

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

№

2

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, № 2

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. 2

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 09.06.2025. Подписано в печать 20.06.2025

Выход в свет: 30.06.2025

Усл. печ. л. 32.66 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, LJUDMILA 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 (Moscow, 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 № ФС77-56830 January 29, 2014

Address of the university, editorial office, publishing house and printing department of FSBEI HE "VGUIT"

394036, Voronezh, pr. Revolution 19, room 11

tel / fax: (473) 255-37-16

E-mail: post@vestnik-vsuet.ru

Put in set 09.06.2025. Signed to print 20.06.2025

The publication: 30.06.2025

Conditional Print l. 32.66 Circulation 1500 copies.

Price - Free.

© FSBEI HE

"Voronezh State University
of Engineering
Technologies", 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Громов С.В. Модель автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока	15
Иванова К.В., Березовикова И.П., Варнавская О.Д. Применение технологии частичной выпечки кексов специализированного назначения в Республике Саха (Якутия)	23
Дранников А.В., Домбровская Я.П., Дерканосова А.А., Шабанов И.Е., Китаев Д.С., Клейменова Н.Л. Рациональные параметры ультразвуковой экстракции биоактивных веществ из зверобоя	30
Попов А.М., Майтаков А.Л., Мехдиев Р.В.-О., Ветрова Н.Т. Анализ изменений геометрии и кинематики зубчатой передачи в условиях абразивного изнашивания	38
Махов С.М. Умная упаковка: интеграция IoT и датчиков для контроля качества пищевых продуктов	46
Меркурьев Н.В., Макаров А.Е., Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И.Ю., Осмоловский П.Д., Бородулина К.А. Цельнозерновые макароны из полбы с повышенным содержанием пищевой клетчатки за счет побочных продуктов переработки хурмы	51
Погорелова С.В., Чиркин Е.А., Морозова П.Д., Сыромятников М.Ю., Зверева О.В., Толкачева А.А. Влияние пробиотической бактерии <i>Bacillus subtilis</i> на поведенческие характеристики мышей и биохимические показатели сыворотки крови при индуцированном системном воспалении	64
Махов С.М. Методы активной упаковки: сравнительный анализ технологий продления срока годности продуктов	70
Вернер А.В., Чугунова О.В., Гращенков Д.В., Пастушкова Е.В., Девяткин Д.И. Разработка технологии получения безлактозного альбумина	79
Сапронова А.О. Тенденции и перспективы развития интеллектуальной собственности в биотехнологиях и пищевых технологиях: анализ данных университетского центра трансферов технологий	87
Роднищев С.В., Дмитриев Д.В., Бакин И.А., Шахов С.В., Глотова И.А., Муравьев А.С. Оптимизация режимов сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой	95
Андреева А. С., Меледина Т. В., Новикова И. В., Федоров А. А., Веселова О. С., Фаустов В.О. Трегалоза как защитный стресс-фактор пробиотических дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> var. <i>boulardii</i>	106
Иванов В.А., Иванова А.А., Андреева А.С., Новикова И.В. Применение дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> var. <i>boulardii</i> и WildBrew Philly Sour™ рода <i>Lachancea spp.</i> в технологии ферментированного напитка из овса (<i>Avena sativa</i> L)	116
Поперечный А.Н., Байда Б.Ю., Плетминцев И.А. Кинетика сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое	126

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Семилетова В.А., Шестаков К.В., Лазарев С.И., Полянский К.К. Анализ эффективности электромембранной очистки промышленных растворов от ионов никеля	134
Астахов В.А., Губанова М.И., Альхаир А.Я., Мерзляков В.А. Упаковочное покрытие на основе крахмала	143
Конюхов В.Ю., Николаев А.А., Прихожая А.А., Долгоносков В.К., Кондратов А.П. Термодинамика скрытой маркировки упаковки из прозрачной термоусадочной пленки	150
Мошков А.И., Кецко А.И., Василевская А.Э., Пономарева А.А. Электроформование мембран из ацетата целлюлозы: оптимизация свойств для топливных элементов	158
Нифталиев С.И., Кузнецова И.В., Ненахов В.М., Диалло А., Горбунова Е.М., Губанова В.Р. Исследование содержания золота и платины в руде месторождения Мако (Сенегал)	165
Щеголева И.Д., Вольнова Е.Р., Ергиев А.Е. Разработка гигиенического моющего средства для тела	171
Погиба А.Ю., Верещагин В.Ю., Род В.А., Кондратов А.П. Многослойные полимерные оболочки для скрытой маркировки зеркальных изделий	180
Щегольков Н.И., Комарова Л.Ю., Цыбин А.И., Кондратов А.П. Влияние лазерной и струйно-абразивной модификации стальной поверхности на адгезионную прочность эпоксидных защитных покрытий	190
Мелессе И.Й., Альхаир А.Я., Щукина Е.А., Кириш И.А., Зайцева А.В. Разработка антимикробных упаковочных материалов с использованием эфирного масла розмарина	198
Дубровина К.Р., Шакиров Т.Р., Хацринов А.И., Сулейманова А.З., Водопьянова С.В. Физико-химические особенности очистки природного и техногенного рассола в производстве кальцинированной соды	204

CONTENTS

FOOD SYSTEMS

Gromov S.V. Model of automated heat treatment system for tomato juice preservation machine	15
Ivanova K.V., Berezovikova I.P., Varnavskaya O.D. Application of the technology of partial baking of special-purpose cakes in the Republic of Sakha (Yakutia)	23
Drannikov A.V., Dombrovskaya Y.P., Derkanosova A.A., Shabanov I.E., Kitaev D.S., Kleimenova N.L. Rational parameters for ultrasonic extraction of bioactive compounds from <i>hypericum perforatum</i>	30
Popov A.M., Maytakov A.L., Mehdiyev R.V-O., Vetrova N.T. Analysis of changes in geometry and kinematics of the gear gears in conditions of abrasive wear	38
Makhov S.M. Smart packaging: integration of It and sensors for food quality control	46
Merkuriev N.V., Makarov A.E., Nugmanov A.Kh.-Kh., Aleksanyan I.Yu., Osmolovsky P.D., Borodulina K.A. Whole-grain spelt pasta with increased dietary fiber content due to persimmon byproducts	51
Pogorelova S.V., Chirkin E.A., Morozova P.D., Syromyatnikov M.Yu., Zvereva O.V., Tolkacheva A.A. Effect of <i>Bacillus subtilis</i> probiotic bacteria on behavioral characteristics of mice and serum biochemical parameters during induced systemic inflammation	64
Makhov S.M. Active packaging methods: a comparative analysis of technologies for extending shelf life of food products	70
Werner A.V., Chugunova O.V., Grashchenkov D.V., Pastushkova E.V., Devyatkin D.I. Development of technology for the production of lactosefree albumin	79
Sapronova A.O. Trends and prospects for the development of intellectual property in biotechnology and food technologies: an analysis of university's centres technology transfers	87
Rodnishchev S.V., Dmitriev D.V., Bakin I.A., Shakhov S.V., Glotova I.A., Muravyev A.S. Optimizing quinoa seed drying modes in a drum dryer with a channel nozzle	95
Andreeva A.S., Meledina T.V., Novikova I.V., Fedorov A.A., Veselova O.S., Faustof V.O. Trehalose as a protective stressor for the probiotic yeast <i>Saccharomyces cerevisiae</i> var. <i>boulardii</i>	106
Ivanov V.A., Ivanova A.A., Andreeva A.S., Novikova I.V. Application of yeast <i>Saccharomyces cerevisiae</i> var. <i>boulardii</i> and <i>WildBrew Philly Sour</i> of the genus <i>Lachancea</i> spp. in the technology of fermented oat drink (<i>Avena sativa</i> L)	116
Poperechny A.N., Baida B.Y., Pletmintsev I.A. Kinetics of apple pomace drying in fluidised bed	126

CHEMICAL TECHNOLOGY

Semiletova V.A., Shestakov K.V., Lazarev S.I., Polyansky K.K. Analysis of the efficiency of electromembrane purification of industrial solutions from nickel ions	134
Astakhov V.A., Gubanova M.I., Alkhair A.Ya., Merzlyakov V.A. Starchbased packaging coating with the addition of calamus root extract	143
Konyukhov V.Yu., Nikolaev A.A., Prihozhaya A.A., Dolgonosov V.K., Kondratov A.P. Thermodynamics of hidden labeling of transparent shrink film packaging	150
Moshkov A.I., Ketsko A.I., Vasilevskaya A.E., Ponomareva A.A. Electrospinning of cellulose acetate membranes: optimization of properties for fuel cell applications	158
Niftaliev S.I., Kuznetsova I.V., Nenakhov V.M., Diallo A., Gorbunova E.M., Gubanova V.R. Investigation of gold and platinum in ore from Mako deposit (Senegal)	165
Shchegoleva I.D., Volnova E.R., Ergiev A.E. Development of a hygienic body wash	171
Pogiba A.Yu., Vereshchagin V.Yu., Rod V.A., Kondratov A.P. Multilayer polymer films for covert marking of mirrored products	180
Shchegolkov N.I., Komarova L.Yu., Tsybin A.I., Kondratov A.P. Effect of laser and shot blasting modification of steel surface on the adhesion strength of epoxy protective coatings	190
Melesse E.Y., Alkhair A.Y., Shchukina E.A., Kirsh I.A., Zaitseva A.V. Development of antimicrobial packaging materials using rosemary essential oil	198
Dubrovina K.R., Shakirov T.R., Khatsrinov A.I., Suleymanova A.Z., Vodopyanova S.V. Physico-chemical features of purification of natural and technogenic brine in the production of soda ash	204

Модель автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока

Сергей В. Громов¹ egromov.serg2020@m.ru  0009-0008-2661-3880

¹ Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, ул. Щорса, 31, г. Донецк, 283048, Россия

Аннотация. В статье представлена усовершенствованная модель автоматизированной системы тепловой обработки (АСУТП) для аппарата по консервированию томатного сока. Основное внимание уделено разработке и верификации модели, обеспечивающей оптимизацию управляющих воздействий с целью повышения качества готового продукта при минимальных энергетических и экономических затратах. Методологической основой исследования стали статистические и математические методы, описывающие изменение текстурных характеристик томатного сока в процессе пастеризации. Проведенный анализ термической обработки позволил выявить ключевые параметры, влияющие на сенсорные и микробиологические свойства продукта. Разработанная модель АСУТП апробирована на лабораторной установке с применением современного контрольно-измерительного оборудования и программного обеспечения на базе контроллера Siemens S7-1200 и SCADA-интерфейса. Экспериментально установлены оптимальные параметры пастеризации (85 °C, 5 минут), обеспечивающие сохранение цвета, текстуры и органолептических характеристик при гарантированной микробиологической стабильности. Разработанная адаптивная модель управления позволяет существенно повысить эффективность технологического процесса, демонстрируя снижение энергопотребления на 12-15% при одновременной минимизации отклонений качества продукции менее 5%. Практическая значимость исследования заключается в возможности повышения рентабельности производства за счет сокращения брака на 18-20%, уменьшения энергозатрат и стабилизации качества продукции. Предложенная методология обладает значительным потенциалом для применения при обработке других жидких пищевых продуктов и может быть адаптирована для модернизации существующих производственных линий. Перспективными направлениями дальнейшего развития исследования видятся интеграция с системами Industry 4.0, разработка предиктивных алгоритмов на основе машинного обучения и создание цифровых двойников для различных типов пищевого сырья. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность предложенного подхода как с технологической, так и с экономической точек зрения, открывая новые возможности для совершенствования процессов тепловой обработки в пищевой промышленности.

Ключевые слова: автоматизация, тепловая обработка, пастеризация, консервирование томатного сока, технологические процессы, автоматической системы управления технологическим процессом (АСУТП), математическое моделирование, качество пищевых продуктов, реторта, натурные испытания, управление температурой, сенсорные характеристики, энергоэффективность, текстурные изменения.

Model of automated heat treatment system for tomato juice preservation machine

Sergey V. Gromov¹ egromov.serg2020@m.ru  0009-0008-2661-3880

¹ Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Shchorska St., b 31, Donetsk, 283048, Russia

Abstract. The article presents an improved model of an automated heat treatment system (ASUTP) for a tomato juice canning machine. The main focus is on the development and verification of a model that optimizes control actions in order to improve the quality of the finished product at minimal energy and economic costs. The methodological basis of the study was statistical and mathematical methods describing the change in the textural characteristics of tomato juice during pasteurization. The analysis of the heat treatment revealed the key parameters affecting the sensory and microbiological properties of the product. The developed automated control system model has been tested on a laboratory installation using modern control and measuring equipment and software based on the Siemens S7-1200 controller and the SCADA interface. Optimal pasteurization parameters (85 °C, 5 minutes) have been experimentally established, ensuring the preservation of color, texture and organoleptic characteristics with guaranteed microbiological stability. The developed adaptive control model makes it possible to significantly increase the efficiency of the technological process, demonstrating a reduction in energy consumption by 12-15% while minimizing product quality deviations of less than 5%. The practical significance of the study lies in the possibility of increasing the profitability of production by reducing scrap by 18-20%, reducing energy consumption and stabilizing product quality. The proposed methodology has significant potential for applications in the processing of other liquid food products and can be adapted to modernize existing production lines. Integration with Industry 4.0 systems, the development of predictive algorithms based on machine learning, and the creation of digital counterparts for various types of food raw materials are considered promising areas for further development of the research. The results obtained confirm the high efficiency of the proposed approach from both technological and economic points of view, opening up new opportunities for improving heat treatment processes in the food industry.

Keywords: automation, heat treatment, pasteurization, tomato juice preservation, technological processes, model of the automated heat treatment system (AHTS), mathematical modeling, food quality, retort, full-scale testing, temperature control, sensory characteristics, energy efficiency, textural changes.

Для цитирования

Громов С.В. Модель автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 15–22. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-15-22

For citation

Gromov S.V. Model of automated heat treatment system for tomato juice preservation machine. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2 pp. 15–22. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-15-22

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

Введение

Овощи и фрукты являются важными компонентами для сбалансированного и здорового питания, обеспечивают организм минералами и пищевыми волокнами. Содержащиеся в овощах вещества, такие как флавоноиды, фенолы и каротиноиды предотвращают дефицит витаминов и снижают риск развития различных видов рака, сердечно-сосудистых заболеваний, диабета. Однако овощи быстро портятся и требуют соответствующего консервирования, то есть технологии для продления срока хранения с сохранением питательных и сенсорных качеств. Для сохранения томатного сока необходимо приостановить развитие микроорганизмов с помощью термической обработки, которая замедляет бактериальную и ферментную активность. Однако даже мягкий термический процесс имеет тенденцию вызывать значительную потерю цвета и изменения текстуры, вкуса и потенциально питательной ценности.

Цель работы – усовершенствование модели автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока.

Материалы и методы

В работе по усовершенствованию модели автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока, которая позволяет осуществлять формирование оптимальных значений управления системы для повышения качества исходного продукта с минимальными энергетическими и экономическими затратами применены статистические методы, а также математические методы, описывающие изменения в текстуре обработки.

Результаты и обсуждение

Отмечено, что овощи и фрукты являются важными компонентами для сбалансированного и здорового питания, обеспечивают организм минералами и пищевыми волокнами. Содержащиеся в овощах вещества, такие как флавоноиды, фенолы и каротиноиды предотвращают дефицит витаминов и снижают риск развития различных видов рака, сердечно-сосудистых заболеваний, диабета. Вместе с этим овощи быстро портятся и нуждаются в соответствующем консервировании, то есть технологии для продления срока хранения с сохранением питательных и сенсорных качеств. Для сохранения томатного сока необходимо приостановить развитие микроорганизмов с помощью термической обработки, которая замедляет бактериальную и ферментную активность. Считается, что даже мягкий термический процесс имеет тенденцию повлечь за собой значительную потерю цвета и изменения в текстуре, вкусе и потенциально питательной

ценности. Сосредоточено внимание на том, что комбинация времени и температуры, связанная с конкретным процессом пастеризации, будет в значительной степени контролировать химические, биохимические и микробиологические изменения, которые будут происходить в пищевом продукте. Изменение соотношения времени и температуры может влиять как на желаемые, так и на нежелательные реакции, происходящие во время пастеризации, например потемнение овощей. Анализ позволил утверждать, что среди внешних факторов температура является важнейшим фактором для обеспечения качества в производстве и последующем хранении сырья. Сконцентрировано внимание на том, что эффективность производства может быть улучшена с помощью исходного продукта, что позволит оценить качество исходного продукта массообменного технологического процесса без установки дополнительных потоковых анализаторов (физических датчиков), требующих постоянной калибровки. Предложена усовершенствованная модель автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока, что позволяет осуществлять формирование оптимальных значений управляющих воздействий для повышения качества исходного продукта с минимальными энергетическими и экономическими затратами.

Овощи и фрукты являются важными компонентами для сбалансированного и здорового питания, обеспечивают организм минералами и пищевыми волокнами. Содержащиеся в овощах вещества, такие как флавоноиды, фенолы и каротиноиды предотвращают дефицит витаминов и снижают риск развития различных видов рака, сердечно-сосудистых заболеваний, диабета. Однако овощи быстро портятся и требуют соответствующего консервирования, то есть технологии для продления срока хранения с сохранением питательных и сенсорных качеств. Для сохранения томатного сока необходимо приостановить развитие микроорганизмов с помощью термической обработки, которая замедляет бактериальную и ферментную активность. Однако даже мягкий термический процесс имеет тенденцию вызывать значительную потерю цвета и изменения текстуры, вкуса и потенциально питательной ценности.

Простейшим и эффективным средством хранения значительной части овощей и фруктов является консервирование с помощью термической обработки для получения безопасного и вкусного продукта. Термическая переработка консервированных пищевых продуктов – применение тепла при заданной температуре в течение определенного времени. Основной целью термического процесса является обеспечение

высококачественной пищи путем уничтожения микроорганизмов, которое происходит при определенной зависимости температуры и времени выдержки при такой температуре.

Термическая обработка предполагает нагрев пищевого продукта при температуре от 50 до 150 °С. Включает пастеризацию (65–85 °С), стерилизацию (110–121 °С), термическую предварительную обработку (бланширование), проводимую перед замораживанием и консервированием для уничтожения бактерий и ферментов [1, 3, 6–9, 15–18]. Пастеризация – наиболее распространенный процесс теплового воздействия, заключающийся в нагревании до определенной температуры и выдержке при данной температуре определенного времени [2, 10–14]. От значения температуры и времени выдержки зависит срок хранения томатного сока.

Соответственно, контроль показателей качества исходного продукта в процессе термической обработки обеспечит возможность контролировать изменение текстуры для улучшения потребительской ценности, стабилизации цвета, вкусовых качеств и сохранения важных питательных веществ и биологически активных соединений.

Анализ последних исследований и публикаций. Эффективность производства может быть улучшена с помощью автоматической системы управления технологическим процессом (АСУТП) и контроля показателей качества исходного продукта. Для этого требуется разработка более точных математических моделей для оценки показателей качества (ММОПК) исходных продуктов для подсистемы АСУТП, описывающих нелинейные процессы [8,11]. Для моделирования изменений качества, происходящих в пищевых продуктах во время термической обработки, часто используются прогностические модели. Использование статистических методов для создания математической модели для оценки показателей качества исходных переменных объекта с учетом текущих значений входных переменных, обеспечит возможность в реальном времени точно предусматривать исходные значения моделируемого объекта за счет этого возможно заметное повышение его эффективности.

Так, для имеющихся p входных переменных X_i , $i = 1 \dots, p$ выхода Y , модель будет описываться функциональной зависимостью:

$$Y = F(X, B) + e, \quad (1)$$

где $X = (X_1 \dots, X_p)$ – вектор входных контролируемых технологических переменных; $B = (\beta_0, \beta_1 \dots, \beta_p)$ – вектор коэффициентов; e – погрешность измерения исходной переменной.

Отбор входных переменных, влияющих на значение конечного продукта и выбор структуры адекватной модели, осуществляется на основе регрессионного анализа. Однако для нелинейных объектов часто возникают проблемы, связанные с выбором структуры модели. Нелинейность приводит к неоднозначности получения оценок неизвестных параметров модели, когда одной и той же выборке экспериментальных данных одинаково хорошо отвечает не одна, а сразу множество моделей $F(X, B)$. Соответственно, необходим ряд характеристик, охватывающих сенсорные свойства (внешний вид, текстура, цвет), питательные ценности, наличие или отсутствие определенных химических компонентов, функциональные свойства и дефекты.

