	4,4	1,3
343	13	100	3,3	5,2	1,6
353	10	100	3,3	6,2	1,9

Полученные данные свидетельствуют о том, что с ростом температуры наблюдается существенное повышение скорости процесса и выравнивание скоростей расходования бутадиена и стирола. Оптимальной температурой

с точки зрения одновременного истощения бутадиена и стирола является температура 343 К. Одновременно с ростом температур происходит возрастание среднемассовой и среднечисленной степеней полимеризации, коэффициент же полидисперсности в диапазоне температуры [313÷333 К] падает, а затем возрастает в диапазоне [313÷333 К].

Заключение

Разработана математическая модель сополимеризации бутадиена со стиролом в присутствии иницирующей системы «*n*-бутиллитий + модификатор» при получении каучука ДССК-2560Ф. Кинетические параметры системы оценены с использованием процедур нелокальной оптимизации, преобразование бесконечной системы дифференциальных уравнений осуществлено с использованием метода моментов.

Разработанная модель может быть использована для имитационного моделирования с выбором оптимальных параметров процесса в технологии получения растворных бутадиен-стирольных статистических сополимеров, где в качестве иницирующей системы выступают алголят натрия и *n*-бутиллитий.

Литература

- 1 Куперман Ф.Е. Новые каучуки для шин. М.: Альянс Пресс, 2005. 329 с.
- 2 Бакфиш К., Хайнц Д. Новая книга о шинах. Справочное издание. М.: Издательство Астрель, 2003. 303 с.
- 3 Solution Styrene Butadiene Rubber Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Oil-filled, Non-oil Filled), By Application (Tires, Footwear, Polymer Modification, Adhesives & Sealants, Others), Regional Insights and Forecast to 2037. URL: <https://www.industryresearch.biz/enquiry/request-sample/100788> (дата обращения: 06.03.2025).
- 4 Ansari A., Mohanty T.R., Ramakrishnan S. et al. Design of Silyl Functionalized Emulsion SBR and its Application in Green Tire // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2025. V. 64. № 7. P. 3795–3809.
- 5 Кротова О.А., Белоблоцкая Н.Г. Упруго-гистерезисные свойства протекторных резин с кремнекислотными наполнителями // Китайско-российский конкурс инноваций и предпринимательства-2020, Юго-Западный регион: сб. материалов. 2021. С. 121.
- 6 Карманова О.В., Шутилин Ю.Ф. Вулканизирующие системы в рецептуре резин на основе смесей каучуков // Инженерные технологии. 2024. С. 71.
- 7 Бердников В.В., Карманова О.В., Фирсова А.В. Исследование свойств модифицированных бутадиен-стирольных каучуков для шинной промышленности // Технология органических веществ: мат. 89-й науч.-техн. конф. профес.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 3-18 февраля 2025 г. Минск: БГТУ, 2025. С. 146–148.
- 8 Михайлова Т.А., Мустафина С.А. Компьютерное моделирование процесса синтеза бутадиен-стирольного каучука: влияние подачи регулятора на характеристики продукта // Тонкие химические технологии. 2024. Т. 19. № 6. С. 555–564.
- 9 Schmid F. Understanding and modeling polymers: The challenge of multiple scales // ACS Polymers Au. 2022. V. 3. № 1. P. 28–58.
- 10 Мифтахов Э.Н., Михайлова Т.А., Мустафина С.А. Моделирование процессов синтеза полимеров с целью оценки молекулярно-массового распределения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2024. № 5 (116). С. 110–126.
- 11 Федосеев М.С., Державинская Л.Ф. Теплостойкие полимеры и композиты на основе эпоксидных связующих различной химической природы // Вестник Пермского ФИЦ. 2022. № 2. С. 17–26.
- 12 Сарасеко Е.Г. Краткий справочник по основным понятиям органической и специальной химии // Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы. 2020. С. 287–356.
- 13 Долгоплоск Б.А., Тинякова Е.И. Металлоорганический катализ в процессах полимеризации. М.: Наука, 1982. 511 с.
- 14 Кафаров В.В., Ветехин В.Н., Тихомиров С.Г. Моделирование кинетики процесса полимеризации полиизопренового каучука // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 305. № 6. С. 1425–1429.
- 15 Мифтахов Э.Н., Кубряк А.И., Мустафина С.А. и др. Исследование физико-химических закономерностей процессов синтеза полимеров методами математического моделирования // Материалы докладов XXVIII науч.-практ. конф. «Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии». Москва, 2023. С. 35–37.

- 16 Kashnikova A., Miftakhov E., Ivanov D. Modeling and Optimization of Butadiene–Styrene Copolymerization Using a Kinetic Approach and a Genetic Algorithm // 2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2025. P. 112–116.
- 17 Bronskaya V., Smirnova L., Matyukhina A. et al. Copolymerization of butadiene and styrene under the influence of N-butyllithium // Arabian Journal of Chemistry. 2023. V. 16. № 11. P. 105205.
- 18 Datta S., Kao N., Bhaskar T. et al. Mathematical function using mechanical properties to calculate chain scission as a function of radiation dose in electron beam treated styrene-butadiene-styrene block copolymer // Express Polymer Letters. 2024. V. 18. № 9. doi: 10.3144/expresspolymlett.2024.68
- 19 Rentería-Baltierrez F.Y., Reyes-Melo M.E., Martínez-González C.L. et al. Effect of 3D Printing Parameters on the Viscoelastic Behavior of Acrylonitrile Butadiene Styrene: Fractional Calculus Modeling and Statistical Optimization // Polymers. 2025. V. 17. № 12. P. 1650. doi: 10.3390/polym17121650
- 20 Miftakhov E., Mustafina S., Akimov A. Application of Heuristic Methods for Polymer Synthesis Process Optimization // Journal of Engineering. 2024. V. 2024. № 1. P. 5900477. doi: 10.28991/ESJ-2024-08-06-023
- 21 Pianese G., Milani G., Milani F. Kinetic mathematical model with induction and reversion for the vulcanization of natural rubber and ethylene propylene diene monomer blend // Polymer Testing. 2024. V. 131. P. 108339. doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108339
- 22 Rodriguez-Guadarrama L. Modeling of batch production of high vinyl styrene/butadiene copolymers for high performance tires // Journal of Applied Polymer Science. 2020. V. 137. № 45. P. 49415. doi: 10.1002/app.49415
- 23 Wang Y., Li R., Qiao J. Study on the diffusion behaviour of styrene-butadiene rubber modifier and asphalt components based on molecular dynamics simulation // Road Materials and Pavement Design. 2024. V. 25. № 10. P. 2225–2241. doi: 10.1080/14680629.2024.2302806

References

- 1 Kuperman F.E. New Rubbers for Tires. Moscow: Al'yans Press, 2005. 329 p. (in Russian).
- 2 Bakfish K., Hajnc D. New Book about Tires. Reference Edition. Moscow: Izdatel'stvo Astrel', 2003. 303 p. (in Russian).
- 3 Solution Styrene Butadiene Rubber Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Oil-filled, Non-oil Filled), By Application (Tires, Footwear, Polymer Modification, Adhesives & Sealants, Others), Regional Insights and Forecast to 2037. Available at: <https://www.industryresearch.biz/enquiry/request-sample/100788> (accessed: 06.03.2025).
- 4 Ansari A., Mohanty T.R., Ramakrishnan S. et al. Design of Silyl Functionalized Emulsion SBR and its Application in Green Tire. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2025. vol. 64. no. 7. pp. 3795–3809.
- 5 Krotova O.A., Beloblotskaya N.G. Elastic-Hysteresis Properties of Tread Rubbers with Silica Fillers. In: Sino-Russian Innovation and Entrepreneurship Competition-2020, Southwest Region: Collection of Materials. 2021. p. 121. (in Russian).
- 6 Karmanova O.V., Shutilin Yu.F. Vulcanizing Systems in Rubber Formulations Based on Rubber Blends. Engineering Technologies. 2024. p. 71. (in Russian).
- 7 Berdnikov V.V., Karmanova O.V., Firsova A.V. Investigation of the Properties of Modified Styrene-Butadiene Rubbers for the Tire Industry. In: Technology of Organic Substances: Proceedings of the 89th Scientific and Technical Conference of Faculty, Researchers, and Postgraduates (with international participation), Minsk, February 3–18, 2025. Minsk: BSTU, 2025. pp. 146–148. (in Russian).
- 8 Mikhailova T.A., Mustafina S.A. Computer Modeling of the Styrene-Butadiene Rubber Synthesis Process: The Effect of Regulator Feed on Product Characteristics. Fine Chemical Technologies. 2024. vol. 19. no. 6. pp. 555–564. (in Russian).
- 9 Schmid F. Understanding and modeling polymers: The challenge of multiple scales. ACS Polymers Au. 2022. vol. 3. no. 1. pp. 28–58.
- 10 Miftakhov E.N., Mikhailova T.A., Mustafina S.A. Modeling of Polymer Synthesis Processes to Assess Molecular Weight Distribution. Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences. 2024. no. 5 (116). pp. 110–126. (in Russian).
- 11 Fedoseev M.S., Derzhavinskaya L.F. Heat-Resistant Polymers and Composites Based on Epoxy Binders of Various Chemical Nature. Bulletin of the Perm Federal Research Center. 2022. no. 2. pp. 17–26. (in Russian).
- 12 Saraseko E.G. Brief Guide to Basic Concepts of Organic and Special Chemistry. In: Innovative Development of Science: Fundamental and Applied Problems. 2020. pp. 287–356. (in Russian).
- 13 Dolgoplosk B.A., Tinyakova E.I. Organometallic Catalysis in Polymerization Processes. Moscow: Nauka, 1982. 511 p. (in Russian).
- 14 Kafarov V.V., Vetokhin V.N., Tikhomirov S.G. Modeling the Kinetics of Polyisoprene Rubber Polymerization Process. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1989. vol. 305. no. 6. pp. 1425–1429. (in Russian).
- 15 Miftakhov E.N., Kubryak A.I., Mustafina S.A. et al. Study of Physicochemical Regularities of Polymer Synthesis Processes by Mathematical Modeling Methods. In: Materials of the XXVIII Scientific and Practical Conference "Rubber Industry: Raw Materials, Materials, Technologies". Moscow, 2023. pp. 35–37. (in Russian).
- 16 Kashnikova A., Miftakhov E., Ivanov D. Modeling and Optimization of Butadiene–Styrene Copolymerization Using a Kinetic Approach and a Genetic Algorithm. In: 2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2025. pp. 112–116.
- 17 Bronskaya V., Smirnova L., Matyukhina A. et al. Copolymerization of butadiene and styrene under the influence of N-butyllithium. Arabian Journal of Chemistry. 2023. vol. 16. no. 11. article 105205.
- 18 Datta S., Kao N., Bhaskar T. et al. Mathematical function using mechanical properties to calculate chain scission as a function of radiation dose in electron beam treated styrene-butadiene-styrene block copolymer. Express Polymer Letters. 2024. vol. 18. no. 9. [Online first]. doi: 10.3144/expresspolymlett.2024.68.

19 Rentería-Baltierrez F.Y., Reyes-Melo M.E., Martínez-González C.L. et al. Effect of 3D Printing Parameters on the Viscoelastic Behavior of Acrylonitrile Butadiene Styrene: Fractional Calculus Modeling and Statistical Optimization. *Polymers*. 2025. vol. 17. no. 12. article 1650. doi: 10.3390/polym17121650.

20 Miftakhov E., Mustafina S., Akimov A. Application of Heuristic Methods for Polymer Synthesis Process Optimization. *Journal of Engineering*. 2024. vol. 2024. no. 1. article 5900477. doi: 10.28991/ESJ-2024-08-06-023.

21 Pianese G., Milani G., Milani F. Kinetic mathematical model with induction and reversion for the vulcanization of natural rubber and ethylene propylene diene monomer blend. *Polymer Testing*. 2024. vol. 131. article 108339. doi: 10.1016/j.polymertesting.2024.108339.

22 Rodriguez-Guadarrama L. Modeling of batch production of high vinyl styrene/butadiene copolymers for high performance tires. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. vol. 137. no. 45. article 49415. doi: 10.1002/app.49415.

23 Wang Y., Li R., Qiao J. Study on the diffusion behaviour of styrene-butadiene rubber modifier and asphalt components based on molecular dynamics simulation. *Road Materials and Pavement Design*. 2024. vol. 25. no. 10. pp. 2225–2241. doi: 10.1080/14680629.2024.2302806.