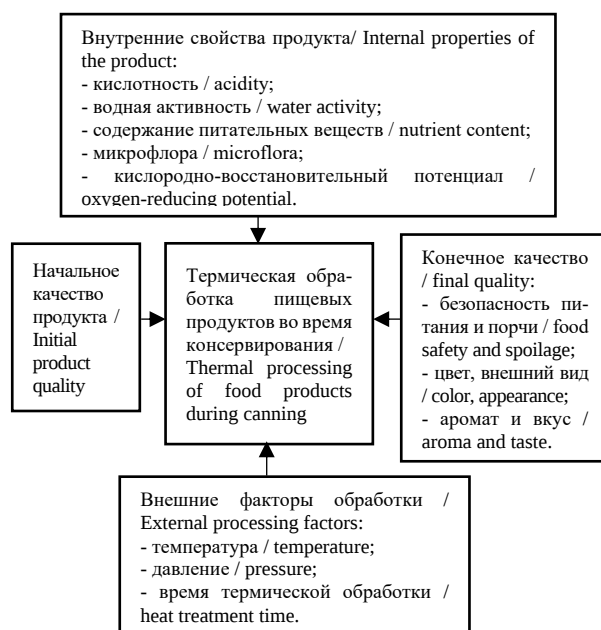


Рисунок 1. Влияние внешних и внутренних факторов на процесс термической обработки

Figure 1. Influence of external and internal factors on the heat treatment process

На рисунке 1 представлено моделирование термических процессов и взаимосвязь внешних и внутренних факторов, влияющих на качество и безопасность пастеризованных пищевых продуктов [6, 9, 19]. Комбинация времени и температуры, связанная с конкретным процессом тепловой обработки, будет в значительной степени контролировать химические, биохимические и микробиологические изменения, которые будут происходить в пищевом продукте. Изменение соотношения времени и температуры может влиять как на желаемые, так и нежелательные реакции, происходящие во время пастеризации, например потемнение овощей. Среди внешних факторов температура является важнейшим фактором для обеспечения качества в производстве и последующем хранении сырья.

В процессе тепловой обработки продукт содержится в герметично закрытой таре и подвергается обработке при соответствующей температуре в течение определенного времени, которое достаточно для уничтожения всех организмов, которые могут негативно влиять на здоровье потребителя. Термическая обработка уничтожает более стойкие организмы, которые могут привести к порче при нормальных условиях хранения. Одним из технологических оборудования для этой операции являются автоклавы – закрытые сосуды под давлением, которые используют пар из внешнего источника, например, паровые котлы или парогенераторы (рисунок 2). Автоклавы, работающие под избыточным давлением, подразделяются на паровые, воздушные, водяные [4, 9, 10, 22]. Независимо от того, какой тип автоклавной системы используется на консервном предприятии, оборудование должно обеспечивать достижение и поддержание равномерной температурной обработки контейнера во время термической обработки, а также время, когда автоклав достигает рабочей температуры, должно быть также известно.

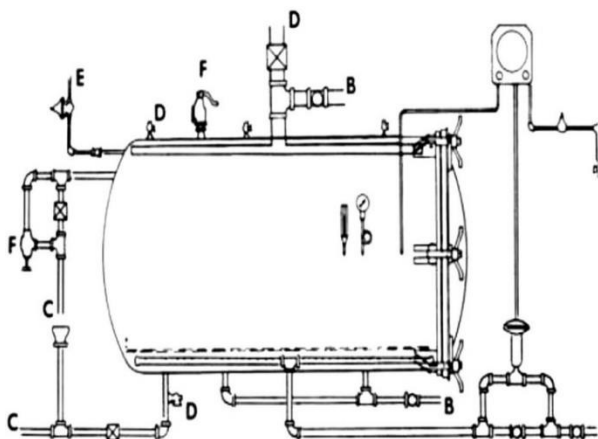


Рисунок 2. Автоклав: А – пар, В – вода, С – слив, D – вентиляционные отверстия, Е – воздух, F – предохранительный клапан

Figure 2. Autoclave: A – steam, B – water, C – drain, D – vents, E – air, F – safety valve

Для измерения температуры в корпусе автоклава встроен термометр, который размещают подальше от емкостей и теплоносителя. Датчики температуры или термодатчики расположены между контейнерами по всей загрузке автоклава и постоянно контролируются во время термической обработки, чтобы убедиться, что прибор для индикации температуры или стеклянный ртутный термометр для автоклава являются репрезентативными для температуры внутри автоклава.

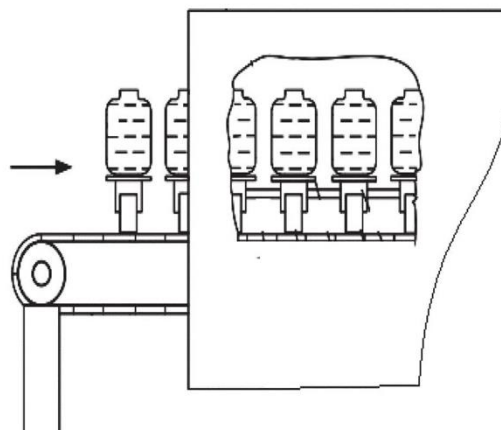


Рисунок 3. Аппарат для нагрева плодовоовощного сырья
Figure 3. Apparatus for heating fruit and vegetable raw materials

Применение тепла к свежим овощам может привести к серьезному ухудшению качества, включая изменение цвета и текстуры, потеря питательных веществ. Текстурные изменения, происходящие в пищевых продуктах во время термической обработки, приводят к размягчению тканей из-за физических и химических изменений.

Так, Ризви и Тонг предложили математическую модель, описывающую изменения в текстуре обрабатываемого сырья во время термической обработки [5]. Индекс текстуры f выражен как степень изменения текстуры в любое время t и выражается следующим образом

$$f = \ln \frac{(TP - TP_t)}{(TP_0 - TP_\infty)}, \quad (2)$$

где TP_0 – исходное свойство текстуры в нулевое время; TP_t – свойство текстуры в данный момент времени t ; TP – свойство текстуры ненулевого равновесия после длительного нагрева.

Левеншпиль предложил математическую модель, которая описывает изменения в текстуре обрабатываемого сырья во время термической обработки для кинетики реакции 1-го порядка $(1-f)$ построенной против времени (t) и считал ее линейной, а константу скорости (k) отрицательной величиной наклона [7, 20, 21]. Уравнение имеет следующий вид:

$$\ln(1 - f) = \ln \frac{(TP - TP_t)}{(TP_0 - TP_\infty)} = -kt, \quad (3)$$

Для прогнозирования индекса текстуры как функцию времени нагрева (t) при постоянной температуре зависимость имеет вид:

$$TP_t = TP_\infty - TP_\infty * \exp(-k * t), \quad (4)$$

Изменения в текстуре обрабатываемого сырья при термической обработке различных овощей значительно различаются (рисунок 4).

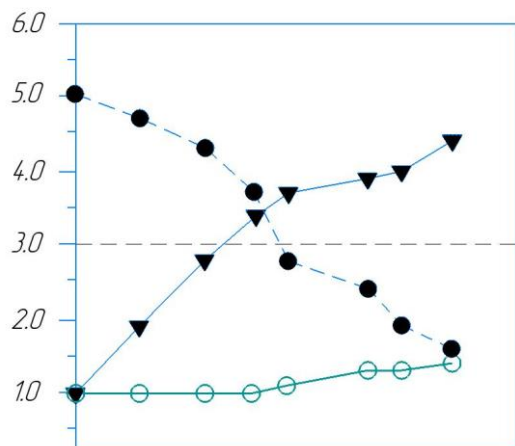


Рисунок 4. Изменения текстуры обрабатываемого сырья во время термической обработки: ---- предел приемлемости; – внешний вид; – сморщивание; – изменение цвета

Figure 4. Changes in the texture of the processing raw material during heat treatment: ---- acceptance limit; – appearance; – wrinkling; – color change

В связи с постоянным повышением требований к качеству исходного продукта (цвет, внешний вид, аромат, вкус) предприятия пищевой промышленности вынуждены непрерывно повышать экономическую эффективность производства и качество выпускаемой продукции. Эффективность производства может быть улучшена системами АСУТП и контроля показателей качества исходного продукта. Для этого требуется разработка более точных математических моделей для оценки показателей качества исходных продуктов для подсистемы АСУТП, описывающих нелинейные процессы и оценить качество исходного продукта массообменного технологического процесса без установки дополнительных потоковых анализаторов (физических датчиков), требующих постоянной калибровки (рисунок 5).

Предложена усовершенствованная модель автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока, что позволяет сформировать оптимальные значения управляющих воздействий для повышения качества исходного продукта с минимальными энергетическими и экономическими затратами.

С целью верификации и практического подтверждения эффективности предложенной усовершенствованной модели автоматизированной системы тепловой обработки были проведены натурные испытания на опытной лабораторной установке, имитирующей процессы пастеризации томатного сока в условиях, приближенных к промышленным.

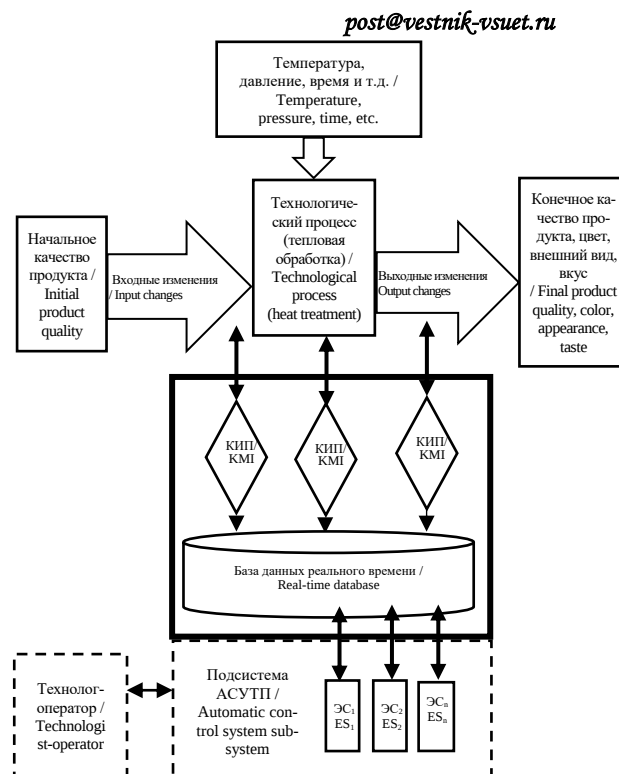


Рисунок 5. Модель автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока: АСУТП – автоматизированной системы управления технологическим процессом (тепловая обработка томатного сока); КИП – контрольно-измерительные приборы; ЭС – экспертный сигнал

Figure 5. Model of an automated heat treatment system for a tomato juice canning apparatus: APCS – automated process control system (heat treatment of tomato juice); KMI – control and measuring instruments; ES – expert signal

Экспериментальная установка представляла собой закрытую термостатируемую емкость объемом 15 литров с установленным погружным ТЭНом, управляемым через цифровой ПИД-регулятор с возможностью задания температурного профиля и регистрации параметров в реальном времени. Температурный режим контролировался с использованием калиброванных термопар типа ТЖК, установленных в трёх контрольных точках по высоте резервуара. Система регистрации данных реализована на базе контроллера Siemens S7-1200 с интерфейсом SCADA, обеспечивающим постоянный мониторинг и запись температуры, времени обработки и показателей качества.

В качестве объекта исследования использовался однородный томатный сок, прошедший предварительное гомогенизирование. Для оценки влияния температурного режима на физико-химические характеристики продукта была реализована серия экспериментов с варьированием следующих параметров: температура тепловой обработки: от 75 °C до 95 °C с шагом 5 °C; время выдержки: 2, 5, 10 и 15 минут; скорость нагрева: стабильная (1.5 °C/мин).

Для количественной оценки качества продукта до и после тепловой обработки были использованы следующие показатели: Цвет – спектрофотометрический анализ с определением отклонения ΔE в модели CIELab; Вязкость – измерялась при 20 °C с использованием ротационного вискозиметра (Brookfield DV2T) в единицах мПа·с; Текстура – оценивалась с помощью текстурного анализатора TA.XT Plus, регистрировалась сила деформации при сжатии; Органолептические характеристики – проводилась дегустационная оценка панели из 5 экспертов по шкале от 1 до 10; Микробиологическая стабильность – определялась по общему числу колоний образующих единиц (КОЕ) до и после обработки.

По результатам натурных испытаний установлено, что оптимальным режимом пастеризации с точки зрения сохранения цвета и текстуры, при этом обеспечивая необходимую микробиологическую стабильность, является температура 85 °C и выдержка 5 минут. При увеличении температуры свыше 90 °C наблюдалось снижение цветового показателя (ΔE увеличивалась до 5.2, что визуально соответствует заметному потемнению), а также значительное падение текстурного индекса (на 18% по сравнению с исходным образцом).

Полученные экспериментальные данные были использованы для калибровки и уточнения математической модели, а также служили базой для настройки параметров регулятора и экспертной системы в рамках АСУТП. Подтверждена высокая степень соответствия между расчетными и экспериментальными значениями индекса текстуры и вязкости (среднеквадратичная ошибка прогнозирования составила менее 4%).

Обсуждение результатов. Полученные в ходе экспериментов данные подтвердили эффективность предложенной математической модели управления тепловой обработкой томатного сока. В отличие от классических подходов, предполагающих фиксированные параметры пастеризации, разработанная модель учитывает динамику изменения текстурных характеристик продукта в зависимости от температуры и времени обработки. Это позволило повысить точность прогноза качества конечного продукта.

Анализ экспериментальных данных показал, что наибольшее влияние на текстуру томатного сока оказывает температурный режим, тогда как время обработки оказывает большее влияние на микробиологическую стабильность. Использование адаптивного управления, основанного на предлагаемой модели, обеспечило достижение оптимального баланса между сохранением питательных веществ, органолептическими свойствами и микробиологической безопасностью.

Сравнительный анализ показал, что при использовании усовершенствованной системы управления удастся снизить отклонения вязкости и цвета от нормативных значений в среднем на 12–18% по сравнению с традиционными режимами. Кроме того, автоматизация процесса позволила сократить энергозатраты на тепловую обработку на 10–15% за счёт более точного регулирования температурных параметров.

Важно отметить, что результаты лабораторных испытаний демонстрируют высокую степень совпадения с результатами, полученными с помощью предложенной модели, что свидетельствует о её высокой адекватности и практической применимости. Это создаёт предпосылки для масштабирования решения на производственные линии предприятий пищевой промышленности.

Заключение

Отмечено, что комбинация времени и температуры, связанная с конкретным процессом термической обработки томатного сока, будет в значительной степени контролировать химические, биохимические и микробиологические изменения, которые будут происходить в пищевом продукте. Изменение соотношения времени и температуры может влиять как на желаемые, так и нежелательные реакции, происходящие во время пастеризации, например, нежелательное потемнение овощей. Среди внешних факторов температура является важнейшим фактором обеспечения качества в производстве и последующем хранении овощей и фруктов.

Констатировано, что эффективность производства может быть улучшена с помощью АСУТП и контроля показателей качества исходного продукта, что позволит оценить качество исходного продукта массообменного технологического процесса без установления дополнительных потоковых анализаторов (физических датчиков), требующих постоянной калибровки. Предложена усовершенствованная модель автоматизированной системы тепловой обработки для аппарата по консервированию томатного сока, что позволяет сформировать оптимальные значения управляющих воздействий для повышения качества исходного продукта с минимальными энергетическими и экономическими затратами.

Проведенные натурные исследования подтвердили работоспособность предложенной модели автоматизированной системы тепловой обработки. Использование лабораторной установки позволило с высокой точностью воспроизвести температурные профили, типичные для реальных производственных условий, и экспериментально доказать возможность оптимизации режима пастеризации с целью минимизации энергетических затрат при одновременном сохранении высокого качества томатного сока.

Литература

- 1 Xu Q., Adyatni I., Reuhs B. Effect of Processing Methods on the Quality of Tomato Products // Food Nutr. Sci. 2018. Vol. 9. No. 2. Article 82545. 13 p. doi: 10.4236/fns.2018.92007
- 2 Jež J., Barba F.J., Witrowa-Rajchert D., et al. Quality Parameters of Juice Obtained from Hydroponically Grown Tomato Processed with High Hydrostatic Pressure or Heat Pasteurization // Int. J. Food Sci. 2020. Art.4350461. doi: 10.1155/2020/4350461
- 3 Illera A.E., Sanz M.T., Trigueros E., Beltrán S., Melgosa R. Effect of High Pressure Carbon Dioxide on Tomato Juice: Inactivation Kinetics of PME and Quality Parameters // J. Food Eng. 2018. Vol. 239. P. 64–71.
- 4 Porretta S., Rovere P., Birzi G., Ghizzoni R., Vicini M. Combined High Pressure and Thermal Treatments for Processing of Tomato Puree: Microbial and Quality Evaluation // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2018.
- 5 Badin E.E., Mercatante M.M., Mascheroni R.H. Effect of Pasteurization on Color, Ascorbic Acid and Lycopene of Crushed Tomato: Computational Study with Experimental Validation // J. Food Eng. 2023. Vol. 337. P. 111218.
- 6 Lucini L., Rocchetti G., Kane D. Phenolic Fingerprint Allows Discriminating Processed Tomato Products and Tracing Processing Sites // Food Control. 2019. Vol. 73. P. 696–703.
- 7 Sapei L., et al. Impact of Food Matrix and Processing on the Bioaccessibility of Vitamin C in Fruit-Juice Beverages // J. Funct. Foods. 2020. Vol. 67. P. 103–112.
- 8 Szczepańska J., et al. ABTS, FRAP Assessment of Açaí Juice Affected by High-Pressure and Thermal Pasteurization // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2019. Vol. 52. P. 249–258.
- 9 Singh P., Heldman D. Mathematical Modeling of Microwave-Assisted Continuous Flow Pasteurization // J. Food Process Eng. 2018. Vol. 41, No. 4. P. e12851.
- 10 Aguiar E.M., Gut J.A. Experimental and Numerical Evaluation of Continuous Pasteurization of Açaí Pulp // J. Food Eng. 2022.
- 11 Ferreira A.G., Pinto J. Time–Temperature Modelling for Continuous HTST Pasteurization Using Plate Heat Exchangers // Food Bioprocess Technol. 2018. Vol. 11. P. 145–155.
- 12 Porretta S., et al. Heterogeneous Flow Model for Pasteuriser Design // Chem. Eng. Sci. 2018.
- 13 Frontiers article: Analysis of Environmental Impact & Pasteurization in Tomato Industry // Front. Sustain. Food Syst. 2024. Vol. 8. P. 1400274.
- 14 Sui X., Zhang T., Jiang L. Soy Protein Molecular Structure and Processing Technologies // Annu. Rev. Food Sci. Technol. 2021. Vol. 12. P. 49–68.
- 15 Zhu L., Spachos P., Pensini E., Plataniotis K. Deep Learning and Machine Vision for Food Processing: Survey // arXiv. 2021.
- 16 Цынаева А.А., Цынаева Е.А. Исследование систем автоматизированного управления теплоснабжением // Градостроительство и архитектура. 2018. № 12 (43). С. 1–10.
- 17 Дьяченко Е.П., Александян И.Ю., Разин О.А., Иванова М.И. Исследование влияния конвективного энергоподвода на интенсивность инфракрасной сушки плодов томата // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. «Процессы и аппараты пищевых производств». 2019. № 4. С. 1–12.
- 18 Шисленко Д.М., Бастрон А.В. Мобильная гелиосушильная установка для сушки плодов ягодных культур // Вестник КРАСГАУ. 2018. № 6 (141). С. 1–15.
- 19 Попов В.М., и др. Математическое моделирование процесса сушки с использованием пленочных электронагревателей // Современные тенденции технологического развития АПК. 2019. С. 1–20.
- 20 Викторов А.С. Автоматизация технологических процессов при переработке сырья растительного происхождения // Вестник АГТУ. 2020. С. 1–10.
- 21 Чусова А.Е., Жаркова И.М., Коркина А.В., Пронькина А.А., Хиценко В.П. Алкогольные и безалкогольные напитки с томатными продуктами // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52, № 3. С. 1–15.
- 22 Особенности высокотехнологичной переработки томатов // Журнал «Живые и биокосные системы». 2022. № 15. С. 1–12.

References

- 1 Xu Q., Adyatni I., Reuhs B. Effect of Processing Methods on the Quality of Tomato Products. Food and Nutrition Sciences. 2018. vol. 9. no. 2. pp. 1-13. doi: 10.4236/fns.2018.92007.
- 2 Jež J., et al. Quality Parameters of Juice Obtained from Hydroponically Grown Tomato Processed with High Hydrostatic Pressure or Heat Pasteurization. International Journal of Food Science. 2020. 4350461. doi: 10.1155/2020/4350461.
- 3 Illera A.E., Sanz M.T., Trigueros E., Beltrán S., Melgosa R. Effect of High Pressure Carbon Dioxide on Tomato Juice: Inactivation Kinetics of PME and Quality Parameters. Journal of Food Engineering. 2018. vol. 239. pp. 64-71.
- 4 Porretta S., Rovere P., Birzi G., Ghizzoni R., Vicini M. Combined High Pressure and Thermal Treatments for Processing of Tomato Puree: Microbial and Quality Evaluation. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2018. vol. 5. no. 1. pp. 9-16.
- 5 Badin E.E., Mercatante M.M., Mascheroni R.H. Effect of Pasteurization on Color, Ascorbic Acid and Lycopene of Crushed Tomato: Computational Study with Experimental Validation. Journal of Food Engineering. 2023. vol. 337. 111218. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111218.
- 6 Lucini L., Rocchetti G., Kane D. Phenolic Fingerprint Allows Discriminating Processed Tomato Products and Tracing Processing Sites. Food Control. 2019. vol. 73. pp. 696-703. doi: 10.1016/j.foodcont.2018.10.030.
- 7 Sapei L., et al. Impact of Food Matrix and Processing on the Bioaccessibility of Vitamin C in Fruit-Juice Beverages. Journal of Functional Foods. 2020. vol. 67. 103112. doi: 10.1016/j.jff.2020.103112.
- 8 Szczepańska J., et al. ABTS, FRAP Assessment of Açaí Juice Affected by High-Pressure and Thermal Pasteurization. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2019. vol. 52. pp. 249-258. doi: 10.1016/j.ifset.2018.12.004.

- 9 Singh P., Heldman D. Mathematical Modeling of Microwave-Assisted Continuous Flow Pasteurization. *Journal of Food Process Engineering*. 2018. vol. 41. no. 4. e12851. doi: 10.1111/jfpe.12851.
- 10 Aguiar E.M., Gut J.A. Experimental and Numerical Evaluation of Continuous Pasteurization of Açaí Pulp. *Journal of Food Engineering*. 2022. vol. 313. 110756. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110756.
- 11 Ferreira A.G., Pinto J. Time-Temperature Modeling for Continuous HTST Pasteurization Using Plate Heat Exchangers. *Food and Bioprocess Technology*. 2018. vol. 11. pp. 145-155. doi: 10.1007/s11947-017-1993-1.
- 12 Porretta S., et al. Heterogeneous Flow Model for Pasteuriser Design. *Chemical Engineering Science*. 2018. vol. 175. pp. 1-10. doi: 10.1016/j.ces.2017.09.020.
- 13 Analysis of Environmental Impact & Pasteurization in Tomato Industry. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2024. vol. 8. 1400274. doi: 10.3389/fsufs.2024.1400274.
- 14 Sui X., Zhang T., Jiang L. Soy Protein Molecular Structure and Processing Technologies. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2021. vol. 12. pp. 49-68. doi: 10.1146/annurev-food-062520-093352.
- 15 Zhu L., Spachos P., Pensini E., Plataniotis K. Deep Learning and Machine Vision for Food Processing: Survey. *arXiv*. 2021. 2103.16106.
- 16 Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A. Study of automated heat consumption control systems. *Urban Development and Architecture*. 2018. no. 12 (43). pp. 45-50. (in Russian).
- 17 Dyachenko E.P., Aleksandryan I.Yu., Razin O.A., Ivanova M.I. Study of the influence of convective energy supply on the intensity of infrared drying of tomato fruits. *Scientific Journal of NRU ITMO. Series: Processes and Equipment of Food Production*. 2019. no. 4. pp. 12-18. (in Russian).
- 18 Shislenko D.M., Bastron A.V. Mobile helio-drying unit for drying fruits of berry crops. *Bulletin of KRASGAU*. 2018. no. 6 (141). pp. 23-28. (in Russian).
- 19 Popov V.M., et al. Mathematical modeling of the drying process using film electric heaters. *Modern Trends in Technological Development of Agro-Industrial Complex*. 2019. pp. 112-118. (in Russian).
- 20 Viktorov A.S. Automation of technological processes in the processing of raw materials of plant origin. *Bulletin of ASTU*. 2020. no. 3. pp. 45-50. (in Russian).
- 21 Chusova A.E., Zharkova I.M., Korkina A.V., Pronkina A.A., Khitsenko V.P. Alcoholic and non-alcoholic drinks with tomato products. *Equipment and Technology of Food Production*. 2022. vol. 52. no. 3. pp. 34-40. (in Russian).
- 22 Features of high-tech processing of tomatoes. *Journal "Living and Bio-Inert Systems"*. 2022. no. 15. pp. 67-72. (in Russian).
- 23 Mathematical modeling of the tomato juice evaporation process. *7Universum Magazine*. 2019. no. 12. pp. 45-50. (in Russian).

Сведения об авторах

Сергей В. Громов к.т.н., доцент, кафедра оборудование пищевых производств, Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, ул. Щорса, 31, г. Донецк, 283048, Донецкая Народная Республика, egromov.serg2020@m.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-2661-3880>

Information about authors

Sergey V. Gromov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, food production equipment department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 31, Shchorsa str., Donetsk, 283048, Donetsk People's Republic, egromov.serg2020@m.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-2661-3880>

Вклад авторов

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

Contribution

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/08/2023	После редакции 18/08/2023	Принята в печать 10/09/2023
Received 01/08/2023	Accepted in revised 18/08/2023	Accepted 10/09/2023

Применение технологии частичной выпечки кексов специализированного назначения в Республике Саха (Якутия)

Кира В. Иванова ^{1,2}	kiravlad85@mail.ru	 0000-0002-2722-7825
Ирина П. Березовикова ²	ib234546@gmail.com	 0000-0001-5897-7699
Ольга Д. Варнавская ²	olvarnak@ya.ru	 0009-0000-2107-4381

1 Арктический государственный агротехнологический университет, ш.Сергеляхское, 3 км, д.3, г.Якутск, 677007, Россия

2 Сибирский университет потребительской кооперации, пр.Карла Маркса, 26, г.Новосибирск, 630087, Россия

Аннотация. Мучные кондитерские изделия (кексы) являются привлекательной позицией для производства в качестве продукта специализированного назначения, их рецептуры могут быть сконструированы в соответствии с потребностями потребителя, с заданными свойствами. Срок годности таких изделий ограничен 7 сутками. Сложная логистика в отдаленные улусы Республики Саха (Якутия) потенцирует разработку рецептур и технологий продуктов с длительным сроком годности. Для мучных кондитерских изделий таким решением может быть применение частичной выпечки. В этой связи целью исследования является применение технологии отложенной частичной выпечки специализированных мучных кондитерских изделий (кексов) для использования в отдаленных районах Республики Саха (Якутия). Задачи исследования: отработка параметров отложенной частичной выпечки цельнозерновых безглютеновых кексов; исследование показателей качества на разных этапах производства и в процессе хранения; исследование содержания предшественников образования акриламида (аспарагиновой кислоты и аспарагина). Предлагаемая рецептура и технология позволяет увеличить срок годности изделий на основе смеси рисовой цельнозерновой муки и гречки зеленой цельнозерновой до 180 суток при хранении частично выпеченных изделий при минус 18°C. Изделия могут быть рекомендованы как безглютеновый продукт и источник пищевых волокон, с содержанием последних 16% рекомендуемого суточного потребления. Органолептические показатели изделий после довыпечки соответствуют требованиям нормативных документов. Получены данные о содержании аспарагина как предшественника образования акриламида. Суммарное содержание аспарагиновой кислоты и аспарагина при традиционной выпечке на 10,6% ниже, чем в довыпеченных изделиях. Этот результат позволяет прогнозировать и снижение концентрации акриламида в таких изделиях частичной выпечки с довыпечкой после замораживания. Предложенная технология частичной выпечки для цельнозерновых безглютеновых кексов позволяет получить продукт стандартного качества независимо от места его производства, увеличить срок годности продукта, оставляя при этом «чистую этикетку», без использования пищевых добавок и обеспечить стабильность обеспечения населения труднодоступных районов Республики Саха (Якутия) продукцией специализированного назначения.

Ключевые слова: Республика Саха (Якутия), кексы специализированного назначения, частичная выпечка.

Application of the technology of partial baking of special-purpose cakes in the Republic of Sakha (Yakutia)

Kira V. Ivanova ^{1,2}	kiravlad85@mail.ru	 0000-0002-2722-7825
Irina P. Berezovikova ²	ib234546@gmail.com	 0000-0001-5897-7699
Olga D. Varnavskaya ²	olvarnak@ya.ru	 0009-0000-2107-4381

1 Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye sh, 3 km, b.3, Yakutsk, 677007, Russia

2 Siberian University of Consumer Cooperation, 26 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630087, Russia

Abstract. Pastry (cakes) are an attractive position for production as a specialized product, their recipes can be designed in accordance with the needs of the consumer, with the specified properties. The shelf life of such products is limited to 7 days. Complex logistics to remote uluses of the Republic of Sakha (Yakutia) potentiates the development of recipes and technologies for products with a long shelf life. For pastry, this solution may be the use of partial baking. In this regard, the aim of the study is to apply the technology of delayed partial baking of specialized pastry (cakes) for use in remote areas of the Republic of Sakha (Yakutia). Research objectives: to develop parameters of delayed partial baking of whole-grain gluten-free cakes; study of quality indicators at different stages of production and during storage; study of the content of precursors to acrylamide formation (aspartic acid and asparagine). The proposed recipe and technology allow increasing the shelf life of products based on a mixture of whole grain rice flour and green whole grain buckwheat up to 180 days when storing partially baked products at minus 18°C. The products can be recommended as a gluten-free product and a source of dietary fiber, with the content of the latter 16% of the recommended daily intake. The organoleptic properties of the products after additional baking meet the requirements of regulatory documents. Data on the content of asparagine as a precursor to the formation of acrylamide were obtained. The total content of aspartic acid and asparagine in traditional baking is 10.6% lower than in additionally baked products. This result allows us to predict a decrease in the concentration of acrylamide in such partially baked products with additional baking after freezing. The proposed technology of partial baking for whole grain gluten-free cakes allows us to obtain a product of standard quality regardless of the place of its production, to increase the shelf life of the product, while leaving a "clean label", without the use of food additives and to ensure the stability of supplying the population of hard-to-reach areas of the Republic of Sakha (Yakutia) with specialized products.

Keywords: Respublika Sakha (Yakutia), special-purpose cakes, partial baking.

Для цитирования

Иванова К.В., Березовикова И.П., Варнавская О.Д. Применение технологии частичной выпечки кексов специализированного назначения в Республике Саха (Якутия) // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 23–29. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-23-29

For citation

Ivanova K.V., Berezovikova I.P., Varnavskaya O.D. Application of the technology of partial baking of special-purpose cakes in the Republic of Sakha (Yakutia). Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 23–29. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-23-29

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

Введение

Сохранение здоровья и повышение качества жизни жителей Арктической зоны является важной составляющей национальной безопасности. На территории Республики Саха (Якутия) проживает 0,7% населения страны. Важным фактором обеспечения качества жизни жителей Севера является питание, которое отличается от традиционного типа питания, что связано с продолжительными периодами низких температур, традициями питания коренных жителей, а также рассредоточенности населения по территории Республики, общая площадь которой составляет 3103,2 тыс. км², или 1/5 часть России. Северная часть республики – это труднодоступные районы, снабжение продовольствием осуществляется преимущественно воздушным путем, при благоприятных метеорологических условиях.

Исследования состояния питания, пищевых привычек и заболеваемости у жителей Арктических районов Якутии привели к выводу, что актуальной задачей для них является обеспечение сбалансированным и обогащенным дефицитными в условиях высоких широт компонентами: пищевыми волокнами, полиненасыщенными жирными кислотами, полифенольными соединениями, витаминами питанием [1]. Добиться этого возможно путем использования продуктов специализированного назначения. Например, обогащенных йодом, пищевыми волокнами, с низким гликемическим индексом, безглютеновых изделий и др.

В настоящее время ведутся разработки по разным направлениям создания таких продуктов, с использованием арктического сырья, которое обеспечивает устранение дефицита основных нутриентов: хлебобулочных изделий, обогащенных ягелем, бетулином, йодом, с витаминами и др. [2–3]

Среди всех групп продуктов питания мучные кондитерские изделия не являются обязательным компонентом рациона, но вместе с тем спрос на них в Республике достаточно высок. По данным статистики Республики Саха (Якутия), производство кондитерских изделий увеличилось на 7,4% [4].

Привлекательной позицией в группе мучных кондитерских изделий являются кексы. Их рецептуры могут быть сконструированы в соответствии с потребностями потребителей, кексы разрешены для включения в рацион детей в детских дошкольных учреждениях, школьном питании, кексовые изделия с улучшенными потребительскими свойствами и пищевой ценностью занимают определенное место в рационах питания лиц с алиментарно-зависимыми заболеваниями.

Вместе с тем срок годности таких изделий ограничен 7 сутками. В связи со сложной логистикой в отдаленные северные районы (улусы) это становится одной из проблем за счет снижения их качества и безопасности. Решением проблемы может быть изготовление изделий полуфабрикатов высокой степени готовности, таких как замороженных после частичной выпечки. Большим преимуществом таких изделий является длительный срок годности, независимость от наличия сырья для производства специализированного продукта, простота приготовления.

Другим аспектом в пользу применения частичной выпечки являются результаты исследований последних лет, показавших, что предварительное замораживание крахмалсодержащих продуктов может служить фактором снижения образования акриламида, формирующегося при температурах свыше 120° С в крахмалсодержащих продуктах в процессе реакции аспарагина с редуцирующими сахарами в условиях реакции Майяра [5].

Цель исследования – применение технологии отложенной частичной выпечки специализированных мучных кондитерских изделий (кексов) для использования в отдаленных районах Республики Саха (Якутия).

Материалы и методы

Сырье: мука рисовая цельнозерновая ТУ 9293–002–43175543–03; зерно гречихи непропаренное дробленое (из зеленой гречки цельнозерновой) СТО 21318887–004–2013; мука пшеничная хлебопекарная высший сорт ГОСТ 26574–2017; сахар-песок ГОСТ 33222–2015; масло сливочное 82,5% ГОСТ 32261–2013; разрыхлитель теста ТУ 10.89.19–017–42450906–2018; яйца куриные ГОСТ 31654–2012; соль поваренная пищевая ГОСТ Р 51574–2018.

Для оценки качества применялись стандартные органолептические и физико-химические методы исследований, принятые в кондитерской отрасли: органолептические показатели по ГОСТ 5897–90; массовая доля влаги по ГОСТ 5900–2014; плотность по ГОСТ 15810–2014; аспарагин – методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель -105М». Структурно-механические показатели мякиша – на структуромере СТ-2. Активность воды – на анализаторе активности воды Aqualab 4TE Ланфор.

В качестве контрольных образцов исследованы тесто и готовые изделия по рецептуре на основе пшеничной муки; экспериментальные образцы – из смеси цельнозерновой рисовой и муки и гречки (30:70%) (таблица 1). Технология полуфабриката теста традиционная для кексов с разрыхлителем [6].

Параметры выпечки: частичная выпечка в пароконвектомате в режиме конвекции при температуре 180 °С до температуры в центре 60 °С, далее образцы замораживались до температуры в центре -18 °С в шкафу интенсивного замораживания, довыпечка производилась в пароконвектомате в режиме конвекции при температуре 180 °С до температуры в центре изделий 99 °С. Контроль температуры производился термощупами, встроенными в тепловое и холодильное оборудование.

Замороженные полувыпеченные изделия вакуумировались и закладывались на хранение при температуре -18 °С. Точки исследования образцов определялись по МУК 4.2.1847–04 коэффициент резерва – 1,15, для срока годности 6 месяцев.

Дефростация перед довыпечкой производилась в холодильном шкафу в течение 12 часов при температуре 4 ± 2 °С, затем при температуре 18 ± 2 °С в течение 30 мин до достижения температуры в центре изделий 18 ± 2 °С.

Помимо отложенной выпечки образцов была использована и традиционная выпечка,

в пароконвектомате в режиме конвекции при температуре 180 °С до температуры в центре 99 °С

Статистическая обработка результатов исследования – SPSS, v. 17.0, сравнение межгрупповых различий средних значений – непараметрические тесты. Значимость различий при 95% уровне надежности ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлена рецептура экспериментальных изделий. Обоснование рецептуры приведено авторами ранее [7].

В таблице 2 приведены физико-химические показатели.

Пищевая ценность на г / 100 г. продукта: белки – 6,0, жиры – 22,5, углеводы – 44,0, пищевые волокна 4,0 г. В порции (80 г.): белки 4,8 г, жиры -18,0 г, углеводы 35,2 г, пищевые волокна 3,2 г. Энергетическая ценность: 504,3 ккал; 2111,4 кДж. Содержание пищевых волокон в порции кекса (> 15% суточной рекомендуемой потребности) дает возможным рекомендовать изделия в качестве их источника.

Таблица 1.

Рецептура кекса цельнозернового безглютенового

Table 1.

Recipe for whole grain gluten free cakes

Сырьё Ingredients	Массовая доля сухих веществ Dry weight, %	Расход сырья на 100 шт. готовых изделий, г Amount of ingredients consumption per 100 portions baked cakes, g	
		в натуре in kind	в сухих веществах in dry matter
Смесь цельнозерновая Whole grain mixture	85,00	3600,00	3078,00
Масло сливочное 82,5% Butter 82.5%	84,00	2160,00	1814,40
Меланж (из яиц C1) Melange (from C1 eggs)	27,00	1800,00	486,00
Сахар-песок Granulated sugar	99,85	1350,00	1347,98
Разрыхлитель теста Baking powder	82,00	81,00	66,42
Соль Salt	96,50	9,00	8,69
Итого Total	-	9000,00	6801,48
Выход Portion size	78,0	8000,00	6240,00
Влажность Moisture 22,0% $\pm$ 2,0%			

Таблица 2.

Физико-химические показатели кексов отложенной выпечки ($M \pm SE$)

Table 2.

Physicochemical properties of delayed baking cakes ($M \pm SE$)

Показатели Parameters	Традиционная выпечка Traditional baking		Отложенная выпечка Delayed baking			
	Контроль Control	Эксперимент Experiment	Контроль Control		Эксперимент Experiment	
			Довыпечка 180 сут Re-baking 180 days storage	Довыпечка 207 суток Re-baking 207 days storage*	Довыпечка 180 сут Re-baking 180 days storage	Довыпечка 207 суток Re-baking 207 days storage*
Массовая доля влаги Moisture	19,9 $\pm$ 0,3 ^a	22,6 $\pm$ 0,15 ^A	20,0 $\pm$ 0,12 ^a	19,5 $\pm$ 0,16 ^A	19,0 $\pm$ 0,71 ^a	19,7 $\pm$ 0,21 ^A
Упек Baking loss	10,7 $\pm$ 0,10 ^b	10,5 $\pm$ 0,24 ^B	12,11 $\pm$ 0,27 ^a	12,2 $\pm$ 0,001 ^a	13,3 $\pm$ 0,001 ^A	14,0 $\pm$ 0,31 ^A
Плотность Density	0,52 $\pm$ 0,01 ^c	0,64 $\pm$ 0,001 ^B	0,70 $\pm$ 0,12 ^b	0,75 $\pm$ 0,001 ^a	0,75 $\pm$ 0,001 ^A	0,79 $\pm$ 0,02 ^A
Высота изделия Product height	5,7 $\pm$ 0,11 ^a	4,8 $\pm$ 0,06 ^A	5,6 $\pm$ 0,13 ^a	5,2 $\pm$ 0,07 ^b	4,9 $\pm$ 0,02 ^A	4,4 $\pm$ 0,08 ^B

Примечание: прописными и строчными буквами показаны внутригрупповые различия (Бонферони тест, $p < 0,05$)

Note: Mean values with different superscripts on the same column significantly (Bonferroni test, $p < 0,05$)

* при сроке годности 6 месяцев, с учетом коэффициента резерва | shelf life of 6 months, considering the reserve factor

Влияние двухэтапной выпечки кексов с замораживанием, низкотемпературным хранением и последующей довыпечкой было впервые представлено в 2008 году. Показано, что на качество довыпеченных полуфабрикатов после размораживания и повторной выпечки влияет время полувыпечки перед его замораживанием и промежуточное время хранения в замороженном состоянии. Предварительная выпечка продолжительностью до 20 минут, замораживание и хранение до 3 месяцев показало такие же показатели качества, как в контрольных образцах. Качество довыпеченных изделий после низкотемпературного хранения не зависело от времени выпечки [8].