Сведения об авторах

Сергей Г. Тихомиров д.т.н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tikhomirov_57@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Ольга В. Карманова д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра технологии органических соединений, переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-tospp@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Алена В. Фирсова к.т.н., заведующий лабораторией, лаборатория растворной полимеризации, Воронежский филиал НИИСК им. Академика С.В. Лебедева, ул. Менделеева, 36, 394014 г. Воронеж, Россия, firsova_alen@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8175-6210>

Виталий К. Битюков д.т.н., профессор, кафедра профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-ius@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1439-9318>

Игорь А. Хаустов д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-ius@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8897-5763>

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

Sergey G. Tikhomirov Dr. Sci. (Engin.), professor, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tikhomirov_57@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Olga V. Karmanova Dr. Sci. (Engin.), head of department, technology of organic compounds and processings of polymers department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-tospp@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Alena V. Firsova Cand. Sci. (Engin.), head of the laboratory, solution polymerization laboratory Voronezh branch of the Institute named after Academician S.V. Lebedev, Revolution Av., 19 Voronezh, 394014, Russia, firsova_alen@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8175-6210>

Vitaly K. Bityukov Dr. Sci. (Engin.), professor, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-ius@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1439-9318>

Igor A. Khaustov Dr. Sci. (Engin.), head of department, information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-ius@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8897-5763>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/11/2025	После редакции 17/11/2025	Принята в печать 08/12/2025
Received 03/11/2025	Accepted in revised 17/11/2025	Accepted 08/12/2025

Вулканизирующие системы в рецептуре резин, эксплуатируемых при пониженных температурах

Ольга В. Карманова	¹	kaf-tospp@vsuet.ru	 0000-0003-2226-6582
Юрий Ф. Шутилин	¹	shuf777@mail.ru	 0009-0007-0252-726X
Александр А. Голякевич	¹	sasha4292@yandex.ru	 0000-0003-4206-8874
Екатерина А. Меренкова	¹	kaf-tos — pp@vsuet.ru	

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

Аннотация. Работа посвящена изучению свойств резин на основе смеси морозостойкого и маслостойкого каучуков, вулканизирующая группа которых включала серу, различные ускорители и активаторы вулканизации, в том числе комплексный активатор серной вулканизации, представляющий собой органо-минеральную композицию из оксида цинка, стеариновой кислоты и минерального носителя. Изучены кинетические особенности образования пространственной сетки смеси разнополярных диеновых каучуков при вулканизации серой и ускорителями класса тиазолов и их комбинации с дифенилгуанидином. По результатам оценки температуры стеклования вулканизатов смесей исследуемых каучуков произведены расчеты и определены коэффициенты распределения серы в вулканизатах. Анализ результатов выявил несоответствие между химической активностью каучуков и данными о связывании серы этими каучуками в их комбинациях. Сделано предположение о влиянии на скорость присоединения серы к макромолекулам релаксационных факторов: в условиях вулканизации скорость релаксации цепей исследуемых каучуков согласуется со степенью присоединения серы к каучукам в их смесях и не согласуется с вулканизационной активностью индивидуальных каучуков. Очевидно, более подвижные цепи каучуков успевают большее число раз прореагировать с поверхностью действительного агента вулканизации. Предложено при разработке рецептур на основе разнополярных (несовместимых) каучуков, например, для маслостойких изделий, к тому же эксплуатирующихся при пониженных температурах, учитывать характер распределения серы между фазами совмещаемых полимеров, которое также зависит от типа применяемого ускорителя вулканизации. Показана целесообразность применения в рецептурах на основе смесей каучуков комплексного активатора вулканизации, что обеспечивает улучшение комплекса вулканизационных и упруго-прочностных свойств резин.

Ключевые слова: морозостойкость, серная вулканизация, активатор вулканизации, оксид цинка, кинетика вулканизации, прогнозирование свойств

Curing systems for rubbers used at low temperatures

Olga V. Karmanova	¹	kaf-tospp@vsuet.ru	 0000-0003-2226-6582
Yuri Shutilin	¹	shuf777@mail.ru	 0009-0007-0252-726X
Alexander A. Golyakevich	¹	sasha4292@yandex.ru	 0000-0003-4206-8874
Ekaterina A. Merenkova	¹	kaf-tos — pp@vsuet.ru	

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This work is devoted to studying the properties of rubbers based on a blend of frost-resistant and oil-resistant rubbers. The vulcanizing group also includes vulcanization activators, including a complex sulfur vulcanization activator, which is an organo-mineral composition of zinc oxide, stearic acid, and a mineral carrier. The kinetic features of the formation of the spatial network of a vulcanizate consisting of a blend of heteropolar diene rubbers vulcanized with sulfur and thiazole accelerators and their combination with diphenylguanidine are studied. Based on the glass transition temperatures of the vulcanizates of the studied rubber blends, calculations were performed and sulfur distribution coefficients in the vulcanizates were determined. Analysis of the results revealed a discrepancy between the chemical activity of the rubbers and the data on sulfur binding by these rubbers in their combinations. A hypothesis is made that relaxation factors influence the rate of sulfur addition to macromolecules. During vulcanization, the chain relaxation rate of the studied rubbers is consistent with the degree of sulfur addition to the rubbers in their blends. However, it is inconsistent with the vulcanization activity of individual rubbers. This occurs because more mobile rubber chains have time to react more times with the surface of the actual vulcanization agent. When developing formulations based on heteropolar (incompatible) rubbers, for example, for oil- and petrol-resistant products operated at low temperatures, the nature of sulfur distribution between the phases of the compatible polymers must be taken into account. This distribution may also depend on the type of vulcanization accelerator used. The feasibility of using a complex vulcanization activator in formulations based on rubber blends is demonstrated. This ensures an improvement in the vulcanization and elastic-strength properties of the rubbers.

Keywords: sulfur vulcanization, activator, zinc oxide, vulcanization kinetics, prediction of properties

Для цитирования

Карманова О.В., Шутилин Ю.Ф., Голякевич А.А., Меренкова Е.А. Вулканизирующие системы в рецептуре резин, эксплуатируемых при пониженных температурах // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 219–225. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-219-225

For citation

Karmanova O.V., Shutilin Yu.F., Golyakevich A.A., Merenkova E.A. Curing systems for rubbers used at low temperatures. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 219–225. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-219-225

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

Введение

При разработке рецептур резин для изделий, эксплуатирующихся при пониженных температурах основными принципами являются: применение каучука с низкой температурой стеклования (T_g), в которых затруднена кристаллизация; введение пластификаторов; правильный выбор вулканизирующей группы; учет типа и дозировки наполнителей; использование смесей каучуков [1]. Особую актуальность приобретают исследования, направленные на создание морозостойких резиновых уплотнителей, работоспособных в среде масел и топлив [2] и к которым предъявляются различные, зачастую противоречивые требования: малая степень набухания в агрессивной среде, низкая остаточная деформация сжатия, низкая T_g и высокий коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению; требуемый уровень физико-механических показателей.

При правильном выборе вулканизирующей группы можно обеспечить повышение морозостойкости резин. При обычных плотностях вулканизационной сетки, принятых для эластомеров, когда расстояние между узлами сетки остается существенно большим, чем длина кинетического сегмента, T_g меняется мало. При увеличении плотности сетки до определенной степени повышается коэффициент морозостойкости резин на основе полярных и неполярных каучуков в области перехода из высокоэластического в стеклообразное состояние [3]. Для резин на основе полярных каучуков серной вулканизации отмечено снижение коэффициента морозостойкости, для резин пероксидной вулканизации — повышение коэффициента морозостойкости [4]. В случае неполярных каучуков при повышении плотности сшивания повышение коэффициента морозостойкости наблюдается для резин и серной, и пероксидной вулканизации. Для кристаллизующихся каучуков влияние поперечных связей и других образующихся при вулканизации структур на морозостойкость резин проявляется в нарушении регулярности цепей макромолекул в результате появления запрещенного объема вокруг связей, кристаллизация в котором невозможна.

Следует отметить, что не все типы вулканизирующих групп одинаково эффективно замедляют кристаллизацию. Так, для резин на основе НК, СКИ-3 и СКД наиболее сильное замедление кристаллизации достигается при использовании вулканизирующих групп, приводящих к образованию полисульфидных связей и модификации цепи полимера в присутствии ускорителей типа каптакса и альтакса, а также при использовании вулканизирующих групп, содержащих серу с сульфенамидными ускорителями [5]. В меньшей степени замедляют кристаллизацию сетки,

образованные при вулканизации тетраметилтиурамдисульфидом без серы или с малым ее содержанием ($\sim 0,5$ масс. ч. на 100 масс. ч. каучука), а также пероксидом, т. е. образованные преимущественно моносulfидными или С-С-связями.

Главной проблемой при изготовлении смесей полимеров, когда для улучшения морозостойкости к основному каучуку добавляют второй каучук с хорошими низкотемпературными свойствами, являются вопросы совместимости полимеров разных типов, так как большинство подобных композиций являются термодинамически несовместимыми и характеризуются двумя температурами стеклования.

При рассмотрении механизма вулканизации смесей полимеров основное внимание уделяется проблеме растворимости вулканизирующих агентов в смеси и влиянию различных факторов на процесс совулканизации, а также возможности регулирования распределения вулканизирующих агентов в смеси полимеров для обеспечения хорошего совпадения скоростей вулканизации в разных фазах [6–7].

В серных вулканизирующих системах в качестве активатора применяется оксид цинка, что обеспечивает повышенное количество поперечных связей различной силы и природы и формирование прочной сетчатой структуры вулканизата [8]. Несмотря на полезную роль оксида цинка в механизме серной вулканизации, возникает ряд вопросов относительно влияния цинка на экологию. К настоящему времени не найдено однозначного решения данной проблемы, предлагаемые ингредиенты не всегда обеспечивают преимущество по сравнению с активацией оксидом цинка или усложняют технологический процесс изготовления резиновых смесей.

С целью обеспечения равномерности распределения вулканизирующей группы в резинах на основе морозостойкого и маслбензостойкого каучуков изучена возможность применения комплексного активатора серной вулканизации Вулкатив (производитель ООО «Совтех», г. Воронеж) в рецептуре изделий, эксплуатируемых при пониженных температурах. Комплексный активатор вулканизации Вулкатив представляет собой композицию оксида цинка (содержание которого в продукте не превышает 35 % мас.), карбоновых кислот и тонкодисперсного минерального носителя [9].

Материалы и методы

В качестве объектов для исследования использовали резиновые смеси на основе каучуков: бутадиенового СКД, изопренового СКИ-3 и бутадиен-нитрильного СКН-40, включающие

вулканизирующие системы на основе ускорителей вулканизации разных типов: 2,2'-дибензтиазолдисульфид (альтакс), 2-меркаптобензотиазол (каптакс), дифенилгуанидин, сульфенамид Ц; активаторов вулканизации – оксид цинка, стеариновой кислоты (эталонный образец), активатора Вулкатив (опытные образцы резиновых смесей). В рецептурах резиновых смесей заменяли оксид цинка и стеариновую кислоту на комплексный активатор вулканизации (дозировка опытного активатора эквивалентна суммарной дозировке оксида цинка и стеариновой кислоты).

Изготовление резиновых смесей осуществляли в лабораторном смесителе РС – 0,1. Вулканизационные характеристики резиновых смесей определяли на реометре MDR-2000, полученные реограммы оцифровывали и определяли значения крутящего момента во времени с шагом 1 с. Для определения констант скорости отдельных стадий реометрическая кривая была разделена на несколько областей, в каждой из которых методами формальной кинетики с помощью компьютерной программы «Vulcanization v. 2.0» рассчитывали константы скорости вулканизации отдельных стадий, которые использовали для решения прямой кинетической задачи: нахождение концентрации вулканизационных узлов относительно максимальной плотности поперечного сшивания как функции времени [10].

Вулканизаты получали в вулканизационном прессе в соответствии с режимом вулканизации, уточненным по результатам реометрических испытаний. Оценивали физико-механические показатели резин по ГОСТ 270–75, коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия по ГОСТ 13808–79, степень набухания в СЖР-3 по ГОСТ 263–75. Температурные переходы в образцах исследовали с помощью прибора DMA 242 E Artemis.

Обсуждение результатов

На первом этапе работы для выявления различных механизмов вулканизации смесей каучуков СКД и СКИ-3 с СКН-40 варьировали виды (альтакс, каптакс и их комбинации с дифенилгуанидином – ДФГ) и дозировки (от 1 до 5 мас. ч.) ускорителей при постоянном отношении «сера: ускоритель» = 2 : 1. Характер изменения структуры смесей каучуков оценивали по их вулканизационной активности, т. е. по количеству серы, которое связывает каждый каучук в процессе вулканизации.

Измерения T_c в смесях каучуков позволили оценить распределение серы между фазами в соответствии с методикой, приведенной в работе [11]. Данное распределение является следствием взаимодействия петель каучуков с поверхностью действительного агента вулканизации (ДАВ). Известно, что активность индивидуальных каучуков при вулканизации меняется следующим образом: СКИ-3 > СКН-40 > СКС-30 > СКД, что не совпадает с вышеприведенными данными о связывании серы этими каучуками в их комбинациях (табл. 1).

Это несоответствие объяснимо с учетом гетерогенного характера вулканизации, если предположить, что присоединение серы к макромолекулам определяется скоростью обмена различных фрагментов цепей у поверхности ДАВ. В условиях вулканизации скорость релаксации цепей меняется в ряду СКИ 3 < СКН-40 < СКД, что совпадает со степенью присоединения серы к каучукам в их смесях и не согласуется с вулканизационной активностью индивидуальных каучуков. Поэтому можно сделать вывод, что более подвижные цепи успевают большее число раз прореагировать с поверхностью ДАВ, как, например, у СКД и поэтому в смесях этого каучука с БНК, хотя и более химически активным, последний присоединяет меньшее количество серы вследствие меньшей подвижности цепей.

Таблица 1.

Коэффициенты распределения серы в вулканизатах смесей СКН-40 с каучуками СКД и СКИ-3 (1:1)

Table 1.