В нашем исследовании время полувыпечки составляло 10 минут, что давало стабильный мякиш, не оседающий после вынимания кексов и их замораживании. Закономерности изменения качества кексов были аналогичны приведенным в указанном исследовании.

Массовая доля влаги во всех исследованных образцах не зависела от вида муки и способа выпечки и соответствовала требованиям действующих нормативных документов (12–24%).

Упек изделий, приготовленных как из пшеничной муки, так и из цельнозерновой смеси, с традиционной выпечкой был ниже, чем у довыпеченных изделий после низкотемпературного хранения полувыпеченных замороженных полуфабрикатов. Это можно связать с тем, что в случае отложенной частичной выпечки суммарные потери складываются из потерь при полувыпечке (в среднем 4%), потерь при интенсивном замораживании и дефростации (до 1%) и довыпечке, независимо от вида муки.

Плотность образцов, выпеченных из пшеничной муки по традиционной технологии ниже, чем у таковых из цельнозерновой смеси. Повышение плотности можно объяснить различиями химического состава пшеничной муки и цельнозерновой безглютеновой смеси – высоким содержанием пищевых волокон (до 10%) в последней. Применение технологии отложенной частичной выпечки приводило к повышению плотности как экспериментальных, так и контрольных образцов, что можно связать с процессами ретроградации крахмала в процессе замораживания полувыпеченных образцов.

Максимальная высота изделий была у образцов из пшеничной муки и была одинаковой как при традиционной выпечке, так и в довыпеченных образцах после 6-месячного низкотемпературного хранения. Высота кексов из цельнозерновой смеси меньше, чем из пшеничной муки на 4,1%.

При этом она была одинаковой как при традиционном способе выпечки, так и при довыпечке после хранения (таблица 2). Установлены отрицательные корреляции между плотностью изделий и их высотой у довыпеченных изделий. Для образцов из пшеничной муки при 6-месячном хранении $r = -1,000$ ($p < 0,01$), из цельнозерновой смеси $r = -0,974$ ($p < 0,01$). Для традиционной выпечки значимых корреляций не установлено. На фазе исследования с учетом коэффициента резерва (207 суток) связи аналогичны 6-месячному хранению.

На рисунке 1 представлены фотографии образцов выпеченных изделий.

Несмотря на различия в физико-химических показателях, органолептические показатели всех исследованных образцов соответствовали требованиям, установленными ГОСТ 15052–2014.

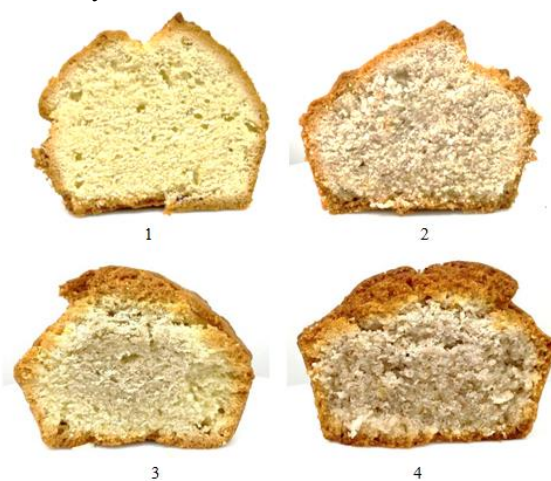


Рисунок 1. Образцы выпеченных кексов: 1 – пшеничный традиционная выпечка; 2 – цельнозерновой традиционная выпечка; 3 – пшеничный довыпечка частично выпеченных; 4 – цельнозерновой довыпечка частично выпеченных

Figure 1. Samples of baked cakes: 1 – wheat traditional baking; 2 – whole grain traditional baking; 3 – wheat re-baking partially baked; 4 – whole grain re-baking partially baked

Для объективной оценки определена общая деформация мякиша кексов. У свежиспеченных кексов этот показатель не различался для контрольного и экспериментального образцов: $5,02 \pm 0,08$ и $4,89 \pm 0,05$ мм, соответственно ($p = 0,085$). У довыпеченных изделий после 180-суточного низкотемпературного хранения этот показатель также не зависел от вида изделия ($p = 0,162$) и уменьшился по сравнению с исходным показателем в 4,1 раза и был одинаковым с общей деформацией цельнозерновых кексов традиционной выпечки на 7 день хранения ($1,20 \pm 0,07$ мм). Снижение показателя общей деформации при хранении кексов является закономерным процессом, обусловленным процессами ретроградации крахмала.

Выпечка кексов производится при температуре 180°C , что для крахмалсодержащих продуктов является фактором образования акриламида. Мучные кондитерские изделия относятся к продуктам с высоким содержанием акриламида [9], при повышенном уровне содержания которого в рационе питания возможно проявление токсического и канцерогенного эффекта. Предшественниками образования акриламида являются аспарагин и редуцирующие сахара. Исследователи отмечают положительные корреляции между содержанием аспарагина и образованием акриламида [10–12]. Для оценки гипотезы о влиянии технологии кексов на формирование акриламида, проведено определение суммарного содержания аспарагиновой кислоты и аспарагина (рисунок 2).

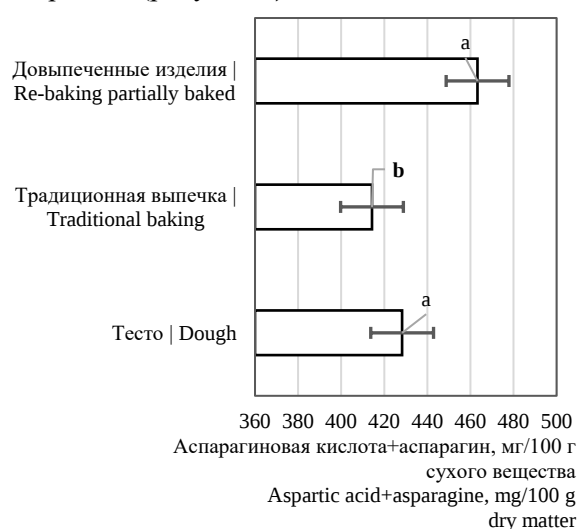


Рисунок 2. Аспарагиновая кислота и аспарагин в цельнозерновых кексах разных способов выпечки. Примечание: строчными буквами показаны внутригрупповые различия (Бонферони тест, $p < 0,05$)

Figure 2. Aspartic acid and asparagine in whole grain cakes of different baking methods. Note: Mean values with different superscripts significantly (Bonferroni test, $p < 0,05$)

Суммарное содержание аспарагиновой кислоты и аспарагина при традиционной выпечке на 10,6% ниже, чем в довыпеченных изделиях. Этот результат позволяет прогнозировать и снижение концентрации акриламида в таких изделиях частичной выпечки с довыпечкой после замораживания.

Факторами, влияющими на содержание акриламида в термически обработанных пищевых продуктах, таких как хлебобулочные изделия, являются начальная концентрация прекурсоров, их соотношение, качество муки, такое как интенсивность помола муки, условия ферментации, методы термической обработки рН,

содержание и активность воды, физическое состояние продукта, добавки и т. д. [13,14]. Показано, что показатель активности воды в диапазоне от 0,4 до 0,8 и содержании влаги $<5\%$, будет способствовать реакции Майяра, что впоследствии приведет к образованию акриламида, а повышение показателя более 0,8 вызывает снижение скорости реакции Майяра, в результате разбавления необходимых субстратов для ее протекания. По мнению Мустафы и др. и Бассамы и др. [15–17], активность воды (a_w) является одним из факторов, влияющих на количество образующегося акриламида при термической обработке пищевых продуктов.

В нашем исследовании показатель A_w для изделия частичной выпечки перед довыпечкой составил 0,88, что также является хорошим прогностическим фактором снижения образования акриламида.

Применение технологии отложенной частичной выпечки с замораживанием полувыпеченных изделий также может привести к снижению гликемического индекса продукта. Такой эффект был показан в работе Borczak, B. et al [18, 19] и требует дальнейшего изучения.

Закключение

Предлагаемая рецептура и технология позволяет увеличить срок годности изделий до 180 суток. Изделия могут быть рекомендованы как безглютеновый продукт и источник пищевых волокон, с содержанием последних 16% рекомендуемого суточного потребления [20].

Органолептические показатели изделий после довыпечки соответствуют требованиям нормативных документов.

Получены данные о содержании аспарагина как предшественника образования акриламида. Суммарное содержание аспарагиновой кислоты и аспарагина при традиционной выпечке на 10,6% ниже, чем в довыпеченных изделиях. Этот результат позволяет прогнозировать и снижение концентрации акриламида в таких изделиях частичной выпечки с довыпечкой после замораживания.

Предложенная технология частичной выпечки для цельнозерновых безглютеновых кексов позволяет получить продукт стандартного качества независимо от места его производства, увеличить срок годности продукта, оставляя при этом «чистую этикетку», без использования пищевых добавок и обеспечить стабильность обеспечения населения труднодоступных районов Республики Саха (Якутия) продукцией специализированного назначения.

Литература

- 1 Никитина А.М., Саввина Н.В., Гольдерова А.С. Взаимосвязь пищевых привычек и заболеваний у жителей арктических районов Якутии (по данным опроса) // Социальные аспекты здоровья населения [сетевое издание]. 2024. № 70(3). С. 9. doi: 10.21045/2071–5021–2024–70–3–9.
- 2 Степанов К.М., Колодезникова В.С., Евсеев А.А. Перспективы создания пищевых продуктов специального назначения в сочетании с арктическим сырьем // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник». 2022. № 9. 10 с.
- 3 Хлеб с бетулином – уникальная разработка якутских ученых. URL: <https://prez.ysn.ru/novosti/hleb-s-betulinom-unikalnaya-razrabo/>
- 4 Местникова А.В., Федорова Н.А. Современное состояние рынка хлебобулочных и кондитерских изделий Республики Саха (Якутия) // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. 2024. № 2. С. 189–194. doi: 10.47576/2949–1894.2024.2.2.024.
- 5 Shuping Zhong, Ze He, Muneeba Naseer Chaudhary, Yaxuan Mu, et al. Effect of freezing pretreatment on the mitigation of acrylamide in potato chips and French fries // LWT. 2024. № 200. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116174.
- 6 Сборник рецептов мучных кондитерских и булочных изделий для предприятий общественного питания: справочник. СПб.: Троицкий мост, 2017. 194 с. ISBN 978–5–4377–0101–0.
- 7 Иванова К.В., Березовикова И.П. Разработка состава безглютеновой смеси для кексов // Потребительский рынок: устойчивое развитие в условиях новых вызовов: сб. мат. Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.Ю. Миллера. Новосибирск, 2022. С. 136–141.
- 8 Karaoğlu, M.M., Kotancilar, H.G., Gerçekaslan, K.E. The effect of par-baking and frozen storage time on the quality of cupcake // International Journal of Food Science & Technology. 2008. № 43(10). P. 1778–1785. doi: 10.1111/j.1365–2621.2007.01698.x.
- 9 Хотимченко С.А., Гмошинский И.В., Багрянцева О.В., Шатров Г.Н. и др. Химическая безопасность пищи: развитие методической и нормативной базы // Вопросы питания. 2020. № 89(4). С. 110–124. doi: 10.24411/0042–8833–2020–10047.
- 10 Govindaraju, I., Sana, M., Chakraborty, I., Rahman, M.H. et al. Dietary Acrylamide: A Detailed Review on Formation, Detection, Mitigation, and Its Health Impacts // Foods. 2024. № 13. P. 556. doi: 10.3390/foods13040556.
- 11 Ramesh R., Ramniwas B., Rustagi, S., Jafari, Z. et al. Acrylamide in food products: Formation, technological strategies for mitigation, and future outlook // Food Frontiers. 2024. № 5. P. 1063–1095. doi: 10.1002/fft2.368.
- 12 Schouten M.A., Tappi S., Glicerina V., Rocculi P. et al. Formation of acrylamide in biscuits during baking under different heat transfer conditions // LWT – Food Science and Technology. 2022. № 153. P. 112541. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112541.
- 13 Sarion C., Codină G., Dabija A. Acrylamide in Bakery Products: A Review on Health Risks, Legal Regulations and Strategies to Reduce Its Formation // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2021. № 18(8). P. 4332. doi: 10.3390/ijerph18084332.
- 14 Чернова А.В., Петроченкова А.В. Регламентирование содержания контаминанта акриламида в пищевой продукции // Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. № 1(63). С. 20–27.
- 15 Michalak J., Czarnowska-Kujawska M., Klepacka J., Gujska E. Effect of Microwave Heating on the Acrylamide Formation in Foods // Molecules. 2020. № 25. P. 4140. doi: 10.3390/molecules25184140.
- 16 Pucci M., Akilloğlu H.G., Bevilacqua M., Abate G. et al. Investigation of Maillard reaction products in plant-based milk alternatives // Food Res. Int. 2024. № 198. P. 115418. doi: 10.1016/j.foodres.2024.115418.
- 17 Bassama J., Brat P., Bohuon P., Hocine B. et al. Acrylamide kinetic in plantain during heating process: Precursors and effect of water activity // Food Res. Int. 2011. № 44. P. 1452–1458.
- 18 Borczak B. et al. Comparison of glycemic responses to frozen and non-frozen wheat rolls in human volunteers-a short report // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. 2008. № 58(3). P. 373–376.
- 19 Borczak B., Sikora E., Sikora M., Haesendonck V. et al. The impact of sourdough addition to frozen stored wheat-flour rolls on glycemic response in human volunteers // Starch – Stärke. 2011. № 63(12). P. 801–807. doi: 10.1002/star.201100055.
- 20 Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: Методические рекомендации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 72 с.

References

- 1 Nikitina A.M., Savvina N.V., Golderova A.S. The relationship between eating habits and diseases in residents of the Arctic regions of Yakutia (according to survey data). Social aspects of population health. 2024. no. 70(3). p. 9. doi:10.21045/2071–5021–2024–70–3–9 (in Russian)
- 2 Stepanov K.M., Kolodeznikova V.S., Evseev A.A. Prospects for creating special-purpose food products in combination with arctic raw materials. Scientific online journal "Stolypin Bulletin". 2022. no. 9. 10 p. (in Russian)
- 3 Bread with betulin – a unique development of Yakut scientists. URL: <https://prez.ysn.ru/novosti/hleb-s-betulinom-unikalnaya-razrabo/> (in Russian)
- 4 Mestnikova A.V., Fedorova N.A. Current state of the bakery and confectionery market in the Republic of Sakha (Yakutia). Innovative economy: information, analytics, forecasts. 2024. no. 2. pp. 189–194. doi:10.47576/2949–1894.2024.2.2.024 (in Russian)
- 5 Shuping Zhong, Ze He, Muneeba Naseer Chaudhary, Yaxuan Mu et al. Effect of freezing pretreatment on the mitigation of acrylamide in potato chips and French fries. LWT. 2024. no. 200. doi:10.1016/j.lwt.2024.116174
- 6 Collection of recipes for flour confectionery and bakery products for catering establishments: reference book. St. Petersburg: Troitsky Most, 2017. 194 p. ISBN 978–5–4377–0101–0 (in Russian)
- 7 Ivanova K.V., Berezovikova I.P. Development of a gluten-free muffin mix. Consumer market: sustainable development in the face of new challenges. Collection of materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference. Ed. by Yu. Yu. Miller. Novosibirsk, 2022. pp. 136–141. (in Russian)

- 8 Karaoglu M.M., Kotancilar H.G., Gerçekaslan K.E. The effect of par-baking and frozen storage time on the quality of cupcake. *International Journal of Food Science & Technology*. 2008. no. 43(10). pp. 1778–1785. doi:10.1111/j.1365-2621.2007.01698.x
- 9 Khotimchenko S.A., Gmoshinsky I.V., Bagryantseva O.V., Shatrov G.N. Chemical safety of food: development of a methodological and regulatory framework. *Problems of nutrition*. 2020. no. 4(89). pp. 110–124. doi:10.24411/0042-8833-2020-10047 (in Russian)
- 10 Govindaraju I., Sana M., Chakraborty I., Rahman M.H. et al. Dietary Acrylamide: A Detailed Review on Formation, Detection, Mitigation, and Its Health Impacts. *Foods*. 2024. no. 13. p. 556. doi:10.3390/foods13040556
- 11 Ramesh R., Ramniwas B., Rustagi, Jafari Z. et al. Acrylamide in food products: Formation, technological strategies for mitigation, and future outlook. *Food Frontiers*. 2024. no. 5. pp. 1063–1095. doi:10.1002/fft2.3681
- 12 Schouten M.A., Tappi S., Glicerina V., Rocculi P. et al. Formation of acrylamide in biscuits during baking under different heat transfer conditions. *LWT – Food Science and Technology*. 2022. no. 153. p. 112541. doi:10.1016/j.lwt.2021.112541
- 13 Sarion C., Codină G., Dabija A. Acrylamide in Bakery Products: A Review on Health Risks, Legal Regulations and Strategies to Reduce Its Formation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. no. 18(8). p. 4332. doi:10.3390/ijerph18084332
- 14 Chernova A.V., Petrochenkova A.V. Regulation of the content of the contaminant acrylamide in food products. *Scientific works of the Far Eastern Fisheries Technical University*. 2023. no. 1(63). pp. 20–27. (in Russian)
- 15 Michalak J., Czarnowska-Kujawska M., Klepacka J., Gujska E. Effect of Microwave Heating on the Acrylamide Formation in Foods. *Molecules*. 2020. no. 25. p. 4140. doi:10.3390/molecules25184140
- 16 Pucci M., Akillioğlu H.G., Bevilacqua M., Abate G. et al. Investigation of Maillard reaction products in plant-based milk alternatives. *Food Research International*. 2024. no. 198. p. 115418. doi:10.1016/j.foodres.2024.115418
- 17 Bassama J., Brat P., Bohuon P., Hocine B. et al. Acrylamide kinetic in plantain during heating process: Precursors and effect of water activity. *Food Research International*. 2011. no. 44. pp. 1452–1458. doi:10.1016/j.foodres.2011.03.049
- 18 Borczak B., Sikora E., Sikora M., Haesendonck V. et al. The impact of sourdough addition to frozen stored wheat-flour rolls on glycemic response in human volunteers. *Starch – Stärke*. 2011. no. 63(12). pp. 801–807. doi:10.1002/star.201100055
- 19 Borczak B. et al. Comparison of glycemic responses to frozen and non-frozen wheat rolls in human volunteers-a short report. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2008. no. 58(3). pp. 373–376.
- 20 Norms of physiological needs for energy and nutrients for various population groups of the Russian Federation: Methodological recommendations. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 2021. 72 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Кира В. Иванова старший преподаватель, аспирант, кафедра пищевых технологий индустрии питания, Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), 677007, Россия, kiravlad85@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2722-7825>

Ирина П. Березовикова д.б.н., профессор, кафедра пищевых технологий, Сибирский университет потребительской кооперации, проспект Карла Маркса, 26, Новосибирск, 630087, Россия, ib234546@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5897-7699>

Ольга Д. Варнавская к.т.н., доцент, кафедра пищевых технологий, Сибирский университет потребительской кооперации, проспект Карла Маркса, 26, Новосибирск, 630087, Россия, olvarnak@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-2107-4381>

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

Kira V. Ivanova senior lecturer, P.G, Departament of food technology and food industry, Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye highway, 3 km., build.3, Yakutsk city, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russia, kiravlad85@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2722-7825>

Irina P. Berezovikova Doc. Sci. (Biol.), Professor, Department of Food Technology, Siberian University of Consumer Cooperation, Karl Marx Avenue, 26, Novosibirsk, 630087, Russia, ib234546@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5897-7699>

Olga D. Varnavskaya Cand.Sci. (Engin), Associate Professor, Department of Food Technology, Siberian University of Consumer Cooperation, Karl Marx Avenue, 26, Novosibirsk, 630087, Russia, olvarnak@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-2107-4381>

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 03/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 10/05/2025
Received 03/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 10/05/2025

Рациональные параметры ультразвуковой экстракции биоактивных веществ из зверобоя

Алексей В. Дранников	¹	drannikov@list.ru	 0000-0002-3060-8688
Яна П. Домбровская	¹	yana_dombrovskaya@inbox.ru	 0000-0003-2363-7648
Анна А. Дерканосова	¹	aa-derk@yandex.ru	 0000-0002-9726-9262
Игорь Е. Шабанов	²	mks36@mail.ru	
Дмитрий С. Китаев	¹	kitaevdm01@mail.ru	
Наталья Л. Клейменова	¹	klesha78@list.ru	 0000-0002-1462-4055

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

2 ООО «КБ МКС», пр-т Ленинский, 172, г. Воронеж, 394033, Россия

Аннотация. Проведено исследование по определению рациональных параметров ультразвуковой экстракции биологически активных веществ (БАВ) из зверобоя (*Hypericum perforatum* L.). В качестве варьируемых факторов выбраны: температура экстрагента (X_1), гидромодуль (X_2) и время экспозиции (X_3). Для проведения эксперимента применены центральное композиционное ротатбельное униформпланирование и полный факторный эксперимент, включающий 20 опытов. Полученные экспериментальные данные обработаны с использованием математических методов, в результате чего построены нелинейные регрессионные модели второго порядка, описывающие выход сухих веществ (Y_1) и антиоксидантную активность (Y_2). Проведён анализ степени влияния каждого фактора на критерии оценки. Установлено, что наибольшее влияние на оба критерия оказывает температура экстрагента, наименьшее — время экстрагирования. Оптимальные диапазоны варьирования факторов составили: $X_1 = 47\text{--}50,8\text{ }^\circ\text{C}$, $X_2 = 1:19,8\text{--}1:21\text{ г/см}^3$, $X_3 = 14,7\text{--}21,6\text{ мин}$. В этих условиях обеспечивается выход $Y_1 = 49,362\text{--}50,5\text{ г/кг}$ и антиоксидантная активность $Y_2 = 387,89\text{--}410,50\text{ мг/дм}^3$. Разработана конструкция проточного экстрактора, позволяющего реализовать непрерывный процесс экстракции с ультразвуковым воздействием. Применение данного оборудования обеспечивает повышение эффективности извлечения БАВ, сокращение времени экстрагирования, снижение расхода экстрагента и сохранение ценных свойств экстракта. Полученные результаты могут быть использованы для масштабирования процесса и внедрения в технологии производства фитопрепаратов и функциональных пищевых продуктов на основе зверобоя.

Ключевые слова: ультразвуковая экстракция, зверобой, биологически активные вещества, оптимизация, математическое моделирование, гидромодуль.

Rational Parameters for Ultrasonic Extraction of Bioactive Compounds from *Hypericum perforatum*

Aleksey V. Drannikov	¹	drannikov@list.ru	 0000-0002-3060-8688
Yana P. Dombrovskaya	¹	yana_dombrovskaya@inbox.ru	 0000-0003-2363-7648
Anna A. Derkanosova	¹	aa-derk@yandex.ru	 0000-0002-9726-9262
Igor' E. Shabanov	²	mks36@mail.ru	
Dmitrij S. Kitaev	¹	kitaevdm01@mail.ru	
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 KB MKS LLC, 172 Leninsky Ave., Voronezh, 394033, Russia

Abstract. A study was conducted to determine the optimal parameters for ultrasonic extraction of biologically active compounds (BAC) from St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.). The selected variable factors included extractant temperature (X_1), solid-to-liquid ratio (X_2), and exposure time (X_3). The experimental design was based on a central composite rotatable uniform design and a full factorial experiment with a total of 20 runs. The collected experimental data were processed using mathematical methods, resulting in second-order nonlinear regression models describing the dry matter yield (Y_1) and antioxidant activity (Y_2) of the extracts. An analysis of the regression coefficients revealed that extractant temperature had the strongest influence on both output parameters, while exposure time had the weakest. The optimal parameter ranges were identified as follows: $X_1 = 47\text{--}50.8\text{ }^\circ\text{C}$, $X_2 = 1:19.8\text{--}1:21\text{ g/cm}^3$, $X_3 = 14.7\text{--}21.6\text{ minutes}$. Under these conditions, the yield of dry matter ranged from 49.362 to 50.5 g/kg and antioxidant activity from 387.89 to 410.50 mg/dm³. A direct-flow extractor design was proposed, enabling a continuous extraction process with ultrasonic treatment. The implementation of this equipment improves the efficiency of BAC extraction, reduces extraction time and solvent consumption, and preserves the biological properties of the extract. The results obtained are suitable for scaling up and can be applied in the development of industrial technologies for producing herbal medicinal products and functional food ingredients based on St. John's wort.

Keywords: ultrasonic extraction, hypericum perforatum, bioactive compounds, optimization, mathematical modeling, solid-to-liquid ratio.

Для цитирования

Дранников А.В., Домбровская Я.П., Дерканосова А.А., Шабанов И.Е., Китаев Д.С., Клейменова Н.Л. Рациональные параметры ультразвуковой экстракции биоактивных веществ из зверобоя // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 30–37. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-30-37

For citation

Drannikov A.V., Dombrovskaya Y.P., Derkanosova A.A., Shabanov I.E., Kitaev D.S., Kleimenova N.L. Rational Parameters for Ultrasonic Extraction of Bioactive Compounds from *Hypericum perforatum*. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 30–37. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-30-37

Введение

Зверобой (*Hypericum perforatum* L.) – одно из наиболее изученных лекарственных растений, широко применяемое в традиционной и современной медицине благодаря своим антидепрессивным, противовоспалительным, антимикробным и антиоксидантным свойствам [1].

Основными биологически активными веществами зверобоя являются флавоноиды, нафтодиантроны, флороглюцины, дубильные вещества, эфирное масло [2].

Для извлечения этих соединений из растительного сырья используются различные методы экстракции, среди которых ультразвуковая экстракция (УЗЭ) зарекомендовала себя как эффективный и экономически выгодный способ.

Ультразвуковая экстракция основана на явлении кавитации, которое возникает под действием ультразвуковых волн. Кавитационные пузырьки, образующиеся в растворителе, разрушают клеточные стенки растительного материала, что способствует более интенсивному выделению целевых соединений. Преимуществами ультразвуковой экстракции являются сокращение времени экстракции, снижение расхода растворителя и повышение выхода биологически активных веществ [3–6].

Результаты и обсуждение

Для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс экстракции зверобоя с применением ультразвука, применяются математические методы планирования эксперимента [7, 8].

Математическое описание данного процесса получено эмпирически. При этом его математическая модель имеет вид уравнения регрессии, найденного статистическими методами на основе экспериментов. Математическая модель изучаемого процесса представлена в виде полинома второй степени [7, 8]

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i \leq j}^n b_{ij} X_i X_j,$$

где b_0 – свободный член уравнения, равный средней величине отклика при условии, что рассматриваемые факторы находятся на средних, «нулевых», уровнях; X – масштабированные значения факторов, которые определяют функцию отклика и поддаются варьированию; b_{ij} – коэффициенты двухфакторных взаимодействий, показывающие, насколько изменяется степень влияния одного фактора при изменении величины другого; b_{ii} – коэффициенты квадратичных эффектов, определяющие нелинейность выходного параметра от рассматриваемых факторов; i, j – индексы факторов; n – число факторов в матрице планирования.

Выбираем следующие основные факторы, влияющие на процесс экстракции зверобоя

с применением ультразвука: X_1 – температура экстрагента (воды), °C, X_2 – гидромодуль, X_3 – время экспозиции, мин.

Все эти факторы не коррелируемы между собой. Пределы изменения исследуемых факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Пределы изменения входных факторов

Table 1.

Limits of change in input factors

Условия планирования Planning conditions	Код. значение Coded value	Значения факторов в точках плана Values of factors in the points of the plan		
		X_1	X_2	X_3
		$t, ^\circ\text{C}$	$M, \text{г/см}$	$\tau, \text{мин.}$
Основной уровень Basic level	0	60	1:15	15
Интервал варьирования Variation interval	Δ	13	6	7
Верхний уровень Top level	+1	73	1:21	22
Нижний уровень Lower level	-1	47	1:9	8
Верхняя «звездная» точка Top "star" point	+1,681	82	1:25	27
Нижняя «звездная» точка Low "star" point	-1,681	38	1:5	3

Выбор интервалов изменения входных факторов обусловлен технологическими условиями процесса экстракции зверобоя с применением ультразвука, а также технико-экономическими показателями процесса [5, 10–12].

Критериями оценки влияния входных факторов на процесс экстрагирования являются: Y_1 – выход сухих веществ, отнесенный на 1 кг зверобоя, г/кг; Y_2 – антиоксидантная активность извлеченных веществ отнесенная к объему экстрагента, мг/дм³.

Выбор критериев оценки Y обусловлен их наибольшей значимостью для процесса экстракции зверобоя с применением ультразвука. Так, Y_1 определяет количество сухих веществ, которые остаются после удаления воды из экстракта, и позволяет судить о концентрации биологически активных веществ (БАВ) и других полезных соединений, содержащихся в растении, Y_2 определяет биологическую ценность полученного экстракта. Программа исследования была заложена в матрицу планирования эксперимента.

Для исследования применяем центральное композиционное ротатабельное униформпланирование и полный факторный эксперимент ПФЭ 2³. Число опытов в матрице планирования для трех входных параметров равно 20. Порядок опытов рандомизировали посредством таблицы случайных чисел, что исключает влияние неконтролируемых параметров на результаты эксперимента. При их обработке применяем следующие статистические критерии: Кохрена, Стьюдента, Фишера [7, 8]. В результате получаем нелинейные уравнения регрессии, описывающие данный процесс:

$$Y_1 = 51,6 + 3,20 \cdot X_1 + 3,09 \cdot X_2 + 2,6 \cdot X_3 - 0,2655 \cdot X_1 X_2 - 0,2172 \cdot X_1 X_3 - 0,2267 \cdot X_2 X_3 - 1,80 \cdot X_1^2 - 1,06 \cdot X_2^2 - 1,10 \cdot X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 332,64 - 57,69 \cdot X_1 + 11,04 \cdot X_2 - 4,83 \cdot X_3 + 2,18 \cdot X_1 X_2 - 0,9586 \cdot X_1 X_3 + 0,2208 \cdot X_2 X_3 + 15,32 \cdot X_1^2 - 2,92 \cdot X_2^2 - 11,01 \cdot X_3^2 \quad (2)$$

Анализ уравнений регрессии (1) и (2) позволяет выделить факторы, влияющие на рассматриваемый процесс. На критерии оценки наибольшее влияние оказывает температура экстрагента, наименьшее – время экспозиции. Причем знак «плюс» перед коэффициентом при линейных членах указывает на то, что при увеличении входного параметра значение выходного параметра увеличивается.

Степень влияния параметров относительно друг друга в уравнении (1): $b_1: b_2 = 1,036$; $b_1: b_3 = 1,231$; $b_2: b_3 = 1,188$.

Степень влияния параметров относительно друг друга в уравнении (2): $b_1: b_2 = 5,226$; $b_1: b_3 = 11,944$; $b_2: b_3 = 2,286$.

Полученные уравнения нелинейные.

В результате выполнения 20 опытов получена информация о влиянии факторов и построена математическая модель процесса, позволяющая рассчитать выход сухих веществ и антиоксидантную активность извлеченных веществ внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

На рисунках 1–3 показаны кривые равных значений выходных параметров, которые несут смысл номограмм и представляют практический интерес.

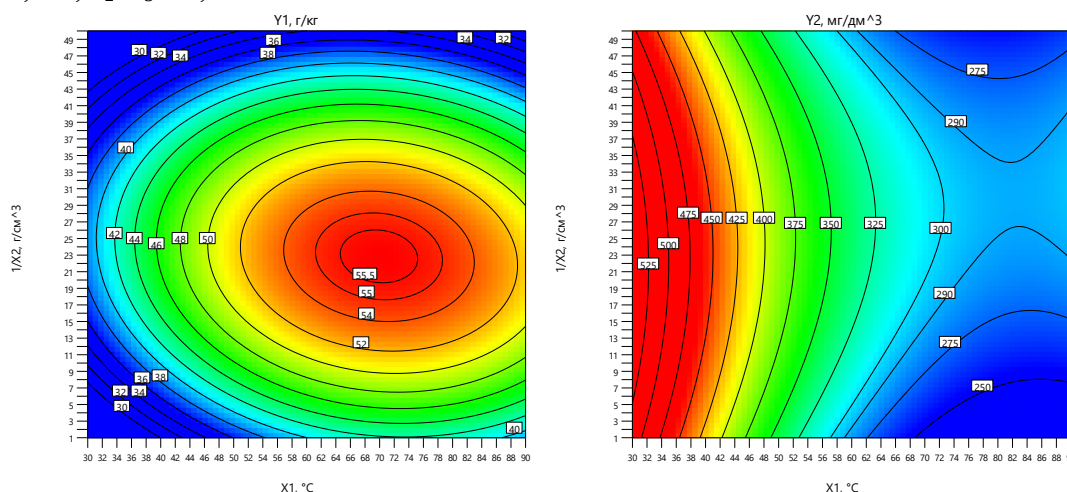


Рисунок 1. Номограмма для определения выхода сухих веществ (г/кг) и антиоксидантной активности (мг/дм³) в зависимости от температуры экстрагента и гидромодуля

Figure 1. Nomogram for determining the output of dry matter (g/kg) and antioxidant activity (mg/dm³) depending on the temperature of the extractant and the hydraulic module

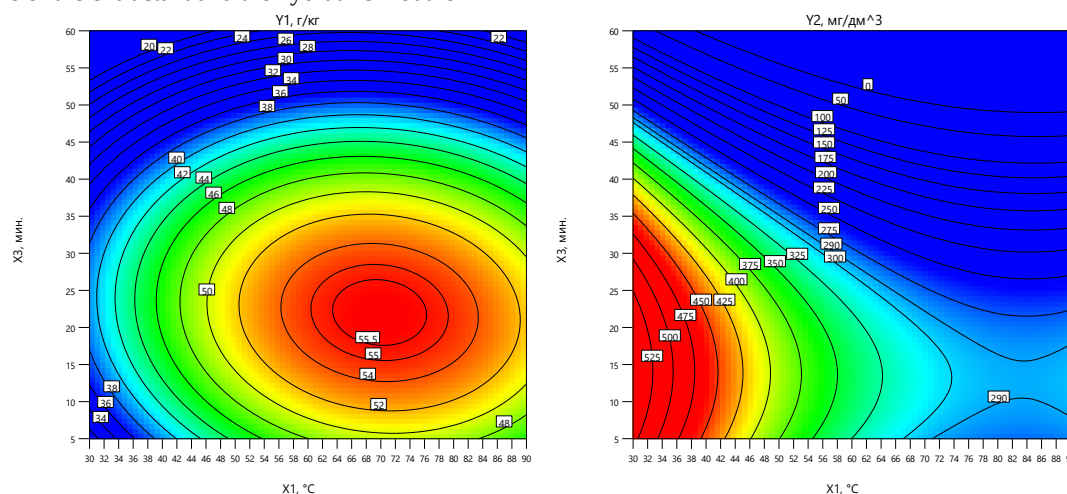


Рисунок 2. Номограмма для определения выхода сухих веществ (г/кг) и антиоксидантной активности (мг/дм³) от температуры экстрагента и времени экспозиции

Figure 2. Nomogram for determining the output of dry matter (g/kg) and antioxidant activity (mg/dm³) depending on the temperature of the extractant and the exposure time

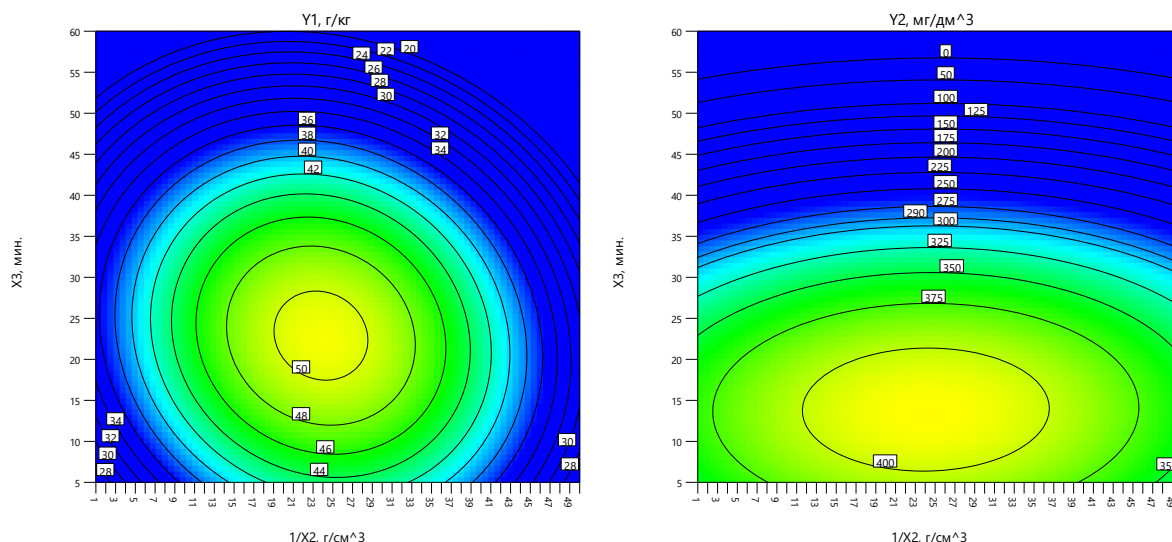


Рисунок 3. Номограмма для определения выхода сухих веществ (г/кг) и антиоксидантной активности (мг/дм³) от гидромодуля и времени экспозиции

Figure 3. Nomogram for determining the output of dry matter (g/kg) and antioxidant activity (mg/dm³) depending on the hydraulic module and the exposure time

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти такие режимы, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров процесса экстракции доставляли максимальный выход сухих веществ и антиоксидантную активность [8]. На рисунках 4, 5 представлены зависимости выхода сухих веществ и антиоксидантной активности экстракта от входных параметров. Общая математическая

постановка задачи оптимизации представлена в виде следующей модели:

$$q = q(Y_1, Y_2) \xrightarrow{x \in D} \text{opt};$$

$$D: Y_1(X_1, X_2, X_3) \xrightarrow{x \in D} \max$$

$$Y_2(X_1, X_2, X_3) \xrightarrow{x \in D} \max.$$

$$Y_i \geq 0, i = \overline{1, 2}; X_j \leq [-2; 2], j = \overline{1, 3}$$

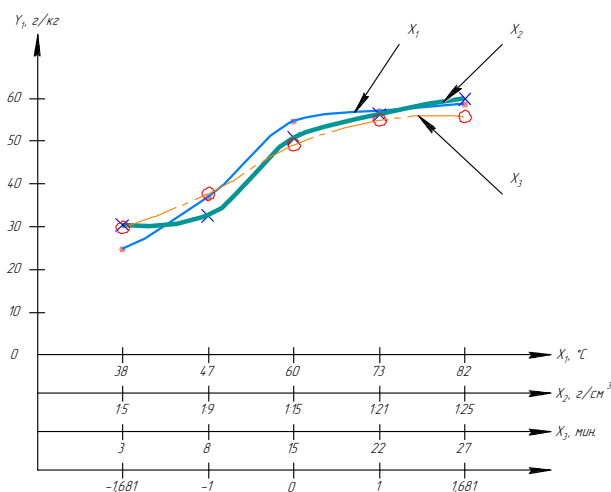


Рисунок 4. Зависимость выхода сухих веществ от входных параметров

Figure 4. Dependence of the dry matter output on the input parameters

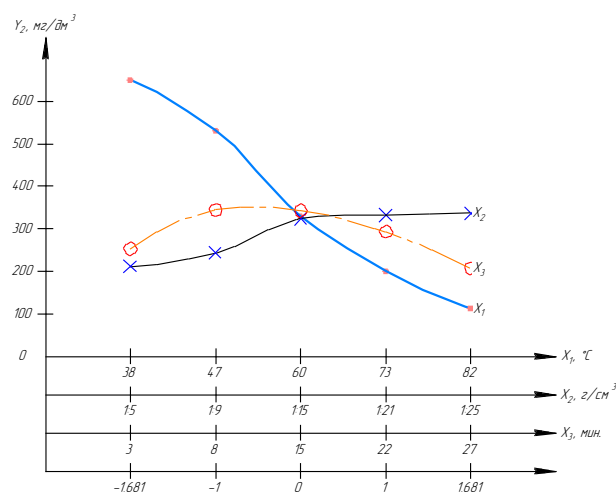


Рисунок 5. Зависимость выхода антиоксидантов от входных параметров

Figure 5. Dependence of antioxidant yield on input parameters

Согласно критерию оптимизации для принятия окончательного решения по выбору оптимальных режимов исследуемого процесса была решена компромиссная задача (таблица 2).

С помощью программы для ЭВМ были найдено 36 возможных решений нахождения оптимальных значений Y_1 и Y_2 . В результате были получены рациональные интервалы изменения параметров (таблица 3).

Таблица 2.
Оптимальные интервалы параметров
Table 2.

Optimal parameter intervals

	Цель Target	Нижний предел Lower limit	Верхний предел Upper limit
$X_1, ^\circ\text{C}$	[-1; 1]	47	73
$X_2, \text{г/см}^3$	[-1; 1]	9	21
$X_3, \text{мин.}$	[-1; 1]	8	22
Y_1	Max	35,924	55,771
Y_2	Max	225,729	464,135

Таблица 3.
Результаты оптимизации
Table 3.