Sulfur distribution coefficients in vulcanizates of SKN-40 blends with SKD and SKI-3 rubbers (1:1)

Вулканизирующая группа / Vulcanizing group		Полимерная основа / Polymer base	
Содержание серы, мас. ч. на 100 мас. ч. каучука Sulfur content, phr	Ускоритель Accelerator	СКД + СКН-40 SKD + SKN-40	СКИ-3 + СКН-40 SKI-3 + SKN-40
2,0	Альтакс / Altax	1,45	0,85
5,0	Альтакс / Altax	2,45	0,88
5,0	Альтакс: ДФГ = 3:1 Altax: DFG = 3:1	1,82	0,84
5,0	Альтакс: ДФГ = 1:1 Altax: DFG = 1:1	2,15	0,84
2,0	Каптакс / Captax	1,65	0,90
5,0	Каптакс / Captax	2,45	0,88
5,0	Каптакс: ДФГ = 3:1 Captax: DFG = 1:1	2,14	0,80
5,0	Каптакс: ДФГ = 1:1 Captax: DFG = 1:1	1,95	0,85

На следующем этапе проведены исследования свойств резиновых смесей и вулканизаторов на основе исследуемых каучуков в присутствии комплексного активатора вулканизации. В ходе испытаний установлено, что введение активатора Вулкатив в резиновые смеси на основе

комбинации бутадиенового, бутадиен-нитрильного и изопренового каучуков позволяет получить резиновые смеси и вулканизаты, не уступающие по комплексу исследуемых свойств аналогам, в которых содержится оксид цинка (таблица 2).

Таблица 2.

Свойства резин с разными активаторами вулканизации

Table 2.

Properties of rubbers with different vulcanization activators

Показатель Indicators*	Активаторы вулканизации, мас. ч. Vulcanization activators, phr	
	Оксид цинка + стеариновая кислота = 4 + 1 Zinc oxide + stearic acid = 4 + 1	Вулкатив, 4 Vulcativ, 4
M_v , усл. ед. M_v , units	72,2	68,1
τ_s , мин τ_s , min	4,35	4,45
τ_{90} , мин τ_{90} , min	18,6	16,45
v , мин ⁻¹ v , min ⁻¹	7,1	8,3
f_p , МПа f_p , MPa	12,8	14,6
ε_p , %	415	475
θ , %	12	16
H_A , усл. ед. H_A , units	67	63
Изменение массы, СЖР-2 (100 °C × 24 ч), % Change in mass, SZhR-2 (100 °C × 24 h), %	11,5	10,2

* M_v – вязкость по Муни, ML 1 + 4 при 100 °C; τ_s – время начала вулканизации; τ_{90} – время оптимума вулканизации;

v – скорость вулканизации; f_p – условная прочность при растяжении; ε_p – относительное удлинение при разрыве;

θ – остаточное удлинение при разрыве; H_A – твердость по Шору А

M_v – Mooney viscosity, ML 1 + 4 at 100 °C; τ_s – vulcanization onset time; τ_{90} – vulcanization optimum time; v – vulcanization

rate; f_p – conventional tensile strength; ε_p – relative elongation at break; θ – residual elongation at break; H_A – Shore A hardness

При этом отмечено, что опытные вулканизаты характеризовались большей плотностью поперечных связей, высокими значениями констант скорости в главном периоде и имели большую стойкость к набуханию. Установленный факт улучшения прочностных показателей резин связан с формированием (во время синтеза комплексного активатора и начала процесса вулканизации) промежуточных комплексов оптимального строения и активности, что обуславливает в дальнейшем (на последних стадиях вулканизации) эффективное использование серы (на что указывает повышение концентрации поперечных связей). Коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия при -40° С у эталона и опытных образцов находился в пределах 0,46–0,50. При использовании активатора Вулкатив в сочетании с сульфенамидом коэффициент морозостойкости резин повышается, очевидно за счет образования преимущественно полисульфидных поперечных связей и снижения степени кристаллизации образцов.

Полученные данные могут быть связаны с изменением характера реакций при формировании действительных агентов вулканизации и образовании пространственной структуры смесей каучуков с использованием комплексного активатора вулканизации Вулкатив вместо оксида цинка, что требует проведения дополнительных исследований.

Заключение

Показано, что при разработке рецептуры маслобензостойких резин, эксплуатирующихся при низких температурах целесообразно сочетание бутадиенового / изопренового и бутадиен-нитрильного каучуков с учетом распределения серы между фазами совмещаемых полимеров, которое также зависит от типа применяемого ускорителя вулканизации.

Установлено, что применение опытных комплексных активаторов в рецептуре резиновых смесей на основе комбинации синтетического полиизопрена / полибутадиена с бутадиен-нитрильным каучуком обеспечивает улучшение комплекса вулканизационных характеристик резиновых смесей и физико-механических показателей вулканизаторов. По влиянию на кинетику вулканизации комплексный активатор вулканизации Вулкатив имеет преимущество по отношению к оксиду цинка, что подтверждается расчётными данными кинетических параметров процесса вулканизации. Кроме того, следует отметить, что использование активатора Вулкатив в рецептах резиновых смесей позволяет полностью заменить оксид цинка, в 3–4 раза снизить его содержание в резине и повысить экологическую безопасность готовой продукции, а уменьшение содержания дорогостоящего и экологически небезопасного компонента в составе резиновых смесей позволяет повысить рентабельность продукции.

Литература

- 1 Vayyaprontavida Kaliyathan A., Varghese K.M., Nair A.S. et al. Rubber–rubber blends: A critical review // Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. 2020. V. 36. № 3. P. 196–242.
- 2 Соколова М.Д., Шадрин Н.В., Давыдова М.Л. и др. Эластомерные материалы уплотнительного назначения для эксплуатации в условиях холодного климата России // Каучук и резина. 2018. Т. 77. № 6. С. 402–409.
- 3 Вахрушева Я.А., Юмашев О.Б., Чайкун А.М. Современные тенденции в области морозостойких резин на основе полярных и неполярных каучуков (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). С. 77–87. doi: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-77-87
- 4 Мухин В.В., Петрова Н.Н., Лазарева Н.Н. и др. Влияние состава и технологии изготовления композиций на структуру и свойства морозостойких резин на основе смесей полярных и неполярных каучуков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28. № 2. С. 346–357. doi: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-346-357
- 5 Каблов В.Ф., Новополец О.М., Спиридонова М.П., Крюкова Д.А. Резины со специальными свойствами. Волжский: ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолГТУ, 2020. URL: <http://lib.volpi.ru> (дата обращения: 06.03.2025).
- 6 Карманова О.В., Шутин Ю.Ф. Вулканизирующие системы в рецептуре резин на основе смесей каучуков // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 71–77.
- 7 Шершнева В.А. Развитие представлений о роли активаторов серной вулканизации углеводородных эластомеров. Часть 1 // Каучук и резина. 2012. № 1. С. 31.
- 8 Карманова О.В., Тихомиров С.Г., Попова Л.В., Фатнева А.Ю. Исследование свойств резин в присутствии композиционного активатора вулканизации // Каучук и резина. 2020. Т. 79. № 1. С. 28–31.
- 9 Bobrova V., Kasperovich A., Efremov S. et al. Effect of mechanical activation of natural filler on the properties of elastomeric composites // Polymers and Polymer Composites. 2024. V. 32. P. 09673911241287860. doi: 10.1177/09673911241287860
- 10 Пат. № 934374 СССР, МПК G01N 33/44. Способ оценки распределения модификатора в смесях частично совместимых полимеров / Шутин Ю.Ф.; Опубл. 21.05.1982. Бюл. № 21.
- 11 Alam M.N., Kumar V., Jeong S.U. et al. Enhancing rubber vulcanization cure kinetics: Lowering vulcanization temperature by addition of MgO as co-cure activator in ZnO-based cure activator systems // Polymers. 2024. V. 16. № 7. P. 876.
- 12 Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Semenov M.E. et al. Development of a Mathematical Model for Predicting the Physical and Mechanical Properties of Rubber When Introducing a Complex Vulcanization Activator // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. V. 58. № 6. P. 1991–1998.
- 13 Alam M.N., Kumar V., Jeong M. et al. MgO as a cure modifier for reducing the conventional rubber vulcanization temperature at water's boiling point with improved vulcanization kinetics // Journal of Polymer Research. 2024. V. 31. № 5. P. 141.
- 14 Milani G., Milani F. Relation between activation energy and induction in rubber sulfur vulcanization: An experimental study // Journal of Applied Polymer Science. 2021. V. 138. № 12. P. 50073.
- 15 Cataldo F. Thermochemistry of sulfur-based vulcanization and of devulcanized and recycled natural rubber compounds // International Journal of Molecular Sciences. 2023. V. 24. № 3. P. 2623.
- 16 Tayeb K.B., Eliard C., Vezin H. et al. In situ EPR investigation of sulfur vulcanization mechanism and ageing process // Polymer Degradation and Stability. 2022. V. 203. P. 110066.
- 17 Sun B., Li J., Xiang L. et al. Simulating vulcanization process during tire production to explore sulfur migration during pyrolysis // Fuel. 2022. V. 330. P. 125665.
- 18 Zhang P., Wei X., Huang T. et al. Prediction of thick rubber compression vulcanization process with improved vulcanization kinetics model considering temperature dependence and its initial state // Physics of Fluids. 2025. V. 37. № 9.
- 19 Yangthong H., Pichaiyut S., Wisunthorn S. et al. Role of geopolymer as a cure activator in sulfur vulcanization of epoxidized natural rubber // Journal of Applied Polymer Science. 2020. V. 137. № 17. P. 48624.
- 20 Kruželák J., Kvasničáková A., Džuganová M. et al. Sulfur and Peroxide Vulcanization of the Blends Based on Styrene–Butadiene Rubber, Ethylene–Propylene–Diene Monomer Rubber and Their Combinations // Materials. 2024. V. 17. № 11. P. 2718. doi: 10.3390/ma17112718
- 21 Cosa Fernandez E., Jover Carrasco C., Valentín J.L., Cervený S. Viscoelastic Properties and Sulfur Distribution at the Nanoscale in Binary Elastomeric Blends: Toward Phase-Specific Cross-Link Density Estimations // ACS Applied Polymer Materials. 2021. V. 3. № 2. P. 1106–1115.
- 22 Casalini T., Mauri M., Simonutti R., Castiglione F. Thermochemistry of Sulfur-Based Vulcanization and of Devulcanized and Recycled Natural Rubber Compounds // Materials. 2023. V. 16. № 4. P. 1489.

References

- 1 Dick J.S. (Ed.). Rubber Technology: Formulation and Testing: translated from English / ed. by V.A. Shershev. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies (NOT), 2010. 617 p. (in Russian).
- 2 Sokolova M.D., Shadrinov N.V., Davydova M.L. et al. Elastomeric Sealing Materials for Operation in Cold Climates of Russia. Rubber and Resin. 2018. vol. 77. no. 6. pp. 402–409. (in Russian).
- 3 Vakhruшева Ya.A., Yumashev O.B., Chaikun A.M. Modern Trends in the Field of Frost-Resistant Rubbers Based on Polar and Non-Polar Rubbers (Review). Proceedings of VIAM. 2022. no. 8 (114). pp. 77–87. doi: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-77-87 (in Russian).

- 4 Mukhin V.V., Petrova N.N., Lazareva N.N. et al. Influence of the Composition and Technology of Manufacturing Compositions on the Structure and Properties of Frost-Resistant Rubbers Based on Mixtures of Polar and Non-Polar Rubbers. *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*. 2023. vol. 28. no. 2. pp. 346–357. doi: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-346-357 (in Russian).
- 5 Kablov V.F., Novopol'tseva O.M., Spiridonova M.P., Kryukova D.A. Rubbers with Special Properties. Volzhsky: Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of Volgograd State Technical University, 2020. Available at: <http://lib.volpi.ru> (accessed: 06.03.2025) (in Russian).
- 6 Karmanova O.V., Shutilin Yu.F. Vulcanizing Systems in the Formulation of Rubbers Based on Rubber Blends. *Engineering Technologies*. 2024. no. 3 (7). pp. 71–77. (in Russian).
- 7 Shershnev V.A. Development of Ideas About the Role of Activators of Sulfur Vulcanization of Hydrocarbon Elastomers. Part 1. Rubber and Resin. 2012. no. 1. p. 31. (in Russian).
- 8 Karmanova O.V., Tikhomirov S.G., Popova L.V., Fatneva A.Yu. Investigation of Rubber Properties in the Presence of a Composite Vulcanization Activator. *Rubber and Resin*. 2020. vol. 79. no. 1. pp. 28–31. (in Russian).
- 9 Bobrova V., Kasperovich A., Efremov S. et al. Effect of mechanical activation of natural filler on the properties of elastomeric composites. *Polymers and Polymer Composites*. 2024. vol. 32. doi: 10.1177/09673911241287860.
- 10 Patent no. 934374, USSR, IPC G01N 33/44. Method for Assessing the Distribution of a Modifier in Mixtures of Partially Compatible Polymers. Shutilin Yu.F.; publ. 21.05.1982. Bull. no. 21. (in Russian).
- 11 Alam M.N., Kumar V., Jeong S.U. et al. Enhancing rubber vulcanization cure kinetics: Lowering vulcanization temperature by addition of MgO as co-cure activator in ZnO-based cure activator systems. *Polymers*. 2024. vol. 16. no. 7. article 876. doi: 10.3390/polym16070876.
- 12 Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Semenov M.E. et al. Development of a Mathematical Model for Predicting the Physical and Mechanical Properties of Rubber When Introducing a Complex Vulcanization Activator. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024. vol. 58. no. 6. pp. 1991–1998.
- 13 Alam M.N., Kumar V., Jeong M. et al. MgO as a cure modifier for reducing the conventional rubber vulcanization temperature at water's boiling point with improved vulcanization kinetics. *Journal of Polymer Research*. 2024. vol. 31. no. 5. article 141. doi: 10.1007/s10965-024-03873-0.
- 14 Milani G., Milani F. Relation between activation energy and induction in rubber sulfur vulcanization: An experimental study. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. vol. 138. no. 12. article 50073. doi: 10.1002/app.50073.
- 15 Cataldo F. Thermochemistry of sulfur-based vulcanization and of devulcanized and recycled natural rubber compounds. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. vol. 24. no. 3. article 2623. doi: 10.3390/ijms24032623.
- 16 Tayeb K.B., Eliard C., Vezin H. et al. In situ EPR investigation of sulfur vulcanization mechanism and ageing process. *Polymer Degradation and Stability*. 2022. vol. 203. article 110066. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110066.
- 17 Sun B., Li J., Xiang L. et al. Simulating vulcanization process during tire production to explore sulfur migration during pyrolysis. *Fuel*. 2022. vol. 330. article 125665. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125665.
- 18 Zhang P., Wei X., Huang T. et al. Prediction of thick rubber compression vulcanization process with improved vulcanization kinetics model considering temperature dependence and its initial state. *Physics of Fluids*. 2025. vol. 37. no. 9. doi: 10.1063/5.0236499.
- 19 Yangthong H., Pichaiyut S., Wisunthorn S. et al. Role of geopolymer as a cure activator in sulfur vulcanization of epoxidized natural rubber. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. vol. 137. no. 17. article 48624. doi: 10.1002/app.48624.
- 20 Kruželák J., Kvasničáková A., Džuganová M. et al. Sulfur and Peroxide Vulcanization of the Blends Based on Styrene–Butadiene Rubber, Ethylene–Propylene–Diene Monomer Rubber and Their Combinations. *Materials*. 2024. vol. 17. no. 11. article 2718. doi: 10.3390/ma17112718.
- 21 Cosa Fernandez E., Jover Carrasco C., Valentín J.L., Cervený S. Viscoelastic Properties and Sulfur Distribution at the Nanoscale in Binary Elastomeric Blends: Toward Phase-Specific Cross-Link Density Estimations. *ACS Applied Polymer Materials*. 2021. vol. 3. no. 2. pp. 1106–1115. doi: 10.1021/acsapm.0c01361.
- 22 Casalini T., Mauri M., Simonutti R., Castiglione F. Thermochemistry of Sulfur-Based Vulcanization and of Devulcanized and Recycled Natural Rubber Compounds. *Materials*. 2023. vol. 16. no. 4. article 1489. doi: 10.3390/ma16041489.