Optimization results

$X_1, ^\circ\text{C}$	$X_2, \text{г/см}^3$	$X_3, \text{мин.}$	$Y_1, \text{г/кг}$	$Y_2, \text{мг/дм}^3$
47–50,8	1:19,8– 1:21	14,7– 21,6	49,362– 50,5	387,89– 410,50

Для получения экстракта зверобоя в промышленности предложен прямоточный экстрактор, который позволяет не только ускорить процесс экстрагирования, но и сохранить биологическую ценность экстракта.

Прямоточный экстрактор (рисунок 6) работает следующим образом. В загрузочный бункер 5 непрерывно подается предварительно измельченный зверобой, который с помощью питателя 6 направляется через загрузочное отверстие 2 в камеру предварительной экстракции 12 горизонтального корпуса 1. Одновременно в камеру 12 поступает экстрагент (горячая вода) через отверстия, расположенные по всей длине

полого шнека 9. Продукт интенсивно перемешивается с экстрагентом с помощью винтовой наливки 10, закрепленной на полом шнеке 9, который в свою очередь приводится во вращение посредством привода 8.

Далее смесь измельченного зверобоя и экстрагента перемещается по длине экстрактора и поступает через прутья 11, выполняющих роль перегородки, в камеру экстракции с ультразвуком 13, где смесь перемешивается лопатками 15, закрепленными на полом вала 14. В эту же камеру дополнительно подается экстрагент (горячая вода) через отверстия, расположенные по всей длине полого вала 14 в камере 13 и одновременно смесь подвергается воздействию ультразвука с помощью источника ультразвука 17 для более эффективного извлечения экстрактивных веществ из зверобоя.

После этого смесь конусным шнеком 16 направляется в зону перфорированного участка 4, где происходит постепенный отжим жидкой фракции (экстракта) через отверстия в полом сборнике 7 по мере продвижения продукта по длине экстрактора. Полученный готовый экстракт выводится из сборника 7 через патрубок 21, а твердая фракция (жом зверобоя) через разгрузочное отверстие 3.

Для поддержания необходимой температуры в рабочей зоне экстрактора и более интенсивного проведения процесса экстракции предусмотрена паровая рубашка 18 в которую через патрубок 19 подается водяной пар, а отвод его конденсата осуществляется через патрубок 20 [13].

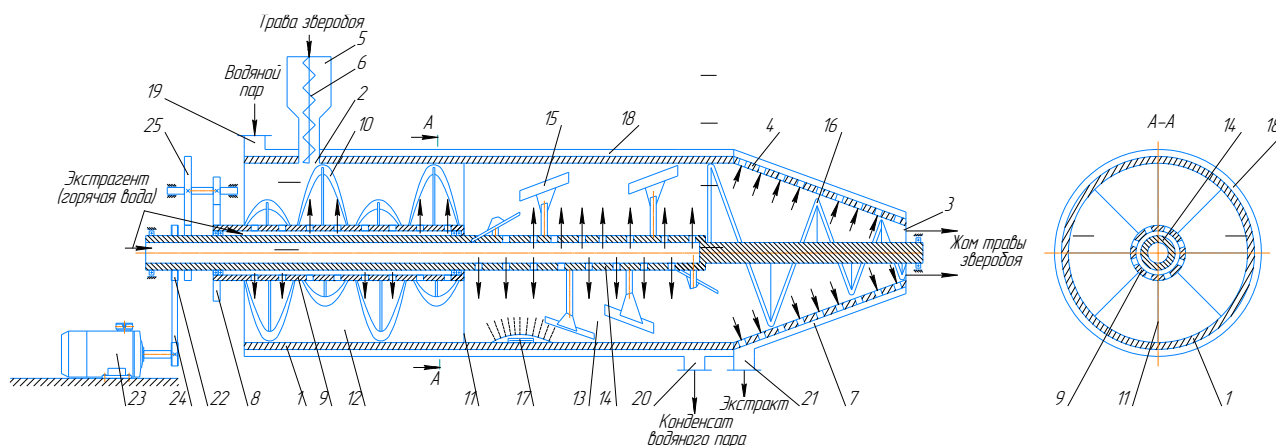


Рисунок 6. Прямоточный экстрактор: 1 – горизонтальный корпус; 2 – загрузочное отверстие; 3 – разгрузочное отверстие; 4 – перфорированный участок; 5 – загрузочный бункер; 6 – питатель; 7 – полый сборник; 8 – привод; 9 – полый шнек; 10 – винтовая наливка; 11 – прутья; 12 – камера предварительной экстракции; 13 – камера экстракции с УЗ; 14 – полый вал; 15 – лопатки; 16 – конусный шнек; 17 – источник УЗ; 18 – паровая рубашка; 19 – патрубок подачи водяного пара; 20 – патрубок отвода конденсата водяного пара; 21 – патрубок отвода экстракта; 22 – привод; 23 – электродвигатель; 25 – клиноременная передача; 25 – зубчатая передача

Figure 6. Direct-flow extractor: 1 – horizontal body; 2 – loading opening; 3 – discharge opening; 4 – perforated section; 5 – loading hopper; 6 – feeder; 7 – hollow collector; 8 – drive; 9 – hollow auger; 10 – helical winding; 11 – bars; 12 – pre-extraction chamber; 13 – extraction chamber with UZ; 14 – hollow shaft; 15 – blades; 16 – cone screw; 17 – ultrasonic source; 18 – steam jacket; 19 – water steam supply pipe; 20 – water steam condensate outlet pipe; 21 – extract outlet pipe; 22 – drive; 23 – electric motor; 25 – V-belt transmission; 25 – gear transmission

Заключение

На основании проведенных экспериментальных и расчетных исследований определены рациональные параметры ультразвуковой экстракции зверобоя (*Hypericum perforatum*), включающие оптимальные значения температуры экстрагента, гидромодуля и времени обработки. Применение этих параметров обеспечивает максимальный выход биологически активных соединений (флавоноидов, нафтодиантронов, фенольных соединений) при минимальных затратах энергии и времени, что повышает эффективность производственного процесса.

Разработанный прямоточный экстрактор с интегрированным ультразвуковым воздействием обеспечивает непрерывную подачу сырья и экстрагента, равномерное распределение акустической энергии по объему смеси и сохранение биологической активности целевых веществ.

Интенсификация процесса экстракции позволяет получить экстракты с высокой концентрацией действующих веществ, что особенно важно для фармацевтического и пищевого применения.

Конструкция экстрактора направлена на улучшение качества экстракционных процессов за счёт повышения скорости извлечения и сокращения расхода растворителя. Ультразвуковая экстракция подтверждает свою эффективность как современный и экологически безопасный метод переработки растительного сырья.

Полученные экстракты зверобоя могут использоваться в производстве лекарственных средств, фиточаев, биологически активных добавок и натуральной косметики.

Результаты исследования могут быть применены для промышленного масштабирования и внедрения в линии по выпуску растительных экстрактов нового поколения.

Литература

- 1 Ковалева Н.Г. Лечение растениями. М.: Медицина, 1971. 352 с.
- 2 Постраш И.Ю. Трава зверобоя продырявленного: химический состав, свойства, применение // Вестник АПК Верхневолжья. 2021. № 1. С. 57–63.
- 3 Елапов А.А., Кузнецов Н.Н., Марахова А.И. Применение ультразвука в экстракции биологически активных соединений из растительного сырья, применяемого или перспективного для применения в медицине // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2021. Т. 10. № 4. С. 96–116. doi: 10.33380/2305–2066–2021–10–4–96–116.
- 4 Мусифулина В.М., Омаров М.М. Сравнительная характеристика методов экстрагирования растительного сырья // Вестник Инновационного Евразийского университета. 2021. № 4(84). С. 107–112. doi: 10.37788/2021–4/107–112.
- 5 Родионова Н.С., Мануковская М.В., Коломникова Я.П., Серченя М.В. Исследование антиоксидантной активности настоек из ежевики и клюквы, приготовленных методом ультразвукового экстрагирования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 4. С. 98–103.
- 6 Потороко И.Ю., Калинина И.В. Перспективы использования ультразвукового воздействия в технологии экстракционных процессов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2014. Т. 2. № 1. С. 42–47.
- 7 Щурин К.В., Волкова Е.К. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. 2-е изд. СПб.: Лань, 2025. 336 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/454484> (дата обращения: 26.02.2025).
- 8 Мифтахутдинова Ф.Р. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. Казань: КНИТУ-КАИ, 2020. 256 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/193510> (дата обращения: 26.02.2025).
- 9 Curtis M.J., Alexander S.P., Cirino G. et al. Planning experiments: Updated guidance on experimental design and analysis and their reporting III // British Journal of Pharmacology. 2022. Vol. 179. № 15. P. 3907–3913.
- 10 Research of process of extraction of biologically active substances (BAS) from plant raw materials in the conditions of ultrasonic extraction / E.V. Averyanova, V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, V.A. Shakura // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference Proceedings. Erlagol, Altai: IEEE, 2017. P. 255–259. doi: 10.1109/EDM.2017.7981751.
- 11 Казимова К.Ш., Ахмадуллина Ф.Ю., Акулов А.Н., Щербак Ю.В., Никитин Е.Н. Скрининг параметров извлечения биологически активных веществ из цветов бархатцев распростертых (*Tagetes patula*) и оценка антиоксидантной активности их водных экстрактов // Химия растительного сырья. 2024. № 3. С. 250–258. doi: 10.14258/jcrptm.20240313383.
- 12 Исследование влияния условий экстракции на извлечение биологически активных веществ с антиоксидантными свойствами / Е.Г. Шубенкова, О.П. Чжу, Ю.Ю. Лобова, И.А. Лутаева // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. 2013. № 5(15). С. 144–148.
- 13 Пат. № 2799347 С1 РФ. МПК B01D 11/02. Прямоточный экстрактор / А.В. Дранников, А.А. Дерканосова, А.А. Шевцов и др.; заявитель Воронежский государственный университет инженерных технологий. № 2022127060; заявл. 19.10.2022; опубл. 04.07.2023.
- 14 Hao J., Zhang J., Zhang C., Yang R., Wang H. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from *Lactuca indica* L. cv. Mengzao and their antioxidant properties // Frontiers in Nutrition. 2023. Vol. 10. Art. 1065662. doi: 10.3389/fnut.2023.1065662.
- 15 Laina K.T., Samaras Y., Tzima K., Argyropoulou A., Tzakos A.G. Optimization of Combined Ultrasound and Microwave-Assisted Extraction for Enhanced Bioactive Compounds Recovery from Four Medicinal Plants: Oregano, Rosemary, *Hypericum*, and Chamomile // Molecules. 2024. Vol. 29, № 23. P. 5773. doi: 10.3390/molecules29235773.

16 Günther A., Pitzer C., Esser T. Apolar Extracts of St. John's Wort Alleviate the Effects of β -Amyloid Pathology in a Mouse Model of Alzheimer's Disease // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, № 1. Art. 829. doi: 10.3390/ijms24010829.

17 Oludemi T., Mehmood A., Adiamo O.Q., Ghafoor K. Overview and Toxicity Assessment of Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plant Materials // *Foods*. 2024. Vol. 13, № 19. Art. 3066. doi: 10.3390/foods13193066.

18 Zhang Y., Jin Y., Sun T., Chen Y., Wang S. Recent advances in ultrasound-assisted extraction of natural products // *Food Bioscience*. 2025. Art. 102500. doi: 10.1016/j.fbio.2025.102500.

19 Rusanova M., Rusanov K., Alekova M. et al. A Simple High-Throughput Procedure for Microscale Extraction of Bioactive Compounds from the Flowers of Saint John's Wort (*Hypericum perforatum* L.) // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. № 13. P. 7334.

20 Milutinović M., Miladinović M., Gašić U. et al. Recovery of bioactive molecules from *Hypericum perforatum* L. dust using microwave-assisted extraction // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 14, № 5. P. 7111–7123.

References

- 1 Kovaleva N.G. Treatment with Plants. Moscow: Meditsina, 1971. 352 p. (in Russian)
- 2 Postrash I.Yu. St. John's Wort (*Hypericum perforatum*): Chemical Composition, Properties, and Applications. Bulletin of the Agro-Industrial Complex of the Upper Volga Region. 2021. no. 1. pp. 57-63. (in Russian)
- 3 Elapov A.A., Kuznetsov N.N., Marakhova A.I. Application of ultrasound in the extraction of biologically active compounds from medicinal plant raw materials. Drug Development & Registration. 2021. vol. 10. no. 4. pp. 96-116. doi:10.33380/2305-2066-2021-10-4-96-116
- 4 Musifulina V.M., Omarov M.M. Comparative characteristics of plant material extraction methods. Bulletin of the Innovative Eurasian University. 2021. vol. 4. no. 84. pp. 107-112. doi:10.37788/2021-4/107-112
- 5 Rodionova N.S., Manukovskaya M.V., Kolomnikova Ya.P., Serchenya M.V. Study of antioxidant activity of blackberry and cranberry tinctures prepared by ultrasonic extraction. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2015. no. 4. pp. 98-103. (in Russian)
- 6 Potoroko I.Yu., Kalinina I.V. Prospects for the use of ultrasound in extraction technologies. Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2014. vol. 2. no. 1. pp. 42-47. (in Russian)
- 7 Shchurin K.V., Volkova E.K. Design and Organization of Experiments: A Textbook for Universities. 2nd ed., rev. Saint Petersburg: Lan', 2025. 336 p. ISBN: 978-5-507-50674-3 (in Russian)
- 8 Miftakhutdinova F.R. Planning and Organization of Experiments: A Study Guide. Kazan: KNRTU-KAI, 2020. 256 p. ISBN: 978-5-7579-2474-8 (in Russian)
- 9 Curtis M.J., Alexander S.P., Cirino G. et al. Planning experiments: Updated guidance on experimental design and analysis and their reporting III. British Journal of Pharmacology. 2022. vol. 179. no. 15. pp. 3907-3913. doi:10.1111/bph.15868
- 10 Averyanova E.V., Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Shakura V.A. Research of process of extraction of biologically active substances (BAS) from plant raw materials in the conditions of ultrasonic extraction. In: 18th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Erlagol, Altai: IEEE Computer Society, 2017. pp. 255-259. doi:10.1109/EDM.2017.7981751
- 11 Kazimova K.Sh., Akhmadullina F.Yu., Akulov A.N., Shcherbakova Yu.V., Nikitin E.N. Screening of extraction parameters for bioactive compounds from marigold flowers (*Tagetes patula*) and evaluation of antioxidant activity of aqueous extracts. Chemistry of Plant Raw Material. 2024. no. 3. pp. 250-258. doi:10.14258/jcprm.20240313383
- 12 Shubenkova E.G., Zhu O.P., Lobova Yu.Yu., Lutaeva I.A. Study of the influence of extraction conditions on the recovery of biologically active substances with antioxidant properties. Bulletin of the Novosibirsk State Pedagogical University. 2013. vol. 5. no. 15. pp. 144-148. (in Russian)
- 13 Drannikov A.V., Derkanosova A.A., Shevtsov A.A. et al. Patent No. RU2799347 C1. Russian Federation. IPC B01D 11/02. Direct-flow extractor. No. 2022127060. Filed 19.10.2022. Published 04.07.2023. Applicant: Voronezh State University of Engineering Technologies. (in Russian)
- 14 Hao J., Zhang J., Zhang C., Yang R., Wang H. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from *Lactuca indica* L. cv. Mengzao and their antioxidant properties. Frontiers in Nutrition. 2023. vol. 10. Art. 1065662. doi:10.3389/fnut.2023.1065662
- 15 Laina K.T., Samaras Y., Tzima K., Argyropoulou A., Tzakos A.G. Optimization of Combined Ultrasound and Microwave-Assisted Extraction for Enhanced Bioactive Compounds Recovery from Four Medicinal Plants: Oregano, Rosemary, Hypericum, and Chamomile. Molecules. 2024. vol. 29. no. 23. p. 5773. doi:10.3390/molecules29235773
- 16 Günther A., Pitzer C., Esser T. Apolar Extracts of St. John's Wort Alleviate the Effects of β -Amyloid Pathology in a Mouse Model of Alzheimer's Disease. International Journal of Molecular Sciences. 2023. vol. 24. no. 1. Art. 829. doi:10.3390/ijms24010829
- 17 Oludemi T., Mehmood A., Adiamo O.Q., Ghafoor K. Overview and Toxicity Assessment of Ultrasound-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plant Materials. Foods. 2024. vol. 13. no. 19. Art. 3066. doi:10.3390/foods13193066
- 18 Zhang Y., Jin Y., Sun T., Chen Y., Wang S. Recent advances in ultrasound-assisted extraction of natural products. Food Bioscience. 2025. Art. 102500. doi:10.1016/j.fbio.2025.102500
- 19 Rusanova M., Rusanov K., Alekova M. et al. A Simple High-Throughput Procedure for Microscale Extraction of Bioactive Compounds from the Flowers of Saint John's Wort (*Hypericum perforatum* L.). Applied Sciences. 2025. vol. 15. no. 13. p. 7334. doi:10.3390/app15137334
- 20 Milutinović M., Miladinović M., Gašić U. et al. Recovery of bioactive molecules from *Hypericum perforatum* L. dust using microwave-assisted extraction. Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. vol. 14. no. 5. pp. 7111-7123. doi:10.1007/s13399-022-03442-9

Сведения об авторах

Алексей В. Дранников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, drannikov@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3060-8688>

Яна П. Домбровская к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yana_dombrovskaya@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2363-7648>

Анна А. Дерканосова к.э.н., инженер, кафедра Сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@yandex.ru

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

Игорь Е. Шабанов к.т.н., директор, ООО «КБ МКС», пр-т Ленинский, 172, г. Воронеж, 394033, Россия, mks36@mail.ru

Дмитрий С. Китаев магистр, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kitaevdm01@mail.ru

Наталья Л. Клейменова к.т.н., доцент, кафедра управления качеством, гостиничного дела и туризма, 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

Aleksej V. Drannikov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, drannikov@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3060-8688>

Yana P. Dombrovskaya Cand. Sci. (Engin.), associate professor, machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yana_dombrovskaya@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2363-7648>

Anna A. Derkanosova Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Service and Restaurant Business, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, aa-derk@yandex.ru

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

Igor' E. Shabanov Cand. Sci. (Engin.), director, KB ISS LLC, 172 Leninsky Ave., Voronezh, 394033, Russia, mks36@mail.ru

Dmitrij S. Kitaev master student., machines and apparatuses of food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kitaevdm01@mail.ru

Natalya L. Klejmenova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, Department of Quality Management, Hospitality and Tourism, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, 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 11/03/2025	После редакции 08/04/2025	Принята в печать 11/04/2025
Received 11/03/2025	Accepted in revised 08/04/2025	Accepted 11/04/2025

Анализ изменений геометрии и кинематики зубчатой передачи в условиях абразивного изнашивания

Анатолий М. Попов	¹	popov4116@yandex.ru	 0000-0003-0728-7211
Анатолий Л. Майтаков	¹	may585417@mail.ru	 0000-0002-0714-204X
Рауф В.-О. Мехдиев	¹	popov4116@yandex.ru	 0009-0005-5536-5482
Надежда Т. Ветрова	¹	veteroknadi@mail.ru	 0000-0002-7131-0511

¹ Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия,

Аннотация. Исследования надежности современных сельскохозяйственных, пищевых и горных машин и механизмов показывают, что до 40 % отказов приходится на долю агрегатов трансмиссии, работоспособность которых в значительной мере регламентируют зубчатые колеса, эксплуатация которых происходит в условиях высокой запыленности воздуха и недостаточной герметичности внутренних полостей. В результате износа зубьев колес появляются вибрации, возрастают динамические нагрузки в приводах. Все это в большей степени связано с изменением кинематики зубчатого зацепления при износе. Целью данной работы является исследование изменений геометрии и кинематики зубчатых передач в условиях абразивного изнашивания. Объектами исследований являлась оценка распределение контактных напряжений и нагрузок, что является ключевым моментом при разработке износостойких и надёжных зубчатых передач. Определялись дополнительные факторы: влияние эксплуатационных нагрузок, изменения формы зубьев в процессе работы и их воздействие на точность передачи движения. В результате проведенных исследований разработаны аналитические зависимости, которые позволяют выполнять расчёты геометрических, кинематических и качественных характеристик передачи и прогнозировать скорость изнашивания шестерни и колеса, оценивать величину контактных напряжений и коэффициента удельного скольжения по линии зацепления пары зубьев на различной стадии износа. В процессе изнашивания линия зацепления искривляется, а её начало, и конец сдвигаются в направлении вращения зубчатых колёс. Коэффициент перекрытия при этом постепенно снижается, но при степени износа свыше 18–20% стабилизируется в пределах 1,03–1,1. В процессе абразивного изнашивания тяжело нагруженных передач происходит не только изменение формы профилей зубьев, но и изменение закона относительного движения колёс.