Сведения об авторах

Ольга В. Карманова д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-tospp@vsuet.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Юрий Ф. Шутилин д.т.н., профессор, кафедра технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, shuf777@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-0252-726X>

Information about authors

Olga V. Karmanova Dr. Sci. (Engin.), professor, head of department, of technology of organic compounds and processings of polymers department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-tospp@vsuet.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Yuri Shutilin Dr. Sci. (Engin.), Professor, technology of organic compounds and processings of polymers department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, shuf777@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-0252-726X>

Александр А. Голякевич к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sasha4292@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-4206-8874>

Екатерина А. Меренкова магистр, кафедра профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-tos — pp@vsuet.ru

Alexander A. Golyakevich Cand. Sci. (Engin.), senior lecturer, technology of organic compounds and processings of polymers department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394014, Russia, sasha4292@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-4206-8874>

Ekaterina A. Merenkova master's student, technology of organic compounds and processings of polymers department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Voronezh state university of engineering technologies, Russia, kaf-tos — pp@vsuet.ru

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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 10/11/2025	После редакции 24/11/2025	Принята в печать 08/12/2025
Received 10/11/2025	Accepted in revised 24/11/2025	Accepted 08/12/2025

Анализ качества проб воды скважины СНТ «Здоровье»

Захар А. Иванов	¹	zaharivanov53345@gmail.com	 0009-0009-0682-897X
Владислава И. Федорова	¹	carrynovak@gmail.com	 0009-0000-1759-5985
Александра Е. Васюк	¹	aleksandra.vasyuk@mail.ru	 0009-0009-9365-572X
Ольга А. Есякова	¹	olga-la83@mail.ru	 0000-0003-3819-0543

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31 г. Красноярск, 660037, Россия

Аннотация. Статья посвящена исследованию качества воды, извлекаемой из скважины садового некоммерческого товарищества «Здоровье» в городе Красноярске. Проведён комплексный анализ основных физико-химических и микробиологических характеристик воды за период с 2023 по 2025 год. Оценка проводилась в соответствии с требованиями СанПиН 2.1.3684–21 и нормативами Всемирной организации здравоохранения. Определялись такие показатели, как pH, жёсткость, содержание железа, магния, нитрат-ионов, хлорид-ионов, сульфат-ионов, сухой остаток, перманганатная окисляемость, а также микробиологические параметры — общее микробное число, колиформные бактерии и *E. coli*. Полученные результаты показали значительное снижение концентрации нитрат-ионов с 92 мг/л в 2023 году до 80 мг/л в 2025 году, что свидетельствует о положительной динамике улучшения качества воды. Вместе с тем содержание нитратов по-прежнему превышает предельно допустимую концентрацию (45 мг/л). По остальным исследованным показателям вода соответствует установленным нормативам на протяжении всего периода наблюдений. Общая минерализация оставалась стабильной в диапазоне 460–480 мг/л, а микробиологическое загрязнение не было выявлено ни в одном из периодов исследования. Несмотря на достижение позитивных тенденций, отмечается важность постоянного мониторинга качества воды для предотвращения потенциальных угроз здоровью местного населения. Исследователи подчёркивают необходимость регулярной оценки состава воды, поскольку высокие уровни нитратов представляют опасность для организма, способствуя развитию метгемоглобинемии, онкологических заболеваний и нарушений функций щитовидной железы. Среди вероятных причин снижения содержания нитратов рассматриваются изменение гидрогеологических условий, уменьшение агрохимической нагрузки и повышение экологической осведомлённости населения. Результаты работы подтверждают эффективность принимаемых мер и обосновывают необходимость продолжения систематического контроля качества подземных водных источников.

Ключевые слова: качество воды, физико-химические показатели, здоровье населения, нормирование загрязнения.

Quality analysis of water samples from the snt "Zdorovyie" well

Zakhar A. Ivanov	¹	zaharivanov53345@gmail.com	 0009-0009-0682-897X
Vladislava I. Fedorova	¹	carrynovak@gmail.com	 0009-0000-1759-5985
Aleksandra E. Vasyuk	¹	aleksandra.vasyuk@mail.ru	 0009-0009-9365-572X
Olga A. Esyakova	¹	olga-la83@mail.ru	 0000-0003-3819-0543

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Revolution 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt Krasnoyarsk, 660037, Russia

Abstract. This paper presents the findings of a comprehensive water quality assessment conducted on a well water source within the horticultural non-commercial partnership "Zdorovyie" located in the city of Krasnoyarsk. A systematic analysis of key physicochemical and microbiological parameters was carried out over a three-year monitoring period (2023–2025). The evaluation was performed in accordance with the regulatory requirements of SanPiN 2.1.3684–21 and the guidelines established by the World Health Organization (WHO). The scope of the analysis encompassed the determination of pH, total hardness, iron (Fe), magnesium (Mg), nitrate ions (NO_3^-), chloride ions (Cl^-), sulfate ions (SO_4^{2-}), total dissolved solids (TDS), permanganate oxidizability, as well as microbiological indicators including total bacterial count, total coliform bacteria, and *E. coli*. The results demonstrated a notable reduction in nitrate ion concentration from 92 mg/dm³ in 2023 to 80 mg/dm³ in 2025, indicating a positive trend in water quality improvement. Nevertheless, nitrate levels continue to exceed the maximum permissible concentration (MPC) of 45 mg/dm³. All remaining parameters were found to comply with established regulatory standards throughout the entire observation period. Total dissolved solids remained stable within the range of 460–480 mg/dm³, and no microbiological contamination was detected in any of the sampling periods. Despite the observed positive trends, the importance of continuous water quality monitoring is emphasized to mitigate potential public health risks. The authors underscore the necessity of regular water composition assessment, as elevated nitrate levels pose significant health hazards, including methemoglobinemia, increased carcinogenic risk, and thyroid dysfunction. Probable contributing factors to the observed nitrate reduction include changes in hydrogeological conditions, decreased agrochemical loading, and improved environmental awareness among the local population. The findings confirm the efficacy of implemented remedial measures and substantiate the need for continued systematic monitoring of groundwater sources.

Keywords: water quality, physical and chemical parameters, public health, pollution regulation..

Для цитирования

Иванов З.А., Федорова В.И., Васюк А.Е., Есякова О.А. Анализ качества проб воды скважины СНТ «Здоровье» // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 4. С. 226–232. doi:10.20914/2310-1202-2025-4-226-232

For citation

Ivanov Z.A., Fedorova V.I., Vasyuk A.E., Esyakova O.A. Quality analysis of water samples from the snt "Zdorovyie" well. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 226–232. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-4-226-232

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

Введение

Качество питьевой воды является глобальной экологической проблемой современного человечества. Вода является одним из ключевых факторов здоровья человека. Практически все её источники подвергаются антропогенному и техногенному воздействию разной интенсивности. Наличие в воде некоторых примесей определяет её качество.

Анализ качества воды является ключевым инструментом в оценке состояния водных ресурсов и обеспечении безопасности питьевой воды для населения. С увеличением загрязнения окружающей среды и угрозы для здоровья населения, проведение систематического мониторинга качества воды становится неотъемлемой частью управления водными ресурсами и экологической безопасности.

Материалы и методы

Исследования проводились в течение трёх лет (2023–2025 гг.) и включали комплексный анализ основных физико-химических и микробиологических параметров воды.

Требования (нормативы), которым должна соответствовать вода, предельно-допустимые концентрации (ПДК) веществ, изложены в санитарных нормах и правилах РФ (СанПиН 2.1.3684–21 "Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде

и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий") [1] и международных нормативах Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [2].

Целью отбора проб является получение дискретной пробы, отражающей качество исследуемой воды. Пробы отбирались вручную специальными приспособлениями или с применением автоматизированного оборудования [3]. Отбор проводился в одинаковых условиях, обеспечивая сопоставимость полученных данных.

Качество питьевой воды является одним из основных факторов, влияющих на здоровье человека. Снабжение населения питьевой водой надлежащего качества является важным элементом обеспечения социально-экономического развития территории и санитарно-эпидемиологического благополучия населения.

Неудовлетворительное качество питьевой воды является причиной высокого уровня заболеваемости населения. При этом имеет значение не только исходный состав загрязняющих веществ в воде, но и вторичное загрязнение воды в распределительных сетях, на стадиях технологического процесса водоподготовки [4].

Результаты

Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты исследований проб скважинной воды в 2023 г.

Table 1.

Results of well water sample tests in 2023

Показатель	Результат	Погрешность	НД на метод испытаний
E.coli, КОЕ в 100 мл E. coli, CFU/100 ml	–	–	МУК 4.2.1884–04 Приложение 3
pH	7,6	0,2	ФР 1.31.2018.30110
Fe, мг/дм ³ Fe, mg/dm ³	< 0,05	–	ПНД Ф 14.1:2:4.135–98
Жесткость, °Ж Hardness, °F	7,2	1,1	ГОСТ 31954–2012
Mg, мг/дм ³ Mg, mg/dm ³	< 0,001	–	ПНД Ф 14.1:2:4.135–98
Нитрат-ион, мг/дм ³ Nitrate ion, mg/dm ³	92	9	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)
Общее микробное число при 37 °C, КОЕ/мл Total bacterial count at 37°C, CFU/ml	<1	–	МУК 4.2.1018–01, п. 8.1
Общее (обобщенные) колиформные бактерии, КОЕ в 100 мл Total (summary) coliform bacteria, CFU/100 ml	–	–	МУК 4.2.1018–01, п. 8.2
Перманганатная окисляемость, мг/дм ³ Permanganate oxidizability, mg/dm ³	0,76	0,15	ПНД Ф 14.1:2:4.154–99
Сульфат-ион Sulfate ion,	45	4	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)
Сухой остаток Dry residue,	460	40	ПНД Ф 14.1:2:4.114–97
Хлорид-ион, мг/дм ³ Chloride ion, mg/dm ³	19,6	2,0	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)

Нормативы качества воды для нецентрализованного водоснабжения согласно [1] представлены в таблице 2.

Таблица 2.
Нормативы определяемых показателей
питьевой воды

Table 2.
Standards for Determinable Indicators
of Drinking Water

Показатель	Норма
pH	6,0–9,0
Нитрат-ион, мг/дм ³ Nitrate ion, mg/dm ³	≤45
Хлорид-иод, мг/дм ³ Chloride-iodine, mg/dm ³	≤350
Сульфат-ион, мг/дм ³ Sulfate ion, mg/dm ³	≤500
Перманганатная окисляемость, мг/дм ³ Permanganate oxidizability, mg/dm ³	≤7,0
Жесткость общая, мг-экв/дм ³ Total hardness, mg-eq/dm ³	≤10,0
Сухой остаток, мг/дм ³ Dry residue, mg/dm ³	≤1500
Fe, мг/дм ³ Fe, mg/dm ³	≤0,3
Mn, мг/дм ³ Mn, mg/dm ³	≤0,1

Сопоставив полученные результаты исследований и установленных норм, предъявляемые к химическим показателям питьевой воды, можно сделать следующие выводы:

- водородные показатель в пределах нормы;
- содержание нитрат-иона: выявлено превышение допустимой нормы в 2 раза;
- хлорид-ион в пределах нормы;
- сульфат-ион в пределах нормы;
- перманганатная окисляемость не превышает допустимых норм;
- жесткость воды в диапазоне допустимых значений;
- сухой остаток не превышает нормированного значения;
- содержание железа в пробах воды допустимое;
- содержание марганца в норме.

Установленное превышение содержания нитрат-ионов (NO_3^-) в питьевой воде может представлять серьезную опасность для здоровья человека, особенно детей младшего возраста. Класс опасности нитратов в воде – третий. Данные соединения способны накапливаться в человеческом организме, если регулярно поступают в него в количествах, превышающих допустимые показатели. Основные риски для здоровья человека в связи с повышенным содержанием нитрат-ионов в воде:

1. метгемоглобинемия. Нитраты могут трансформироваться в организме в нитриты (NO_2^-), которые взаимодействуют с гемоглобином крови, образуя метгемоглобин. Метгемоглобин не способен переносить кислород, что приводит к кислородному голоданию тканей. У младенцев это состояние известно, как "синдром голубого ребенка" (метгемоглобинемия).

2. риск развития онкологических заболеваний. Длительное употребление воды с высоким содержанием нитратов связано с повышенным риском новообразований в организме, включая рак желудка.

3. нарушение функций щитовидной железы. Высокие уровни нитратов могут негативно повлиять на функционирование щитовидной железы, подавляя выработку гормонов.

4. другие негативные эффекты. Возможны проблемы с пищеварением, головные боли, усталость и другие симптомы интоксикации [5].

Согласно СанПиН 2.1.3684–21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий», рекомендуется ежегодное проведение лабораторного анализа качества воды из индивидуальных скважин и колодцев. Это обусловлено необходимостью постоянного мониторинга состояния подземных источников, так как они подвержены различным видам загрязнений, включая бактериальное заражение и попадание токсичных элементов.

Особенное внимание уделяется показателям, связанным с потенциальной опасностью для здоровья населения, таким как содержание нитрат-ионов. Поскольку в ходе проведенного исследования было зафиксировано превышение допустимых концентраций нитрата (92 мг/л при нормативе 45 мг/л), регулярный контроль становится критически важным. Именно поэтому настоятельно рекомендуются проводить анализ качества воды не реже одного раза в год для выявления возможных рисков и принятия необходимых профилактических мер [6].

В связи с этим помимо первоначального исследования, проведенного в 2023 году, были осуществлены повторные замеры и оценка качества воды в последующие периоды: 2024 и 2025 годы. Эти дополнительные исследования позволили проследить динамику изменений

в составе и свойствах воды, используемой жителями СНТ «Здоровье».

Отбор проб производился аналогично предыдущему исследованию, соблюдая стандартные методики и протоколы, предусмотренные действующими нормами и правилами.

Лабораторные испытания проводились квалифицированными специалистами с использованием сертифицированных методов и приборов, обеспечивающих высокую точность и надёжность полученных данных [7].

Таблица 3.

Результаты исследований проб скважинной воды в 2024 г.

Table 3.

Results of tests of well water samples in 2024

Показатель	Результат	Погрешность	НД на метод испытаний
E.coli, КОЕ в 100 мл E. coli, CFU/100 ml	–	-	МУК 4.2.1884–04 Приложение 3
pH	7,4	0,2	ФР 1.31.2018.30110
Fe, мг/дм ³ Fe, mg/dm ³	<0,05	-	ПНД Ф 14.1:2:4.135–98
Жесткость, °Ж Hardness, °F	7,4	1,1	ГОСТ 31954–2012
Mg, мг/дм ³ Mg, mg/dm ³	<0,001	-	ПНД Ф 14.1:2:4.135–98
Нитрат-ион, мг/дм ³ Nitrate ion, mg/dm ³	85	9	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)
Общее микробное число при 37 °С, КОЕ/мл Total bacterial count at 37°C, CFU/ml	<1	-	МУК 4.2.1018–01, п. 8.1
Общее (обобщенные) колиформные бактерии, КОЕ в 100 мл Total (summary) coliform bacteria, CFU/100 ml	–	-	МУК 4.2.1018–01, п. 8.2
Перманганатная окисляемость, мг/дм ³ Permanganate oxidizability, mg/dm ³	0,8	0,15	ПНД Ф 14.1:2:4.154–99
Сульфат-ион Sulfate ion,	47	4	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)
Сухой остаток Dry residue,	470	40	ПНД Ф 14.1:2:4.114–97
Хлорид-ион, мг/дм ³ Chloride ion, mg/dm ³	21,5	2,0	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)

Таблица 4.

Результаты исследований проб скважинной воды в 2025 г.

Table 4.

Results of research on well water samples in 2025

Показатель	Результат	Погрешность	НД на метод испытаний
E.coli, КОЕ в 100 мл E. coli, CFU/100 ml	–	-	МУК 4.2.1884–04 Приложение 3
pH	7,5	0,2	ФР 1.31.2018.30110
Fe, мг/дм ³ Fe, mg/dm ³	<0,05	-	ПНД Ф 14.1:2:4.135–98
Жесткость, °Ж Hardness, °F	7,3	1,1	ГОСТ 31954–2012
Mg, мг/дм ³ Mg, mg/dm ³	<0,001	-	ПНД Ф 14.1:2:4.135–98
Нитрат-ион, мг/дм ³ Nitrate ion, mg/dm ³	80	9	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)
Общее микробное число при 37 °С, КОЕ/мл Total bacterial count at 37°C, CFU/ml	<1	-	МУК 4.2.1018–01, п. 8.1
Общее (обобщенные) колиформные бактерии, КОЕ в 100 мл Total (summary) coliform bacteria, CFU/100 ml	–	-	МУК 4.2.1018–01, п. 8.2
Перманганатная окисляемость, мг/дм ³ Permanganate oxidizability, mg/dm ³	0,85	0,15	ПНД Ф 14.1:2:4.154–99
Сульфат-ион Sulfate ion,	48	4	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)
Сухой остаток Dry residue,	480	40	ПНД Ф 14.1:2:4.114–97
Хлорид-ион, мг/дм ³ Chloride ion, mg/dm ³	22,0	2,0	ПНД Ф 14.1:2:3:4.282–18 (М 01–58–2018)

Обсуждение

Проведение сравнительного анализа за три года показывает устойчивое улучшение качества воды по большинству изученных параметров:

1. Содержание нитратов. Значительно снизилось с 92 мг/л в 2023 году до 80 мг/л в 2025 году.

2. Общая минерализации. Остается стабильной около отметки 460–480 мг/л, оставаясь ниже предельно допустимых уровней.

3. Химическое загрязнение. Сохраняется на минимальном уровне [8].

Расширенный временной охват исследований позволил установить положительную динамику улучшений качества воды, подчеркивая важность регулярного мониторинга для защиты здоровья местных жителей [9].

Снижение содержания нитрат-ионов в питьевой воде может быть вызвано несколькими факторами:

1. Изменение гидрогеологических условий. Могли произойти природные процессы, повлиявшие на распределение грунтовых вод, в результате чего произошло разбавление ранее накопившихся нитратов свежей чистой водой.

2. Повышение осведомленности пользователей. Население могло начать соблюдать рекомендации по правильному обращению с удобрениями и отходами жизнедеятельности, что уменьшило количество поступающего в почву азота.

3. Мероприятия по снижению агрохимической нагрузки. Проведение работ по уменьшению количества вносимых азотосодержащих удобрений вблизи зоны водозабора, что способствовало значительному сокращению поступления нитратов в воду.

4. Поддержание благоприятных экологических условий вокруг водозаборной площадки. Улучшение ухода за территорией рядом со скважиной, уменьшение риска попадания органических отходов и химикатов в грунтовые воды.

Эти факторы совместно могли способствовать заметному снижению уровня нитратов в воде, зафиксированному в результатах наших исследований за 2024 и 2025 годы [10].

Заключение

Мониторинг подтверждает положительное влияние мероприятий по очистке и контролю качества воды в скважинах СНТ «Здоровье».

В заключении следует отметить, что систематический мониторинг качества питьевой воды на химические и микробиологические показатели важен по следующим причинам:

1. Обеспечение безопасности для здоровья населения. Питьевая вода должна соответствовать установленным стандартам качества, чтобы минимизировать риск заболеваний, связанных с употреблением загрязненной воды химическими веществами. Регулярные анализы позволяют выявить наличие вредных примесей, таких как тяжелые металлы, пестициды, нитраты и другие потенциально опасные вещества, которые могут накапливаться в организме и вызывать хронические заболевания.

2. Контроль источников загрязнения. Оценка химического состава воды способствует выявлению источников загрязнений и своевременному принятию мер по их устранению. Например, если в воде обнаруживаются повышенные концентрации нитратов, это может указывать на сельскохозяйственное загрязнение (использование удобрений) или утечки из канализационных систем. Раннее выявление проблем позволяет оперативно реагировать и предотвращать дальнейшее ухудшение качества воды.

3. Информирование населения. Публикация результатов регулярных исследований питьевых вод позволяет населению быть в курсе качества питьевой воды в районе своего проживания.

Литература

- 1 Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 2.1.3684–21 "Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий": постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 янв. 2021 г. № 3. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102090643&backlink=1&nd=602024221> (дата обращения: 17.03.2025).
- 2 Islam S., Khan S.A., Ahmad I. Hydro-Chemical Interpretations of Seasonal and Spatial Controls of Nitrate and Manganese as Natural Background Proxy in Riverside Shallow Alluvial Aquifer, India // SSRN Electronic Journal. 2024. Paper ID 4942274. doi: 10.2139/ssrn.4942274
- 3 Доронькин Р.В. Конкуренция норм по отбору проб воды в целях исполнения обязанностей, предусмотренных экологическим законодательством // International Journal of Professional Science. 2022. № 9. С. 56–70.
- 4 Новикова Ю.А., Май И.В., Сенотрусова А.Ю. и др. К вопросу оценки качества питьевой воды систем централизованного водоснабжения в современных условиях // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 6. С. 563–568.
- 5 Essien E.E., Said Abasse K., Côté A. et al. Drinking-water nitrate and cancer risk: A systematic review and meta-analysis // Archives of Environmental & Occupational Health. 2022. V. 77. № 1. P. 51–67. doi: 10.1080/19338244.2021.1922317
- 6 Спирина В.Ю. Химический анализ воды из разных природных источников // Мечниковские чтения 2024: мат. 97-й Всерос. науч.-практ. конф. студ. науч. о-ва с междунар. участием, Санкт-Петербург, 24–26 апр. 2024 г. СПб.: СЗГМУ им. И.И. Мечникова, 2024. С. 276–278.
- 7 Штефанова Т.Г., Безуглов И.Д., Прокшиц В.Н. Физико-химический анализ образцов природных вод Волго-Ахтубинской поймы // Грани познания. 2020. № 1 (66). С. 43–47.
- 8 Гаджиева С.Р., Алиева Т.И. Химический анализ природных вод на территории Астаринского района Азербайджана // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития: сб. науч. тр. по мат. Междунар. науч. экол. конф., Краснодар, 24–26 марта 2020 г. / сост. Л.С. Новополецкая; под ред. И.С. Белюченко. Краснодар: КубГАУ, 2020. С. 331–333.
- 9 Трубочева Л.В., Лоханина С.Ю., Белова Т.И. Применение ряда физико-химических методов анализа в ходе аттестации многокомпонентного образца состава воды природной // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16. № 2. С. 41–55. doi: 10.20915/2687-0886-2020-16-2-41-55
- 10 Харлямов Д.А., Смирнова Н.Н., Шарафутдинов Р.Н., Маврин Г.В. Оценка качества подземных вод территорий с разной антропогенно-техногенной нагрузкой // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2-2 (116). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-podzemnyh-vod-territoriy-s-raznoy-antropogenno-tehnogennoy-nagruzkoj> (дата обращения: 22.12.2024).

- 11 Борисова Д.С., Еремин Г.Б., Никуленков А.М., Мозжухина Н.А. Анализ международного законодательства в области обеспечения защиты подземных источников водоснабжения (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100. № 8. С. 797–802.
- 12 Зайцева Н.В., Клейн С.В., Май И.В. и др. Риск для здоровья населения и эффективность мероприятий по повышению качества питьевой воды централизованных систем водоснабжения // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 11. С. 1403–1411.
- 13 Lin L., St Clair S., Gamble G.D. et al. Nitrate contamination in drinking water and adverse reproductive and birth outcomes: a systematic review and meta-analysis // Scientific Reports. 2023. V. 13. № 1. P. 563. doi: 10.1038/s41598-023-35706-3
- 14 Marhamati M., Afshari A., Kiani B. et al. Nitrite and nitrate levels in groundwater, water distribution network, bottled water and juices in Iran: a systematic review // Current Pharmaceutical Biotechnology. 2021. V. 22. № 10. P. 1325–1337. doi: 10.2174/1389201021666201124141905
- 15 Picetti R., Deeney M., Pastorino S. et al. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis // Environmental Research. 2022. V. 210. P. 112988. doi: 10.1016/j.envres.2022.112988
- 16 Nayar R. Assessment of water quality index and monitoring of pollutants by physico-chemical analysis in water bodies: a review // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020. V. 9. № 01. P. 178–185.
- 17 Verma S., Verma S., Ramakant R. et al. Comprehensive Assessment of Physico-Chemical and Biological Parameters in Water Quality Monitoring: A Review of Contaminants, Indicators, and Health Impacts // International Journal of Horticulture, Agriculture and Food science. 2025. V. 9. № 2. P. 611019.
- 18 Bozorg-Haddad O., Delpasand M., Loáiciga H.A. Water quality, hygiene, and health // Economical, Political, and Social Issues in Water Resources. Elsevier, 2021. P. 217–257.
- 19 Soceanu A., Dobrinas S., Dumitrescu C.I. et al. Physico-chemical parameters and health risk analysis of groundwater quality // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 11. P. 4775. doi: 10.3390/app11114775
- 20 Abu Bakar N., Othman N., Yunus Z.M. et al. Physico-chemical water quality parameters analysis on textile // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 498. № 1. P. 012077. doi: 10.1088/1755-1315/498/1/012077
- 21 Vasistha P., Ganguly R. Water quality assessment of natural lakes and its importance: An overview // Materials Today: Proceedings. 2020. V. 32. P. 544–552. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.093