Ключевые слова: износ зубчатых колес, геометрия зубчатых колес, относительное скольжение, радиус кривизны.

Analysis of changes in geometry and kinematics of the gear gears in conditions of abrasive wear

Anatolij M. Popov	¹	popov4116@yandex.ru	 0000-0003-0728-7211
Anatolij L. Maytakov	¹	may585417@mail.ru	 0000-0002-0714-204X
Rauf V.-O. Mehdiyev	¹	popov4116@yandex.ru	 0009-0005-5536-5482
Nadezhda T. Vetrova	¹	veteroknadi@mail.ru	 0000-0002-7131-0511

¹ Kemerovo State University, Krasnaya Str. 6, Kemerovo, 650000, Russia

Abstract. Studies of the reliability of modern agricultural, food and mining machines and mechanisms show that up to 40% of failures occur in transmission units, the performance of which is largely regulated by gears, which are operated in conditions of high air dust and insufficient tightness of internal cavities. As a result of wear on the teeth of the wheels, vibrations appear, and dynamic loads in the drives increase. All this is largely due to the change in gear gearing kinematics during wear. The purpose of this work is to study changes in the geometry and kinematics of gears under conditions of abrasive wear. The objects of research were the evaluation of the distribution of contact stresses and loads, which is a key point in the development of wear-resistant and reliable gears. Additional factors were determined: the influence of operational loads, changes in the shape of teeth during operation and their impact on the accuracy of motion transmission. As a result of the research, analytical dependencies have been developed that make it possible to calculate the geometric, kinematic and qualitative characteristics of the transmission and predict the wear rate of gears and wheels, estimate the magnitude of contact stresses and the coefficient of specific slip along the engagement line of a pair of teeth at various stages of wear. During the wear process, the engagement line bends, and its beginning and end shift in the direction of rotation of the gears. The overlap coefficient gradually decreases, but with a degree of wear above 18–20% it stabilizes in the range of 1.03–1.1. During the abrasive wear of heavily loaded gears, not only the shape of the tooth profiles changes, but also the law of relative movement of the wheels changes.

Keywords: gear wear, gear geometry, relative slip, radius of curvature.

Для цитирования

Попов А.М., Майтаков А.Л., Мехдиев Р.В.-О., Ветрова Н.Т. Анализ изменений геометрии и кинематики зубчатой передачи в условиях абразивного изнашивания // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 38–45. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-38-45

For citation

Popov A.M., Maytakov A.L., Mehdiyev R.V.-O., Vetrova N.T. Analysis of changes in geometry and kinematics of the gear gears in conditions of abrasive wear. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 38–45. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-38-45

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

Введение

Исследования надежности современных сельскохозяйственных, пищевых и горных машин и механизмов показывают, что до 40% отказов приходится на долю агрегатов трансмиссии, работоспособность которых в значительной мере регламентируют зубчатые колеса. Так при капитальном ремонте из-за износа и усталостного разрушения выбраковывается свыше 60% зубчатых колес [1–5]. Основная доля отказов агрегатов трансмиссий приходится на коробку передач – до 45%. Детальными, лимитирующими долговечность коробки передач, являются зубчатые колеса, которые у тракторов сельскохозяйственного назначения подвержены в большей степени абразивному изнашиванию, так как их эксплуатация происходит в условиях высокой запыленности воздуха и недостаточной герметичности внутренних полостей смазочной системы трансмиссии.

В результате износа зубьев колес появляются вибрации, возрастают динамические нагрузки в приводах. Все это в большей степени связано с изменением кинематики зубчатого зацепления при износе.

Определение геометрических, кинематических и качественных показателей зубчатых зацеплений преимущественно проводится с использованием аналитических методов. Это связано с тем, что, как отмечается в ряде исследований, геометрические построения, используемые для анализа изменения параметров зацепления, не дают необходимой точности и полной картины формирования возбуждающих колебательных процессов, вызванных изменением функции передаточного отношения. Характер последних предопределяет кинематический анализ зацепления пары зубчатых колес на всех стадиях их износа под нагрузкой. Что позволяет не только определить угловые скорости и ускорения колес, но и определить линейные скорости и ускорения в относительном движении пары зубьев, что предопределяет условия изнашивания на всем участке зацепления пары зубьев и позволяет прогнозировать физику процесса и, соответственно, скорость изнашивания по высоте зуба.

Основной целью анализа зубчатого зацепления состоит в выявлении закона изменения передаточного отношения, особенно при наличии изношенных профилей сопряженных зубьев [7–11]. Методы исследования, используемые в теории зубчатых зацеплений, условно можно разделить на методы дифференциальной геометрии,

кинематические, синтетические. Проведенные нами исследования кинематических и геометрических характеристик зацепления опираются, главным образом, на кинематические методы, которые позволили в ряде случаев упростить математические выкладки по сравнению с другими методами. В общем случае, анализ сводится к отысканию уравнения зацепления изношенного профиля, при известной зависимости изменения функции передаточного отношения при износе силовой зубчатой передачи. Решение этой задачи важно для оценки рабочих характеристик зубчатых передач приводов машин и прогнозирования их срока службы.

Цель работы – исследование изменений геометрии и кинематики зубчатых передач в условиях абразивного изнашивания.

Материалы и методы

Анализ литературных источников российских и зарубежных авторов [12–16] показывают, что изменения профилей зубьев при износе более 3–5% силовых передач разного модуля, разного передаточного отношения, разной твердости и коэффициентов смещения исходного контура, различных трансмиссий в сельскохозяйственных, транспортных машинах (тракторы, комбайны), имеет несомненную схожесть. Причем было отмечено определенное различие изношенных профилей ведущего и ведомого колес. Исходя из этого, а также статистического анализа, были смоделированы профили изношенных зубьев шестерни и колеса. В каждом конкретном случае профиль зуба описывался полиномом в системе координат, жестко связанной с шестерней (колесом). Для анализа изношенного зацепления вводится три системы координат: подвижные системы S1 и S2, которые связаны с шестерней и колесом, а также неподвижная система S, жестко закрепленная относительно стойки. Геометрия зубьев исследуемых шестерен описывается системой уравнений в системе координат S1 (x_1 ; y_1 ; z_1):

$$\begin{aligned} x_1 &= \sum_{k=0}^7 C_k (y_1 - r_{f_1})^k; \\ 0,25m &\leq (y_1 - r_{f_1}) \leq 2,25m; \\ x_2 &= \sum_{k=0}^7 D_k (y_2 - r_{f_2})^k; \\ 0,25m &\leq (y_2 - r_{f_2}) \leq 2,25m, \end{aligned} \quad (1)$$

где r_1 , r_2 – радиус окружности впадин шестерни и колеса, мм; m – модуль зацепления, мм; D_k , C_k – коэффициент полинома; k – степень полинома.

Анализ проводится в десяти сечениях по высоте зуба и на разных стадиях износа. Кроме того, для уточнения результатов рассматриваются дополнительные факторы: влияние эксплуатационных нагрузок, изменения формы зубьев в процессе работы и их воздействие на точность передачи движения. Эти исследования позволяют более детально оценить распределение контактных напряжений и нагрузок, что является ключевым моментом при разработке износостойких и надёжных зубчатых передач.

Результаты и обсуждение

Профили зубьев шестерни и колеса, а также орты нормали в неподвижной системе координат $S(x; y; z)$ описываются с помощью уравнений.

$$\begin{aligned} x^{(1)} &= x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1; \\ y^{(1)} &= x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1; \\ l_x^{(1)} &= l_{x_1} \cos \varphi_1 - l_{y_1} \sin \varphi_1; \\ x^{(2)} &= x_2 \cos \varphi_2 + y_2 \sin \varphi_2; \\ y^{(2)} &= -x_2 \cos \varphi_2 + y_2 \sin \varphi_2 + a_\omega; \\ y^{(2)} &= -x_2 \cos \varphi_2 + y_2 \cos \varphi_2 + a_\omega, \end{aligned} \quad (2)$$

где φ_1 и φ_2 – углы поворота колёс относительно стойки; l_i – орты нормалей в соответствующей системе.

В точке касания профилей у них должны быть равны радиусы векторы и орты нормали, основываясь на этом, получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} x_1 \cos \varphi_1 - y_1 \sin \varphi_1 &= x_2 \cos \varphi_2 + y_2 \sin \varphi_2; \\ x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1 &= -x_2 \cos \varphi_2 + \\ &+ y_2 \sin \varphi_2 + a_\omega; \\ l_{x_1} \cos \varphi_1 - l_{y_1} \sin \varphi_1 &= l_{x_2} \cos \varphi_2 + l_{y_2} \sin \varphi_2; \\ x_1 &= \sum_{k=0}^7 C_k (y_1 - r_{f_1})^k; \\ 0,25m &\leq (y_1 - r_{f_1}) \leq 2,25m; \\ x_2 &= \sum_{k=0}^7 D_k (y_2 - r_{f_2})^k; \\ 0,25m &\leq (y_2 - r_{f_2}) \leq 2,25m. \end{aligned} \quad (3)$$

В данном случае существует пять уровней, которые связывают шесть параметров: $\varphi_1, x_1, y_1, \varphi_2, x_2, y_2$. При заданном угле поворота φ_1 в интервале от $-0,5\pi$ до $0,5\pi$ с шагом 1° мы можем, используя систему уравнений (3), вычислить остальные параметры в зависимости от φ_1 .

Для нахождения функции передаточного отношения была продифференцирована зависимость $\varphi_2 = \varphi_2(\varphi_1)$. При этом учитывалось, что $i_{21} = d\varphi_2/d\varphi_1 = \varphi_2'(\varphi_1)$.

В процессе решения системы уравнений (3) мы также получаем координаты точки контакта для каждого значения угла φ_1 . Эти точки контактных взаимодействий на изношенных профилях зубьев, как известно, определяют линию зацепления, которая является важнейшей характеристикой работы зубчатой передачи. Такая линия зацепления непосредственно влияет на качество и эффективность передачи движения в системе.

Кроме того, нами был выполнен аналитический синтез изношенной передачи с использованием тех же координатных систем, которые применялись при анализе. В ходе экспериментальных исследований был получен закон изменения передаточного отношения, представленный в виде рядов Фурье, а также профиль зуба, который был выражен через степенной ряд. Эти данные позволили провести синтез зацепления и вычислить профиль зуба колеса, после чего его форма была сопоставлена с результатами, полученными в ходе испытаний, что позволило оценить точность и корректность полученных теоретических моделей.

Исследование геометрических и кинематических характеристик зацепления основывается на кинематических методах, которые особенно эффективны при анализе вариаций в отношениях скоростей, когда $i12 \neq \text{const}$. Эти методы позволили значительно упростить сложные математические выкладки и расчёты, что стало возможным благодаря их высокой точности и удобству применения в условиях изменяющихся параметров.

Анализ функции передаточного отношения, полученной нами в экспериментах на передачах разного модуля (2; 3; 4; 5 мм), разной твердости (HRC45, HB 350) со смещением исходного контура и без смещения (рисунок 1), показал, что экстремальные значения функции передаточного отношения, если использовать основную теорему зацепления [1, 2].

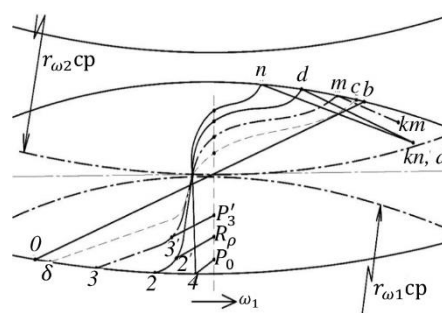


Рисунок 1. Изменение линии зацепления при изнашивании ($\Delta S=0\%; 3\%; 5\%; 8\%; 25\%$; $m=5$ мм; $z_1/z_2 = 18/30$)
Figure 1. Changing the engagement line during wear ($\Delta S=0\%; 3\%; 5\%; 8\%; 25\%$; $m=5$ mm; $z_1/z_2 = 18/30$)

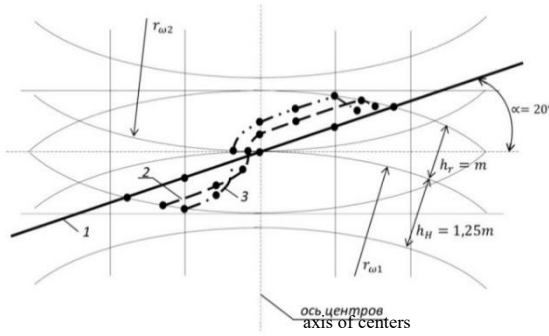


Рисунок 2. Линии зацепления при износе, построенные по результатам аналитического расчета (1-ΔS=0%; 2-ΔS=5%; 3-ΔS=25%)

Figure 2. Lines of engagement during wear, constructed according to the results of an analytical calculation (1-ΔS=0%; 2-ΔS=5%; 3-ΔS=25%)

Анализ графиков, полученных в результате проведённых опытов и выражающих функцию передаточного отношения, показывает, что её значение может быть представлено корреляционной зависимостью:

Экстремальные значения функции передаточного отношения определяются с использованием основной теоремы зацепления (рисунок 1):

Учитывая, что крайнее положение полюса зависит не только от модуля, но и от величины износа, в зависимости вводится коэффициент $k_{\Delta S}$, отражающий степень изношенности передачи.

Поскольку коэффициент $k_{\Delta S}$ влияет не на $r_{\omega 1}$ и $r_{\omega 2}$, а на расстояние крайних положений мгновенного полюса от R_0 , зависимости (3) для различных степеней износа могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} i_{12}^{\max} &= \frac{r_{\omega 2}^{\max}}{r_{\omega 1}^{\min}} = \frac{z_2 + 1.8k_{\Delta S}}{z_1 - 1.8k_{\Delta S}}; \\ i_{12}^{\min} &= \frac{r_{\omega 2}^{\min}}{r_{\omega 1}^{\max}} = \frac{z_2 - 1.3k_{\Delta S}}{z_1 + 1.3k_{\Delta S}}; \\ k_{\Delta S} &= \frac{1.1^{\Delta S} - 1.1^{-\Delta S}}{1.1^{\Delta S} + 1.1^{-\Delta S}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где ΔS — относительная величина износа, %; $r_{\omega 1}^{\min}$, $r_{\omega 1}^{\max}$, $r_{\omega 2}^{\max}$, $r_{\omega 2}^{\min}$ — минимальные и максимальные значения мгновенных радиусов центров вращения шестерни и колеса.

Применяя кинематический метод, мы находим уравнение зацепления $\vec{n}_i \vec{v}_i^{(12)} = 0$, как произведение векторов нормали и скорости относительного движения, в соответствующей i -й системе координат.

Представим уравнение зацепления, как скалярное произведение векторов для профилей зуба шестерни, и объединив его с системой уравнений (4), получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} x_1 &= \sum_{K=1}^7 c_K (y_1 - r_{f_1})^{K-1}; \\ i_{12} &= \frac{z_2}{z_1} + \frac{i_{12}^{\max} - i_{12}^{\min}}{2} \sum_{j=1}^n A_j \sin(jz_1 y_1 + \varphi_j); \\ i_{12}^{\max} &= \frac{z_2 + 1.8k_{\Delta S}}{z_2 - 1.8k_{\Delta S}}; \quad i_{12}^{\min} = \frac{z_2 - 1.3k_{\Delta S}}{z_2 + 1.3k_{\Delta S}}; \\ k_{\Delta S} &= \frac{1.1^{\Delta S} - 1.1^{-\Delta S}}{1.1^{\Delta S} + 1.1^{-\Delta S}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для решения этого уравнения необходимо, установив значение износа и задав угол поворота шестерни φ_1 в пределах интервала, $-0,5\pi \leq \varphi_1 \leq 0,5\pi$ вычислить координаты контактной точки в соответствующей системе координат. На основе полученных данных, уравнение линии зацепления, которое представляет собой множество точек контакта, определяется в неподвижной системе координат S . Эти вычисления позволяют более точно моделировать поведение зацепления и его изменения в зависимости от износа и угловых перемещений

Теперь, используя матрицы перехода от одной системы координат к другой, опираясь на ранее полученные выражения, можно вычислить координаты любой точки, лежащей на линии зацепления, что позволяет точно определить геометрию взаимодействующих профилей. Профиль зуба колеса, в свою очередь, можно рассматривать как огибающую однопериодного семейства профилей зуба шестерни, которые движутся относительно друг друга. Исходя из этого, уравнение профиля зуба колеса, представляющего собой совокупность характеристик в системе координат S_2 , может быть записано в следующем виде, что дает возможность детально проанализировать форму и особенности работы зацепления в разных точках.

Таким образом, с использованием вышеупомянутых выражений, мы можем получить искомый профиль зуба колеса. При сравнении этого профиля с экспериментально полученным результатом видно, что отклонение не превышает 4%, что служит убедительным подтверждением точности предложенных зависимостей и их возможности для применения в инженерных расчетах.

Существенное влияние на износ зубьев оказывают особенности геометрии и кинематики зубчатого зацепления [4, 17–19]. За время прохождения площадки контакта над данной точкой поверхности при взаимодействии пары зубьев изменяются удельная скорость скольжения, приведенный радиус кривизны ρ_{np} . Эти методы позволяют получить более точные данные, которые необходимы для дальнейшего анализа. Более точное определение данных параметров аналитическими методами позволит повысить качество расчетов на износ, разработать рекомендации по оптимизации конструкции пар трения и технологий поверхностного упрочнения, усовершенствовать методики испытаний на износостойкость. Для этого необходим учет влияния на процесс изнашивания кинематики относительных перемещений и динамики нагружения звеньев машин, обусловленных функционированием пары трения в машинном агрегате.

Исходя из теории трения и изнашивания твердых тел в различных условиях с учетом физики явлений, протекающих в зонах контакта взаимодействующих поверхностей предложенной И.В. Крагельским [6], в зацепления влияние кинематических и геометрических факторов на процесс износа зубьев традиционно выражается через коэффициенты удельного скольжения η или скорости от относительного скольжения $V^{(12)}$, которые позволяют более точно оценить степень воздействия этих факторов на износ и долговечность зубчатых передач, а геометрические через кривизну контактирующих профилей $\tilde{K}_1$ [4].

Компоненты $V^{(12)}$, $V_K^{(1)}$ и $V_K^{(2)}$, которые присутствуют в приведенной формуле, взяты по модулю. Однако важно отметить, что знаки этих компонентов, отражающие их направления относительно друг друга, также учитываются в расчетах. Это необходимо для более точного моделирования взаимодействия элементов системы. Векторы скоростей перемещения контактной точки в процессе относительного движения по профилям зубьев, с учётом их направления и величины, можно выразить следующим уравнением, что позволит детально анализировать динамику зацепления и взаимодействие шестерни и колеса.

Для нахождения частной производной, которая находится в правой части уравнения, необходимо продифференцировать выражения (2) и (3). Это позволит получить необходимую зависимость, учитывая влияние каждого из параметров на конечный результат.

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{V^{(2)}}{V_K^{(1)}} - 1; \eta = 1 - \frac{V_K^{(1)}}{V_K^{(2)}}; \\ \vec{V}_K^{\omega} &= \frac{\partial \vec{r}_i(x_i, y_i)}{\partial y_i} \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial \varphi_i} \frac{dy_i}{dt}; \\ \frac{\partial r_1(x_1, y_1)}{\partial y_1} &= \vec{i}_1 \sum_{K=1}^7 K C_K (y_1 - r_{f_1})^{k-1} + \vec{j}_1; \quad (6) \\ \frac{\partial r_2(x_2, y_2)}{\partial y_2} &= \vec{i}_2 \sum_{K=1}^7 K D_K (y_2 - r_{f_2})^{k-1} + \vec{j}_2; \\ \vec{V}^{(12)} &= \vec{V}_K^{(2)} - \vec{V}_K^{(1)},\end{aligned}$$

где $V^{(12)}$ – скорость относительного движения (скорость скольжения) колес; $V_K^{(1)}$ и $V_K^{(2)}$ – скорость перемещения точки контакта по поверхностям зубьев шестерни и колеса, соответственно; $i=1,2$ – индекс, указывающий шестерню и колесо

Для определения вектора скорости относительного движения необходимо учесть изменения координат во времени, что можно выразить через производные координат.

Таким образом, коэффициент удельного скольжения определяется с учетом систем уравнений (1), (2) и (5), что позволяет точно учесть все необходимые параметры и их взаимное влияние. Полученная зависимость предоставляет более полное понимание процессов, происходящих в системе, и помогает точно вычислить этот коэффициент для различных условий эксплуатации.