References

- 1 On the Approval of Sanitary Rules and Norms SanPiN 2.1.3684-21 "Sanitary and Epidemiological Requirements for the Maintenance of Territories of Urban and Rural Settlements, Water Bodies, Drinking Water and Drinking Water Supply, Atmospheric Air, Soils, Living Quarters, Operation of Industrial, Public Premises, Organization and Conduct of Sanitary and Anti-Epidemic (Preventive) Measures": Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 No. 3. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102090643&backlink=1&nd=602024221> (accessed: 17.03.2025) (in Russian).
- 2 Islam S., Khan S.A., Ahmad I. Hydro-Chemical Interpretations of Seasonal and Spatial Controls of Nitrate and Manganese as Natural Background Proxy in Riverside Shallow Alluvial Aquifer, India. SSRN Electronic Journal. 2024. Paper ID 4942274. doi: 10.2139/ssrn.4942274.
- 3 Doronkin R.V. Competition of Norms on Water Sampling for the Purpose of Fulfilling Obligations Provided for by Environmental Legislation. International Journal of Professional Science. 2022. no. 9. pp. 56–70. (in Russian).
- 4 Novikova Yu.A., Mai I.V., Senotrusova A.Yu. et al. On the Issue of Assessing the Quality of Drinking Water in Centralized Water Supply Systems in Modern Conditions. Hygiene and Sanitation. 2020. vol. 99. no. 6. pp. 563–568. (in Russian).
- 5 Essien E.E., Said Abasse K., Côté A. et al. Drinking-water nitrate and cancer risk: A systematic review and meta-analysis. Archives of Environmental & Occupational Health. 2022. vol. 77. no. 1. pp. 51–67. doi: 10.1080/19338244.2021.1922317.
- 6 Spirina V.Yu. Chemical Analysis of Water from Various Natural Sources. In: Mechnikov Readings 2024: Proceedings of the 97th All-Russian Scientific and Practical Conference of the Student Scientific Society with International Participation, Saint Petersburg, April 24–26, 2024. Saint Petersburg: North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, 2024. pp. 276–278. (in Russian).
- 7 Shtefanova T.G., Bezuglov I.D., Prokshits V.N. Physico-Chemical Analysis of Natural Water Samples from the Volga-Akhtuba Floodplain. Grani Poznaniya. 2020. no. 1 (66). pp. 43–47. (in Russian).
- 8 Gadzhieva S.R., Alieva T.I. Chemical Analysis of Natural Waters in the Territory of the Astara District of Azerbaijan. In: Agrarian Landscapes, Their Stability and Development Features: Collection of Scientific Papers based on the Materials of the International Scientific Environmental Conference, Krasnodar, March 24–26, 2020 / comp. L.S. Novopol'tseva; ed. I.S. Belyuchenko. Krasnodar: KubSAU, 2020. pp. 331–333. (in Russian).
- 9 Trubacheva L.V., Lokhanina S.Yu., Belova T.I. Application of a Number of Physico-Chemical Methods of Analysis in the Course of Certification of a Multicomponent Sample of Natural Water Composition. Standards. Reference Materials. 2020. vol. 16. no. 2. pp. 41–55. doi: 10.20915/2687-0886-2020-16-2-41-55 (in Russian).
- 10 Kharlyamov D.A., Smirnova N.N., Sharafutdinov R.N., Mavrin G.V. Assessment of Groundwater Quality in Territories with Different Anthropogenic and Technogenic Load. International Research Journal. 2022. no. 2-2 (116). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-podzemnyh-vod-territoriy-s-raznoy-antropogennno-tehnogennoy-nagruzkoy> (accessed: 22.12.2024) (in Russian).
- 11 Borisova D.S., Eremine G.B., Nikulenkov A.M., Mozhukhina N.A. Analysis of International Legislation in the Field of Ensuring the Protection of Underground Water Supply Sources (Literature Review). Hygiene and Sanitation. 2021. vol. 100. no. 8. pp. 797–802. (in Russian).

- 12 Zaitseva N.V., Klein S.V., Mai I.V. et al. Risk to Public Health and the Effectiveness of Measures to Improve the Quality of Drinking Water from Centralized Water Supply Systems. *Hygiene and Sanitation*. 2022. vol. 101. no. 11. pp. 1403–1411. (in Russian).
- 13 Lin L., St Clair S., Gamble G.D. et al. Nitrate contamination in drinking water and adverse reproductive and birth outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*. 2023. vol. 13. no. 1. article 563. doi: 10.1038/s41598-023-35706-3.
- 14 Marhamati M., Afshari A., Kiani B. et al. Nitrite and nitrate levels in groundwater, water distribution network, bottled water and juices in Iran: a systematic review. *Current Pharmaceutical Biotechnology*. 2021. vol. 22. no. 10. pp. 1325–1337. doi: 10.2174/1389201021666201124141905.
- 15 Picetti R., Deeney M., Pastorino S. et al. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. *Environmental Research*. 2022. vol. 210. article 112988. doi: 10.1016/j.envres.2022.112988.
- 16 Nayar R. Assessment of water quality index and monitoring of pollutants by physico-chemical analysis in water bodies: a review. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020. vol. 9. no. 01. pp. 178–185.
- 17 Verma S., Verma S., Ramakant R. et al. Comprehensive Assessment of Physico-Chemical and Biological Parameters in Water Quality Monitoring: A Review of Contaminants, Indicators, and Health Impacts. *International Journal of Horticulture, Agriculture and Food science*. 2025. vol. 9. no. 2. article 611019.
- 18 Bozorg-Haddad O., Delpasand M., Loáiciga H.A. Water quality, hygiene, and health. In: *Economical, Political, and Social Issues in Water Resources*. Elsevier, 2021. pp. 217–257.
- 19 Soceanu A., Dobrină S., Dumitrescu C.I. et al. Physico-chemical parameters and health risk analysis of groundwater quality. *Applied Sciences*. 2021. vol. 11. no. 11. article 4775. doi: 10.3390/app11114775.
- 20 Abu Bakar N., Othman N., Yunus Z.M. et al. Physico-chemical water quality parameters analysis on textile. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. vol. 498. no. 1. article 012077. doi: 10.1088/1755-1315/498/1/012077.
- 21 Vasistha P., Ganguly R. Water quality assessment of natural lakes and its importance: An overview. *Materials Today: Proceedings*. 2020. vol. 32. pp. 544–552. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.093.

Сведения об авторах

Захар А. Иванов магистрант, кафедра промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, 19, г. Красноярск, 660037, Россия, zaharivanov53345@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0009-0682-897X>

Владислава И. Федорова магистрант, кафедра промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, 19, г. Красноярск, 660037, Россия, carrynovak@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0000-1759-5985>

Александра Е. Васюк ассистент, кафедра промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, 19, г. Красноярск, 660037, Россия, aleksandra.vasyuk@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0009-9365-572X>

Ольга А. Есякова к.б.н., доцент, зав. кафедрой ПЭП, кафедра промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, 19, г. Красноярск, 660037, Россия, olga-la83@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-3819-0543>

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

Zakhar A. Ivanov master's student, industrial ecology, chemical production processes and apparatuses department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, zaharivanov53345@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0009-0682-897X>

Vladislava I. Fedorova master's student, industrial ecology, chemical production processes and apparatuses department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, carrynovak@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0000-1759-5985>

Aleksandra E. Vasyuk assistant, industrial ecology, chemical production processes and apparatuses department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, aleksandra.vasyuk@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0009-9365-572X>

Olga A. Esyakova Cand. Sci. (Biol.), associate professor, head of department of PEP, industrial ecology, chemical production processes and apparatuses department, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, olga-la83@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-3819-0543>

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/11/2025	После редакции 19/11/2025	Принята в печать 10/12/2025
Received 03/11/2025	Accepted in revised 19/11/2025	Accepted 10/12/2025

Требования к оформлению материалов для журнала «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий»

Редакция просит авторов в подготовке рукописей руководствоваться изложенными ниже правилами. Рукописи, оформленные без соблюдения данных правил, редакцией рассматриваться не будут.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РУКОПИСЕЙ И ЗАЯВЛЕНИЕ НА РАССМОТРЕНИЕ

Представление рукописи в журнал «ВЕСТНИК ВГУИТ» для печати предполагает, что:

- 1) описанная в ней работа ранее не была опубликована;

- 2) она не рассматривается для публикации в ином издательстве;

- 3) ее публикация была одобрена всеми авторами и так или иначе взаимосвязанными организациями, в которых эта работа проводилась;

- 4) в случае принятия к публикации эта статья не будет опубликована где-либо еще в той же форме, на английском или на любом другом языке, в том числе и в электронном виде.

Представление статьи проводят через официальный сайт издания путем прохождения регистрации (<http://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/user/register>).

В состав электронной версии статьи должны входить:

1. Рукопись статьи оформленная строго в шаблоне редакции в формате Word 2007–2016. Word 2003 – **НЕ Принимается**
2. табличный материал в виде отдельного файла (**только при условии** когда объем одной таблицы превышает полную страницу журнальной статьи)
3. иллюстрации **в исходном формате данных с возможностью редактирования (программах для черчения/рисования/создания диаграмм и прочее, ТО ЕСТЬ НЕ сохранен в формате с потерей качества)** предпочтение, при этом отдается векторным форматам: **eps, svg, ai, pdf**, растровый формат изображений (с сжатием): форматы **png, jpeg и пр.** не прикреплять. Минимальное разрешение рисунков и графиков **600 dpi**. **Это требование необходимо для повышения типографского качества печатной версии издания.**

Если авторов несколько, то необходимо указать автора, которому будет адресована корреспонденция, и его контактные данные: адрес, номер телефона/факса, а также адреса электронной почты всех авторов.

ВНИМАНИЕ: Авторы несут полную ответственность за достоверность и оригинальность информации, предоставленной в рукописи. Все рукописи проходят проверку на наличие заимствований в системе «Антиплагиат». Оригинальность рукописи должна быть не менее 80%, в противном случае рукопись будет возвращена без права опубликования. При обнаружении нарушения авторских прав или плагиата будет проведена ретракция опубликованных статей в соответствии с правилами COPE.

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

Статьи в журнале «ВЕСТНИК ВГУИТ» издаются на русском языке с реферат на английском языке. По согласованию с редакцией допускается публикация статьи и на английском языке.

Вся статья (текст, таблицы, примечания, заголовки, иностранные вставки, список литературы, подрисовочные подписи и др.) набирается на компьютере в соответствии со стилями форматирования **шаблона журнала для MS Word 2007-2016**.

Версия статьи выполненная средствами MS Word 2003 **НЕ принимаются**.

Объем статьи, включая список литературы и подрисовочные подписи, не должен превышать: для работ, имеющих общее значение 5–20 страниц текста, для кратких сообщений до 3 стр.

Приветствуется подача статей онлайн! Адрес: <http://vestnik.vsu.ru/>

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ СТАТЬИ

I. ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Рукописи оригинальных исследований представляются по общепринятой международной схеме (IMRAD format - Introduction, Methods, Results and Discussion) и в статье должны найти отражение следующие рубрики:

Введение - кратко излагается современное состояние вопроса и обосновывается актуальность исследования. Дается критическая оценка литературы, имеющей отношение к рассматриваемой проблеме. Данная оценка разграничивает нерешенные вопросы. Ставятся четко сформулированные цели и задачи, поясняющие дальнейшее исследование в конкретной области;

Материалы и методы - дается достаточно подробное описание работы, для ее возможного воспроизведения. Методы, опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками: автором описываются только относящиеся к теме изменения.

Результаты - описываются в логической последовательности в виде отдельных фрагментов, разделенных подзаголовками, без элементов обсуждения, без повторения методических подробностей, без дублирования цифровых данных, приведенных в таблицах и рисунках.

Обсуждение - в разделе проводится детальный анализ полученных данных в сопоставлении с данными литературы, что служит обоснованием выводов и заключений авторов.

Заключение - подводятся основные итоги работы, приводятся рекомендации и указание на дальнейшие возможные направления исследований.

Для обзорных статей должны быть указаны *Введение* и в соответствии со стандартом PRISMA указать стратегию поиска литературы (<http://www.prisma-statement.org>).

Таблицы объема больше одной страницы указывать как Приложение в виде отдельного файла, так как они не будут опубликованы в печатной версии, а будут прикладываться в виде отдельного файла к электронной версии.

Названия и содержание рисунков (все подписи внутри) и таблиц (столбцов и строк) должны быть приведены как на русском, так и на английском языках.

Графический материал представляется в исходном формате данных с возможностью редактирования (программах для черчения/рисования/создания диаграмм и прочее, ТО ЕСТЬ НЕ сохранен в формате с потерей качества) предпочтение, при этом отдается векторным форматам: eps, svg, ai, pdf, исключение фотографии в растровом формате (сжатием): png, jpeg и пр. Минимальное разрешение рисунков и графиков 600 dpi.

Файлы Excel -- внедрены в текст статьи, с возможностью редактирования.

II. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

Список литературы оформляется согласно Приложению 1, 2.

Цитируемая литература должна содержать не менее 20 источников, и не менее 5 ссылок на иностранные источники. В списке литературы должны быть опубликованы работы за последние пять лет, в том числе в журналах, индексируемых в базах данных *ScienceDirect*, *Web of Science*, *Scopus*, *Science Index*. Лишь в случае необходимости допустимы ссылки на более ранние труды. Справочная литература не старше 10 лет.

В список литературы НЕ включаются учебные пособия, нормативные и архивные материалы, статистические сборники, газетные заметки без указания автора, монографии, авторефераты и диссертации. В цитируемой литературе желательно указывать источники с DOI.

Вместо ссылок на материалы диссертаций и авторефератов диссертаций, рекомендуется ссылаться на оригинальные статьи по теме диссертационной работы, так как сами диссертации рассматриваются как рукописи и не являются печатными источниками.

Самоцитирование НЕ более 2-х ссылок.

Приветствуется подача статей онлайн! Адрес: <http://vestnik.vsu.ru/>

III. ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА

Статьи, принимаемые к публикации в журнале «ВЕСТНИК ВГУИТ», должны излагать наиболее существенные, законченные и еще ранее неопубликованные результаты научных исследований.

О публикационной этике и этических нормах для публикации в журнале «ВЕСТНИК ВГУИТ» см.: <http://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/about/editorialPolicies#custom-2>

Журнал «Вестник ВГУИТ» выходит 4 раза в год: № 1 – март; № 2 – июнь; № 3 – сентябрь; № 4 – декабрь.

Статья должна быть тщательно проверена и подписана всеми авторами.

К статье должны прилагаться сопроводительные документы:

- сопроводительное письмо;
- экспертное заключение;
- положительная рецензия ведущего ученого в данной области или члена редакционной коллегии серии, заверенная подписью и печатью.

Вопрос об опубликовании статьи, ее отклонении решает редакционная коллегия журнала и ее решение является окончательным. В случае возвращения статьи для исправления датой представления считается день получения исправленного текста. Срок доработки - не более 1 месяца.

Материалы, не соответствующие данным требованиям оформления, к публикации не принимаются. Рукописи авторам не возвращаются.

Плата с аспирантов и докторантов за публикацию рукописей не взимается.

IV. КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Информацию о стоимости публикации можно узнать в редакции журнала. Также редакция оказывает платные услуги профессионального перевода реферата и ключевых слов на английский язык.

По всем интересующим Вас вопросам обращаться в редакцию журнала по контактам:

Дерканосова Анна Александровна - кандидат технических наук, доцент кафедры Сервиса и ресторанного бизнеса, начальник Центра коллективного пользования «Контроль и управления энергоэффективными проектами»

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Телефон: 8 920 432 16 57

E-mail: post@vestnik-vsuet.ru, aa-derk@yandex.ru

Адрес 394000, г. Воронеж, пр. Революции, 19, ауд. 11.

Соответствие рубрик/разделов журнала Вестник ВГУИТ

Номенклатуре научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

1.1 Процессы и аппараты пищевых производств

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

1.2 Пищевая биотехнология

4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

2. Химическая технология

2.6.7. Технология неорганических веществ (технические науки)

2.6.7. Технология неорганических веществ (химические науки)

2.6.10. Технология органических веществ (химические науки)

2.6.10. Технология органических веществ (технические науки)

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (химические науки)

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ (технические науки)

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий (физикоматематические науки)

ПОРЯДОК ОПИСАНИЯ ССЫЛОК НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

СТАТЬЯ В ЖУРНАЛЕ:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Буянова И.В., Имангалиева Ж.К. Агрегат для тонкого измельчения творога // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 23–26.

(кол-во авторов более 4):

Семенов Е.В., Бабакин Б.С., Воронин М.И., Белозёров А.Г. и др. Математическое моделирование процесса охлаждения хладоносителя системой замороженных шаров // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 74–79.

СТАТЬЯ В ЖУРНАЛЕ С DOI:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Илюхина Н.В., Колоколова А.Ю. Закономерности ингибирования культуры *Salmonella* // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 209–212. doi: 10.20914/2310-1202-2018-4-209-212

(кол-во авторов более 4):

Шарова Н.Ю., Принцева А.А., Манжиева Б.С., Выборнова Т.В. и др. Ферменты гидролитического действия в технологиях переработки некондиционного крахмалсодержащего сырья // Пищевая промышленность. 2019. № 4. С. 115–117. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10058

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ:

Содержание и технологии образования взрослых: проблема опережающего образования: сб. науч. тр. / Институт образования взрослых Рос. акад. образования; под ред. А.Е. Марона. М.: ИОВ, 2007. 118 с.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ, ФОРУМОВ, СОВЕЩАНИЙ, СЕМИНАРОВ:

Цветкова И.И., Сводцева И.А. Индикаторный подход к оценке кадровой безопасности в системе экономической безопасности предприятия // Устойчивое развитие социально-экономической системы Российской Федерации: мат. XVII науч.-практ. конф., Гурзуф, Ялта, 04 декабря 2015 г. Симферополь: Ариал, 2016. С. 110–112.

КНИГА, МОНОГРАФИЯ:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Румянцева З.П. Менеджмент организаций. М.: Инфра-М, 2015. 432 с.

(кол-во авторов более 4):

Антипова Л.В., Сторублевцев С.А., Успенская М.Е., Попова Я.А. и др. Комплексная переработка кроликов: традиции и инновации: монография. Воронеж, 2017. 377 с.

ДИССЕРТАЦИЯ

Пономаренко Ю.А. Нетрадиционные корма и биологически активные вещества в рационах цыплят-бройлеров и кур-несушек: дис... д-ра с.-х. наук. Сергиев Посад: ВНИТИП, 2017. 437 с.

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ:

Ушакова А.С. Разработка комплексной технологии переработки сушеного плодово-ягодного сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово: Кемер. технол. ин-т пищевой пром., 2017. 22 с.

НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ ДОКУМЕНТЫ:

порядок описания:

Заглавие официального документа: сведения, относящиеся к заглавию (указ, постановление), Дата принятия документа / Название издания. Год издания. Количество страниц.

пример:

ГОСТ 5900–2014. Изделия кондитерские. Определение массовой доли влаги и сухих веществ. М.: Стандартинформ, 2015. 8 с.

ПАТЕНТ:

порядок описания:

Обозначение вида документа, номер, название страны, индекс международной классификации изобретений. Название изобретения / И.О.Фамилия изобретателя, заявителя, патентовладельца; Наименование учреждения-заявителя. Регистрационный номер заявки; Дата подачи; Дата публикации, сведения о публикуемом документе.

пример:

Пат. № 2689672, RU, A23L 5/00. Способ комплексной переработки семян сои с выделением белоксодержащих фракций / Четверикова И.В., Шевцов А.А., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. № 2018107149; Заявл. 26.02.2018; Оpubл. 01.07.2019. Бюл. № 19.

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕСУРС:

порядок описания:

Фамилия И.О. автора (если указаны). Название ресурса. Место издания: Издательство, год издания (если указаны). Адрес локального сетевого ресурса.

пример:

Лапидус Л.В. Центр компетенций цифровой экономики. Ассоциация граждан и организаций по содействию развитию корпоративного образования. URL: <http://www.makonews.ru/centr-kompetencij-cifrovoj-ekonomiki/>

ПОРЯДОК ОПИСАНИЯ ССЫЛОК НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ:

СТАТЬЯ ИЗ ЖУРНАЛА:

порядок описания:

Фамилия И.О. автора (транслитерация). Перевод названия статьи на английский. Перевод названия источника на английский язык. Год, том, номер, страницы (от-до). Указание на язык статьи (in Russian) после описания статьи.

пример:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Buyanova I.V., Imangalieva Zh.K. A unit for fine grinding of cottage cheese. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. no. 3. pp. 23–26. (in Russian).

(кол-во авторов более 4):

Semenov E.V., Babakin B.S., Voronin M.I., Belozerov A.G. et al. Mathematical modeling of the process of cooling a coolant with a system of frozen balls. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. no. 4. pp. 74–79. (in Russian).

СТАТЬЯ С DOI:

(кол-во авторов от 1 до 4):

Iyukhina N.V., Kolokolova A.Yu. Patterns of Inhibition of Salmonella Culture. Bulletin of the Voronezh State University. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 209–212. doi: 10.20914 / 2310-1202-2018-4-209-212 (in Russian).

(кол-во авторов более 4):

Sharova N.Yu., Printseva A.A., Manzhieva B.S., Vybornova T.V. et al. Hydrolytic enzymes in the processing of substandard starch-containing raw materials. Food Industry. 2019. no. 4. pp. 115–117. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10058 (in Russian).

СТАТЬЯ ИЗ ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. Journal of Computer Mediated Communication. 1999. vol. 5. no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/>

СТАТЬЯ ИЗ ПРОДОЛЖАЮЩЕГОСЯ ИЗДАНИЯ (СБОРНИКА ТРУДОВ):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Experimental study of the strength of joints “steel-composite”. Proc. of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”. 2006. no. 593. pp. 125–130. (in Russian).

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ:

Tsvetkova I.I., Svodtseva I.A. An indicator approach to the assessment of personnel security in the system of economic security of an enterprise. Sustainable development of the socio-economic system of the Russian Federation. Simferopol, Arial, 2016. pp. 110–112. (in Russian).

КНИГИ (МОНОГРАФИИ, СБОРНИКИ):

(кол-во авторов от 1 до 4):

Rumyantseva Z.P. Management of organizations: a monograph. Moscow, Infra-M, 2015. 432 p. (in Russian).

(кол-во авторов более 4):

Antipova L.V., Storablevtsev S.A., Uspenskaya M.E., Popova Ya.A. et al. Complex processing of rabbits: traditions and innovations: a monograph. Voronezh, 2017. 377 p. (in Russian).

ДИССЕРТАЦИЯ ИЛИ АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ:

Ushakova A.S. Development of a comprehensive technology for processing dried fruit and berry raw materials. Kemerovo, Kemer. Technol. Institute of Food Industry, 2017. 22 p. (in Russian).

ГОСТ:

State Standard 5900–2014. Confectionery products. Determination of the mass fraction of moisture and dry matter. Moscow, Standartinform, 2015. 8 p. (in Russian).

ПАТЕНТ:

Chetverikova I.V., Shevtsov A.A., Tkach V.V., Serdyukova N.A. The method of complex processing of soybean seeds with the allocation of protein-containing fractions. Patent RF, no. 2689672, 2019.

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕСУРС:

Lapidus L.V. Center of competence of digital economy. Association of citizens and organizations for the development of corporate education. Available at: <http://www.makonews.ru/centr-kompetencij-cifrovoj-ekonomiki/> (in Russian).

List of requirements of drawing up materials in «Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies»

Editorial Board asks the authors to stick to the following rules in writing the papers, otherwise they may be rejected. Submitting the manuscripts for the review.

Submitting the article for publication in the journal "Proceedings of the VSUET" includes: the paper has not been previously published; it is not being considered for publication in another publishing house; its publication has been approved by all authors and interlinked organizations in which this work was carried out; in case of the approval for publication the paper will not be published elsewhere in the same form, in English or any other language, including electronic form.

Submission form (application) for the publication of an article in a journal, filled up in accordance with the rules, should be sent to the following address: **19, Revolution av., 11 Voronezh 394000 Russia** and the electronic version of the paper with an attached manuscript file to an e-mail address vestnikvgta@mail.ru. Should specify the name of the first author of the article in the subject.

The electronic version of the paper should include: a file containing the text of the article, illustrations, tabular material in a separate file (if the amount of one table exceeds full page) and illustration (files in original format), preference is given to vector formats: eps, svg, ai, pdf.

If there are several authors, you must specify contact details of the authors to whom correspondence shall be addressed: address, phone / fax numbers and e-mail addresses.

The manuscript must be accompanied by a review from a specialist in this field, certified by signature and stamp.

Online application form is also available. The author can use the official website of the journal by completing registration at <http://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/user/register>).

All articles received by the editorial board of the journal "Proceedings of the VSUET", are subject to mandatory unilateral anonymous ("blind") review (the authors do not know the names of reviewers of the manuscript, and will receive a letter with comments, signed by the chief editor).

After passing the review procedure and the approval of an article for publication, the authors' names and their listed order cannot be changed (addition, deletion, rearrangement). When submitting the final version of the article, please make sure that the list of authors is a complete and listed in a proper order.

ATTENTION: The author is solely responsible for the accuracy and originality of the information provided in the article. All manuscripts are checked for the presence of borrowings using "Antiplagiat" system. All manuscripts are tested with ANTIPLAGIAT for testing electronic documents for originality and reveal plagiarisms. The manuscript must comprise at least 80% of originality; otherwise the manuscript will be returned without the right to be published. Upon detection of copyright infringement or plagiarism in already published articles, they will be invalidated in accordance with the rules of COPE.

Requirements for structure of the paper

Articles in the journal "Proceedings of the VSUET" are published in Russian with English summary. In agreement with the editors, the publication may be done entirely in English.

By agreement, the editors accept publication of the article in English.

Full article (tables, text, footnotes, headers, inserts in a foreign language, references, captions, etc..) must be typed on a computer: in accordance with journal template formatting styles for MS Word 2007-2016..

The volume of the article, including references and captions must not exceed: for work of a common significance: from 5 to 20 pages, for news reports to 3 pages.

The manuscript should be structured to the following plan:

- *Type of article (original article, review article, short message or letter);*
- *UDC (Universal Decimal classification);*
- *DOI - numeric identifier (provided by the editors available for an extra fee);*
- *Full title of the article;*

- *First name (full), patronymic name (initials) and surname (full) of the author (s) e-mail;*
- *Name of the department (for a university) / laboratory (for Scientific Research Institute), the full name of the workplace, city, country;*
- *Abstract;*
- *Keywords;*
- *For reference (filled automatically);*
- *Structured text of the article;*
- *Thanks / acknowledgements;*
- *List of resources used (bibliography);*
- *Information about the authors;*
- *Contribution;*
- *Conflict of interest.*

The English version of the article title, first name, patronymic initial and last name of the authors, the full names of all workplaces, structured summaries and keywords must be given below a resume and keywords in Russian.

The editors reserve the right to correct the translation. It is recommended to take the help of a professional translator to avoid mistakes in compiling the English version of resume.

REQUIREMENTS TO THE CONTENT

I THE TITLE PAGE INCLUDES:

Article type

UDK

DOI:

TITLE OF THE ARTICLE. Title of work should be as short as possible (no more than 120 characters), and should accurately reflect its content. It is important to avoid titles in the form of interrogative sentences, as well as titles with an ambiguous meaning. Must use only standard abbreviations (acronyms). Must not use acronyms in the title. Full term should precede the first use of the acronym in the text.

FIRST NAME (FULL), PATRONYMIC (INITIAL) AND SURNAME (FULL) OF AUTHOR (S).

For example: **Aleksey D. Ivanov¹,**

Ivan A. Petrov²

FULL NAME OF ALL ORGANIZATIONS to which the authors are related. If the authors work in different institutions, the relationship of each author with his organization should be shown by using uppercase numbers, for example:

Example: Department (Laboratory), University (scientific research institute), city, country.

II. THE MAIN TEXT OF THE ARTICLE

The manuscripts of original research are submitted under the standard international scheme (IMRAD format - Introduction, Methods, Results and Discussion) and article should reflect the following headings:

Introduction - outlines the current state of the problem and the urgency of the study. It is necessary to give a critical assessment of the literature related to the issue. This assessment differentiates outstanding issues. Clear defined goals and objectives must be determined, explaining further research in a particular area;

Materials and methods - a fairly detailed description of the work is given. Previously published methods should be accompanied by a reference note: the author describes the changes related to the subject.

The results and discussion - the results should be clear and concise. Give a convincing explanation of the results and their significance so as the reader can not only independently assess the methodological advantages and disadvantages of the study, but also replicate if necessary.

Conclusion summarizes the main results of the research. The author gives recommendations and guidance on possible areas of further research.

The name and contents of figures and tables (rows and columns) should be given as in both Russian and English languages.

III ACKNOWLEDGEMENTS:

(when available - in Russian and English). The author should list persons, organizations, foundations, etc., who contributed help for a research, work and so on. (E.g. financial aid, language (linguistic) aid assistance in writing articles or editing proofreading , etc.)

IV. REFERENCES

Cited bibliography must contain at least 10 sources. Self-citations are allowed no more than 20 percent. At least 50 percent of the sources from the bibliography should be published in the last five years, including in the journals indexed in databases **ScienceDirect**, **Web of Science**, **Scopus**, **Science Index**. Only in case of need the references to earlier works are allowed. The bibliography does not include textbooks, regulatory and archival materials, statistical collections, newspaper notes without the author's name, monographs, abstracts and theses. In the cited literature, it is desirable to specify the sources with **DOI**.

Bibliography (list of resources) is presented in two ways:

1. *Russian along with foreign sources in accordance with GOST 7.0.5-2008 (All Union State standard).*
2. *Transliterated in the Latin alphabet with the translation of source publications into English for the international identification system.*

Style of links (references):

In the article, the number of a link is enclosed in square brackets and placed in line with the text. You can give the names of the authors, but the number(s) of the references must always be present. The reference numbers (numbers in brackets) shall be in the reference list in the order in which they appear in text.

Example:

«... as shown [3; 6] or Barnaby and Jones [8] obtained a different result ... »

The author is solely responsible for the accuracy of bibliographic sources, including the English translation.

1. Russian version - in accordance with *Appendix 1, 2*

References in the Russian version of the article are given in the original language. All references should be made uniformly: only a dot (full stop) without dashes between the parts of description. Symbols № and & are not used; for a number you should use Latin letter N with no point after it; double slash separates the description of a larger document, which refers to the fragment. You should not put dot (full stop) before the double slash // but spaces before and after the double slash // are required.

2. The English (REFERENCES) - in accordance with Harvard standard:

References in English are primarily necessary to track cited authors and journals. The correct description of the sources used in reference lists is the guarantee that the quoted publication will be taken into account when assessing the scientific work of its authors, and thus the organization, region and country. Quoting a journal determines its scientific level, the credibility, the effectiveness of its Editorial Board, etc.

The names of sources and works are specified in full, without abbreviations. The titles of monographs, collections of articles and conferences are transliterated into Latin alphabet, followed by an English translation in brackets. The website <http://www.translit.ru/> can be used for free transliteration of Russian text in Latin letters (version of BSI).

In the bibliography (**English version**), it is not allowed to use separating characters «//», «—» and «№»

Instead of references to materials of theses and abstracts, it is recommended to include references to the original articles on the subject of the thesis, as the theses themselves are viewed as the manuscripts and are not printed sources.

VI. BASIC ETHICAL PRINCIPLES

Articles accepted for publication in the journal "Proceedings of the VSUET" must reveal the most significant, complete and previously unpublished research results.

To learn more on publication ethics and ethical standards for publication in the journal "Proceedings of the VSUET" please visit the website.: <http://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/about/editorialPolicies#custom-2>

The magazine «the Messenger ВГУИТ» leaves 4 times a year: № 1 – March; № 2 – June; № 3 – September; № 4 – December.

The article must be thoroughly checked and signed by all the authors. Name, middle name, last name, address, science degree, position, place of work, telephone number (office and home) E-mail, the person communicate to are pointed out on a separate sheet of paper.

Accompanying deeds should be applied on paper:

- The transmittal letter;
- An extract from the report of faculty meeting with paper recommendation for printing;
- The positive review of the leading scientist in the given area or a member of an editorial board of the series, authenticated by the signature and printing.

The question on paper publication, its deviation is solved by an editorial board of the log and the solution is definitive. In case of refund of paper for correction by representation date it is considered day of reception of the corrected text. Finishing term - no more than 1 month.

The materials mismatching given demands of registration, to the publication are not accepted. Manuscripts are not refunded to authors.

The pay for the publication of manuscripts is not raised from post-graduate students

VII. CONTACT INFORMATION

scientific and public journal "Proceedings of the VSUET"

If you have any questions, please contact the editorial office:

Anna A. Derkanosova - Ph.D., associate professor of department of Service and restaurant business, Head of the Centre for collective use "Control and management of energy efficient projects"

FSBEE HE "Voronezh state university of engineering technologies"

Tel.: 8 920 432 16 57

E-mail: vestnikvgta@mail.ru, aa-derk@yandex.ru

Address: 19, Revolution av., 11 Voronezh 394000 Russia

ORDER OF DESCRIPTION OF LINKS IN RUSSIAN

JOURNAL ARTICLE:

(number of authors from 1 to 4):

Buyanova I.V., Imangalieva Zh.K. A unit for fine grinding of cottage cheese // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. № 3. P. 23–26.

(number of authors more than 4):

Semenov E.V., Babakin B.S., Voronin M.I., Belozerov A.G. et al. Mathematical modeling of the process of cooling a coolant with a system of frozen balls // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. № 4. P. 74–79.

ARTICLE WITH DOI:

(number of authors from 1 to 4):

Ilyukhina N.V., Kolokolova A.Yu. Patterns of Inhibition of *Salmonella* Culture // Bulletin of the Voronezh State University. 2018. V. 80. № 4. P. 209–212. doi: 10.20914 / 2310-1202-2018-4-209-212

(number of authors more than 4):

Sharova N.Yu., Printseva A.A., Manzhieva B.S., Vybornova T.V. et al. Hydrolytic enzymes in the processing of substandard starch-containing raw materials // Food Industry. 2019. № 4. P. 115–117. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10058

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS:

The content and technology of adult education: the problem of advanced education: collection of scientific papers / Institute for Adult Education Ros. Acad. education; under the editorship of A.E. Marona. M.: JOB, 2007. 118 p.

MATERIALS OF CONFERENCES, FORUMS, MEETINGS, SEMINARS:

Tsvetkova I.I., Svodtseva I.A. An indicator approach to the assessment of personnel security in the system of economic security of an enterprise // Sustainable development of the socio-economic system of the Russian Federation: mat. XVII scientific and practical. conf., Gurzuf, Yalta, December 4, 2015. Simferopol: Arial, 2016. P. 110–112.

BOOK, MONOGRAPH:

(number of authors from 1 to 4):

Rumyantseva Z.P. Management of organizations. M.: Infra-M, 2015. 432 p.

(number of authors more than 4):

Antipova L.V., Storulevtsev S.A., Uspenskaya M.E., Popova Y.A. et al. Integrated processing of rabbits: traditions and innovations: a monograph. Voronezh, 2017. 377 p.

DISSERTATION:

Ponomarenko Yu.A. Unconventional feeds and biologically active substances in the diets of broilers and laying hens: dis ... Dr. S.-kh. sciences. Sergiev Posad: VNITIP, 2017. 443 p.

SUMMARY OF THE DISSERTATION

Ushakova A.S. Development of a comprehensive technology for processing dried fruit and berry raw materials: abstract of the diss....cand. tech. sciences. Kemerovo: Kemer. technol. Institute of Food Industry, 2017. 22 p.

REGULATORY DOCUMENTS:

description order:

Title of an official document: information related to the title (decree, resolution), Date of adoption of the document / Title of publication. The year of publishing. Number of pages.

example:

GOST 5900–2014. Confectionery. Determination of the mass fraction of moisture and solids. M.: Standartinform, 2015. 8 p.

PATENT:

description order:

Designation of the type of document, number, name of the country, index of international classification of inventions. Title of invention / name of inventor, applicant, patent holder; Name of applicant institution. Registration number of the application; Date of application; Date of publication, information about the published document.

example:

7 Pat. no. 2689672, RU, A23L 5/00. The method of complex processing of soybean seeds with the allocation of protein-containing fractions / Chetverikova I.V., Shevtsov A.A., Tkach V.V., Serdyukova N.A. no. 2018107149; Appl. 26.02.2018; Publ. 01.07.2019. Bull. Number 19.

ELECTRONIC RESOURCE:

Lapidus L.V. Center of competence of digital economy. Association of citizens and organizations for the development of corporate education. URL: <http://www.makonews.ru/centr-kompetencij-cifrovoy-ekonomiki/>

ENGLISH LANGUAGE DESCRIPTION PROCEDURE:**JOURNAL ARTICLE:**

description order:

Surname I.O. author (transliteration). Translation of the title of the article into English. Translation of the source name into English. Year, volume, number, pages (from-to). An indication of the language of the article (in Russian) after the description of the article.

example:

(number of authors from 1 to 4):

Buyanova I.V., Imangalieva Zh.K. A unit for fine grinding of cottage cheese. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. no. 3. pp. 23–26. (in Russian).

(number of authors more than 4):

Semenov E.V., Babakin B.S., Voronin M.I., Belozerov A.G. et al. Mathematical modeling of the process of cooling a coolant with a system of frozen balls. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2016. no. 4. pp. 74–79. (in Russian).

ARTICLE WITH DOI:

(number of authors from 1 to 4):

Ilyukhina N.V., Kolokolova A.Yu. Patterns of Inhibition of Salmonella Culture. Bulletin of the Voronezh State University. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 209–212. doi: 10.20914 / 2310-1202-2018-4-209-212 (in Russian).

(number of authors more than 4):

Sharova N.Yu., Printseva A.A., Manzhieva B.S., Vybornova T.V. et al. Hydrolytic enzymes in the processing of substandard starch-containing raw materials. Food Industry. 2019. no. 4. pp. 115–117. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10058 (in Russian).

ARTICLE FROM ELECTRONIC JOURNAL:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. Journal of Computer Mediated Communication. 1999. vol. 5. no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/>

ARTICLE FROM CONTINUING PUBLICATIONS (PROCEEDINGS):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Experimental study of the strength of joints “steel-composite”. Proc. of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”. 2006. no. 593. pp. 125–130. (in Russian).

CONFERENCE MATERIALS:

Tsvetkova I.I., Svodtseva I.A. An indicator approach to the assessment of personnel security in the system of economic security of an enterprise. Sustainable development of the socio-economic system of the Russian Federation. Simferopol, Arial, 2016. pp. 110–112. (in Russian).

BOOK, MONOGRAPH:

(number of authors from 1 to 4):

Rumyantseva Z.P. Management of organizations: a monograph. Moscow, Infra-M, 2015. 432 p. (in Russian).

(number of authors more than 4):

Antipova L.V., Storublevtsev S.A., Uspenskaya M.E., Popova Ya.A. et al. Complex processing of rabbits: traditions and innovations: a monograph. Voronezh, 2017. 377 p. (in Russian).

DISSERTATION OR SUMMARY OF THE DISSERTATION:

Ushakova A.S. Development of a comprehensive technology for processing dried fruit and berry raw materials. Kemerovo, Kemer. Technol. Institute of Food Industry, 2017. 22 p. (in Russian).

GOST:

State Standard 5900–2014. Confectionery products. Determination of the mass fraction of moisture and dry matter. Moscow, Standartinform, 2015. 8 p. (in Russian).

PATENT:

Chetverikova I.V., Shevtsov A.A., Tkach V.V., Serdyukova N.A. The method of complex processing of soybean seeds with the allocation of protein-containing fractions. Patent RF, no. 2689672, 2019.

ELECTRONIC RESOURCE:

Lapidus L.V. Center of competence of digital economy. Association of citizens and organizations for the development of corporate education. Available at: <http://www.makonews.ru/centr-kompetencij-cifrovoj-ekonomiki/> (in Russian).