Кривизны поверхностей в нормальном сечении являются одним из основных геометрических параметров зацепления, определяющих несущую способность передачи. Они позволяют выразить радиус кривизны сопряжённых профилей. Как упоминалось ранее, приведённые радиусы кривизны, вместе с удельными скольжениями, входят в применяемую методику расчёта скорости изнашивания.

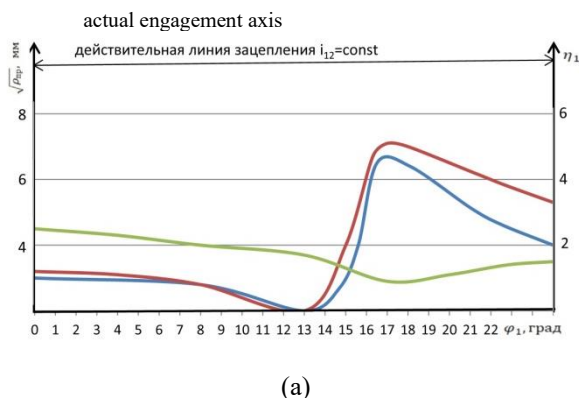
Для вычисления кривизны зуба шестерни и колеса $\tilde{K}_1, \tilde{K}_2$ применяется метод дифференциальной геометрии:

$$\begin{aligned}\tilde{K}_1 &= \frac{|x_1''|}{\left[1 + (x_1')^2\right]^{1.5}}; \\ \tilde{K}_2 \left(\vec{V}_K^{(1)} + \vec{V}^{(12)} \right) &= \tilde{K}_1 \vec{V}_K^{(1)} - \left(\vec{w}^{(1)} - \vec{w}^{(2)} \right) \vec{e}^{(1)}; \quad (7) \\ x_1'' &= \sum_{n=0}^{n=7} n(n-1) A_n y_a^{n-2}; \\ x_1' &= \sum_{n=0}^{n=7} n A_n y_a^{n-1},\end{aligned}$$

где $\tilde{K}_1, \tilde{K}_2$ – кривизна зубьев шестерни и колеса соответственно; $\vec{e}^{(1)}$ – вектор орта нормали в системе координат; $\vec{w}^{(1)}$ и $\vec{w}^{(2)}$ – векторы угловых скоростей шестерни и колеса соответственно.

Для нахождения решения по формуле (7) запишем уравнение нормали в виде $\vec{e}^{(1)} = \vec{i} \sin \gamma - \vec{j} \cos \gamma$, после чего, применяя коллинеарность (отношение параллельности) векторов $(\vec{w}^{(1)} - \vec{w}^{(2)})\vec{e}^{(1)}$, а также преобразуя зависимость нормали в скалярную форму, получим зависимость для определения приведенной кривизны профилей по линии их зацепления – K .

$$\begin{aligned}\vec{V}_K^{(2)} &= \vec{V}_K^{(1)} + \vec{V}_K^{(12)}; \\ \vec{V}_K^{(2)} &= \vec{V}_K^{(1)} + K \vec{V}_K^{(1)} = \vec{V}_K^{(1)} (1 + K); \\ K &= \frac{[x_1(1 + i_{12})] - a_w \sin \varphi_1 w^{(2)}}{\frac{dy_a}{dt}}; \\ \vec{V}_K^{(1)} [K_2(1 + K) - K_1] &= - \left[1 + \frac{1}{i_{12}} \right] \vec{w}^{(1)} \vec{e}^1; \\ K_2 &= \frac{K_1}{1 + K} + \frac{i_{12} - 1}{i_{12}(1 + K)} V_K^{(1)} w^{(1)}.\end{aligned}\quad (8)$$



В данном случае учитывается, что векторы $\vec{V}_K^{(1)}$ и $\vec{e} = (e_{y_1} \vec{i} + e_{x_1} \vec{j})$ коллинеарные. Учитывая, кривизна и радиус кривизны обратные функции получим $\rho_{np} = 1/K$.

Для расчета величин износа сопряженных поверхностей необходимо учитывать их относительное скольжение, зависящее от радиусов кривизны и кинематики относительных перемещений в паре трения и связанное с относительной скоростью. Ниже приводятся графики изменения этих параметров определенных нами аналитически для шестерни и колеса при износе 18% в сравнении с приведенными зависимостями для аналогичной не изношенной передачи для шестерни и колеса, соответственно. Видно, как значительно изменяется произведение приведенного радиуса кривизны $\rho_{np} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ и коэффициента удельного скольжения $\sqrt{\rho_{np}} \eta$, которое лежит в основе расчетов скорости изнашивания [13] и как резко изменяется приведенный радиус кривизны, который влияет на величину контактных напряжений.

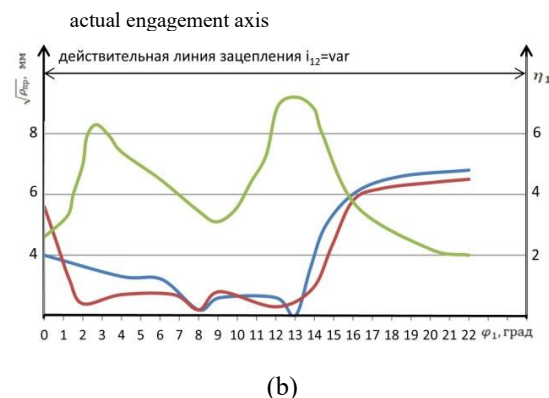


Рисунок 3. Диаграммы распределения $\eta_1, \sqrt{\rho_{np}}, (, \sqrt{\rho_{np}})$ по углу поворота шестерни из выражений (6) и (7) ($z_1=17, m=5$ мм, $\Delta S=8\%$): а – $i_{12} = const$; б – $i_{12} = var$

Figure 3. Distribution diagrams $\eta_1, \sqrt{\rho_{np}}, (, \sqrt{\rho_{np}})$ according to the gear rotation angle from expressions (6) and (7) ($z_1=17, m=5$ mm, $\Delta S=8\%$)

Закключение

1. В процессе абразивного изнашивания тяжело нагруженных передач происходит не только изменение формы профилей зубьев, но и изменение закона относительного движения колёс. Функция передаточного отношения i_{12} перестаёт быть постоянной и приобретает гармонический характер, причём период её

колебаний совпадает с периодом зубцовой частоты. На начальных стадиях износа размах колебаний i_{12} быстро увеличивается. Однако с ростом степени износа темпы увеличения размаха снижаются, и при износе, превышающем 15–20%, размах практически стабилизируется. Также наблюдается, что увеличение модуля передачи приводит к росту размаха колебаний.

Значения колебаний $i12$ при изнашивании могут быть достаточно большими. В ходе экспериментов установлено, что при износе порядка 18% и более, а также при малом числе зубьев шестерни, отношение $i12_{max}$ к $i12_{min}$ достигало 1,3.

2. В процессе изнашивания линия зацепления искривляется, а её начало, и конец сдвигаются в направлении вращения зубчатых колёс. Коэффициент перекрытия при этом постепенно снижается, но при степени износа свыше 18–20% стабилизируется в пределах 1,03–1,1.

3. С изменением линии зацепления меняются условия изнашивания, связанных с удельным скольжением и приведенным радиусом кривизны.

4. Изменения линии зацепления в процессе изнашивания проявляют схожую тенденцию при различных модулях, передаточных числах, твёрдости зубьев, а также при наличии или отсутствии смещения исходного контура.

5. Разработаны аналитические зависимости, которые позволяют выполнять расчёты геометрических, кинематических и качественных характеристик передачи и прогнозировать скорость изнашивания шестерни и колеса, оценивать величину контактных напряжений и коэффициента удельного скольжения по линии зацепления пары зубьев на различной стадии износа.

Литература

- 1 Прохоров В.П., Тимофеев Г.А., Чернышова И.Н. Эволюция эвольвентного зацепления при износе от истирания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 2. С. 14–21.
- 2 Акопян М.Г. Модель изнашивания зубчатых колес, учитывающая эволюционный характер процесса взаимодействия // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 3 (43). С. 106–120. doi: 10.21685/2072–3059–2017–3–9
- 3 Шевчук В.П., Шеховцов В.В., Клементьев Е.В. Исследование динамических характеристик трансмиссии сельскохозяйственного трактора шестого тягового класса // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 2. С. 44–49.
- 4 Усов П.П. Численный анализ переходных процессов в вязко-упруго-гидродинамическом контакте при реверсивном движении // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 2. С. 81–90.
- 5 Гусев И.В., Симонова Е.В. Анализ геометрии и кинематики зубчатых передач с учетом износа. Москва: Машиностроение, 2005.
- 6 Каменев М.И., Ширинский Ю.В. Изучение параметров зубчатых передач в условиях изменения их геометрии и кинематики. Москва: Научно-техническая литература, 2002.
- 7 Авсиевич А.М., Николаев В.А., Адаменко Д.В. О прогнозировании износа в высших кинематических парах // Теоретическая и прикладная механика. Международный научно-технический сборник. 2009. № 24. С. 236–238.
- 8 Багмутов В.П., Савкин А.Н., Паршев С.Н. Изнашивание деталей узлов трения наземных транспортных средств. Волгоград: ВолгГТУ, 2011. 56 с.
- 9 Маликов А.А., Лихошерст В.В., Шалобаев Е.В. Анализ и классификация процесса изнашивания зубчатых передач // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 9. С. 2–11.
- 10 Daubach K., Oehler M., Sauer B. Wear simulation of worm gears based on an energetic approach // Forsch. Ingenieurwes. 2022. V. 86. P. 367–377. doi: 10.1007/s10010–021–00525–3
- 11 Zakharenkov N.V., Kononov V.E., Kvasov I.N. et al. Increasing operation capacity for spherical bearing of indexing spatial mechanism under load // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1260. Iss. 11. P. 112037.
- 12 Lin W.Y., Tsai Y.H., Hsiao K.M. Optimum variable input speed for kinematic performance of Geneva mechanisms using teaching-learning-based optimization algorithm // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2017. V. 231. Iss. 10. P. 1871–1883.
- 13 Prabhu Sekar R., Sathishkumar R. Enhancement of wear resistance on normal contact ratio spur gear pairs through non-standard gears // Wear. 2017. V. 380–381. P. 228–239. doi: 10.1016/j.wear.2017.03.022
- 14 Breki A.D., Chulkin S.G., Gvozdev A.E. et al. Empirical mathematical model for the wear kinetics of porous gas-thermal coatings // Russ. Metall. (Metally). 2021. V. 2021. № 4. P. 496–500.
- 15 Rohrmoser A., Bode C., Schleib B. et al. Influence of metal gear tooth geometry on load and wear within metal-polymer gear pairs // Appl. Sci. 2022. V. 12. № 1. P. 128. doi: 10.3390/app12010128
- 16 Radzevich S.P. Theory of gearing: kinematics, geometry, and synthesis. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- 17 Alharbi K.A. Wear and mechanical contact behavior of polymer gears // J. Tribol. 2019. V. 141. № 1. Art. 011101.
- 18 Rohrmoser A., Hagenah H., Merklein M. Adapted tool design for the cold forging of gears from non-ferrous and light metals // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2021. V. 113. P. 1833–1848.
- 19 Fan X., Wang P., Li Y. Gear wear prediction based on the theorem of degradation entropy generation // Tribol. Int. 2024. V. 191. Art. 109175. doi: 10.1016/j.triboint.2023.109175
- 20 Yan Y., Jiang C., Li W. Simulation on coupling effects between surface wear and fatigue in spur gear // Eng. Fail. Anal. 2022. V. 134. Art. 106055. doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106055
- 21 Lin J., Fan X., Wang P., Li Y., Shi Z., Olofsson U. Gear wear prediction based on the theorem of degradation entropy generation // Tribol. Int. 2024. V. 191. Art. 109175. doi: 10.1016/j.triboint.2023.109175
- 22 Ishmuratov Kh., Hamroev R.K., Kurbonov B.B., Mirzaev N.N. Method for modeling the process of wear of gear teeth // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2176. Art. 012096. doi: 10.1088/1742-6596/2176/1/012096

References

- 1 Prokhorov V.P., Timofeev G.A., Chernyshova I.N. Evolution of involute engagement during abrasion. News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2015. no. 2. pp. 14–21. (in Russian)
- 2 Hakobyan M.G. A model of gear wear that takes into account the evolutionary nature of the interaction process. News of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences. 2017. no. 3(43). pp. 106–120. doi:10.21685/2072–3059–2017–3–9 (in Russian)

- 3 Shevchuk V.P., Shekhovtsov V.V., Klementyev E.V. Investigation of dynamic transmission characteristics of an agricultural tractor of the sixth traction class. Modern science-intensive technologies. 2013. no. 2. pp. 44–49. (in Russian)
- 4 Usov P.P. Numerical analysis of transient processes in viscoelastic-hydrodynamic contact in reverse motion. Problems of mechanical engineering and automation. 2021. no. 2. pp. 81–90. (in Russian)
- 5 Gusev I.V., Simonova E.V. Analysis of geometry and kinematics of gears taking into account wear. Moscow: Mashinostroenie, 2005. (in Russian)
- 6 Kamenev M.I., Shirinsky Yu.V. Study of gear parameters under conditions of changes in their geometry and kinematics. Moscow: Scientific and technical literature, 2002. (in Russian)
- 7 Avsievich A.M., Nikolaev V.A., Adamenko D.V. On wear prediction in higher kinematic pairs. Theoretical and applied mechanics. International scientific and technical collection. 2009. Issue. 24. pp. 236–238. (in Russian)
- 8 Bagmutov V.P., Savkin A.N., Parshev S.N. Wear of parts of friction units of land vehicles. VolgSTU, 2011. 56 p. (in Russian)
- 9 Malikov A.A., Likhoshester V.V., Shalobaev E.V. Analysis and classification of the wear process of gears. Handbook. Engineering magazine. 2011. no. 9. pp. 2–11. (in Russian)
- 10 Daubach K., Oehler M., Sauer B. Wear simulation of worm gears based on an energetic approach. J. Forsch Ingenieurwes. 2022. no. 86. pp. 367–377. doi:10.1007/s10010-021-00525-3
- 11 Zakharenkov N.V., Konovalov V.E., Kvasov I.N. et al. Increasing operation capacity for spherical bearing of indexing spatial mechanism under load. Journal of Physics: Conference Series. 2019. vol. 1260. no. 11. Art. 112037. doi:10.1088/1742-6596/1260/11/112037
- 12 Lin W.Y., Tsai Y.H., Hsiao K.M. Optimum variable input speed for kinematic performance of Geneva mechanisms using teaching-learning-based optimization algorithm. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part C): Journal of Mechanical Engineering Science. 2017. vol. 231. no. 10. pp. 1871–1883. doi:10.1177/0954406215627825
- 13 Prabhu Sekar R., Sathishkumar R. Enhancement of wear resistance on normal contact ratio spur gear pairs through non-standard gears. Wear. 2017. vol. 380-381. pp. 228–239. doi:10.1016/j.wear.2017.03.022
- 14 Breki A.D., Chulkin S.G., Gvozdev A.E. et al. Empirical mathematical model for the wear kinetics of porous gas-thermal coatings. Russian metallurgy (Metally). 2021. vol. 2021. no. 4. pp. 496–500. doi:10.1134/S0036029521040046
- 15 Rohrmoser A., Bode C., Schleich B. et al. Influence of metal gear tooth geometry on load and wear within metal-polymer gear pairs. Applied Sciences. 2022. no. 1. pp. 128–144. doi:10.3390/app12010270
- 16 Radzevich S.P. Theory of gearing: kinematics, geometry, and synthesis. Boca Raton: CRC Press, 2018. URL: <https://lccn.loc.gov/201800342>
- 17 Alharbi K.A. Wear and mechanical contact behavior of polymer gears. Journal of Tribology. 2019. vol. 141. no. 1. Art. 011101. doi:10.1115/1.4040645
- 18 Rohrmoser A., Hagenah H., Merklein M. Adapted tool design for the cold forging of gears from non-ferrous and light metals. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. vol. 113. pp. 1833–1848. doi:10.1007/s00170-021-06729-9
- 19 Fan X., Wang P., Li Y. Gear wear prediction based on the theorem of degradation entropy generation. Tribology International. 2024. vol. 191. Art. 109175. doi:10.1016/j.triboint.2023.109175
- 20 Yan Y., Jiang C., Li W. Simulation on coupling effects between surface wear and fatigue in spur gear. Engineering Failure Analysis. 2022. vol. 134. Art. 106055. doi:10.1016/j.engfailanal.2022.106055
- 21 Lin J., Fan X., Wang P., Li Y., Shi Z., Olofsson U. Gear wear prediction based on the theorem of degradation entropy generation. Tribology International. 2024. vol. 191. Art. 109175. doi:10.1016/j.triboint.2023.109175
- 22 Ishmuratov Kh., Hamroev R.K., Kurbonov B.B., Mirzaev N.N. Method for modeling the process of wear of gear teeth. Journal of Physics: Conference Series. 2022. vol. 2176. Art. 012096. doi:10.1088/1742-6596/2176/1/012096

Сведения об авторах

Анатолий М. Попов д.т.н., профессор, кафедра мехатроники и автоматизации технологических систем, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, porov4116@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0728-7211>

Анатолий Л. Майтаков д.х.н., профессор, кафедра управления качеством, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, may585417@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0714-204X>

Рауф В.-О. Мехдиев аспирант, кафедра мехатроники и автоматизации технологических систем, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, porov4116@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-5536-5482>

Надежда Т. Ветрова к.т.н., доцент, кафедра управления качеством, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, veteroknadi@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7131-0511>

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

Anatolij M. Popov Dr. Sci. (Engin.), professor, mechatronics and automation of technological systems department, Kemerovo State University, Krasnaya Str. 6, Kemerovo, 650000, Russia, popov4116@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0728-7211>

Anatolij L. Maytakov Dr. Sci. (Engin.), professor, quality management department, Kemerovo State University, Krasnaya Str. 6, Kemerovo, 650000, Russia, may585417@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0714-204X>

Rauf V.-O. Mehdiyev graduate student, mechatronics and automation of technological systems department, Kemerovo State University, Krasnaya Str. 6, Kemerovo, 650000, Russia, popov4116@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-5536-5482>

Nadezhda T. Vetrova Cand. Sci. (Engin.), docent, quality management department, Kemerovo State University, Krasnaya Str. 6, Kemerovo, 650000, Russia, veteroknadi@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7131-0511>

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 26/02/2025	После редакции 13/03/2025	Принята в печать 08/04/2026
Received 26/02/2025	Accepted in revised 13/03/2025	Accepted 08/04/2026

Умная упаковка: интеграция IoT и датчиков для контроля качества пищевых продуктов

Сергей М. Махов¹ makhovsm@gmail.com  0009-0001-9626-4689

¹ МГУТУ им. Разумовского, ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к созданию и применению умной упаковки для пищевых продуктов, объединяющей сенсорные технологии и Интернет вещей (IoT). Отмечается, что традиционная упаковка обеспечивает лишь механическую защиту, а умная упаковка позволяет отслеживать фактическое состояние продукции на всех этапах производства и логистики. Приведены примеры сенсоров, используемых в таких решениях: газовые индикаторы (O₂, CO₂, NH₃, H₂S), температурные и влажностные датчики, RFID/NFC метки, а также беспроводные протоколы связи (BLE, LoRaWAN, NB-IoT). Отдельное внимание уделяется интеграции химических и биосенсоров, позволяющих фиксировать патогены и метаболиты разложения. Рассмотрены примеры промышленных решений (NFC-метки для контроля шпината, IoT-платформа Wiliot, QR-коды Sealed Air), а также перспективы применения наноматериалов и биоразлагаемых композитов. Обсуждаются вопросы безопасности, энергоэффективности, стандартизации и утилизации электроники в упаковке. Отмечается, что несмотря на высокую стоимость и сложность внедрения, умная упаковка обладает значительным потенциалом для повышения прозрачности цепочек поставок, продления сроков годности, сокращения пищевых отходов и усиления взаимодействия с потребителем. Перспективными направлениями развития являются внедрение энергонезависимых сенсоров, стандартизация обмена данными и интеграция с искусственным интеллектом и блокчейн-платформами.

Ключевые слова: умная упаковка; Интернет вещей; датчики качества; мониторинг свежести; RFID/NFC; безопасность данных; прослеживаемость; устойчивость.

Smart packaging: integration of It and sensors for food quality control

Sergey M. Makhov¹ makhovsm@gmail.com  0009-0001-9626-4689

¹ Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, 73 Zemlyanoy Val Street, Moscow, 109004, Russia

Abstract. The article discusses modern approaches to the development and application of smart packaging for food products, which integrates sensor technologies and the Internet of Things (IoT). While conventional packaging provides only mechanical protection, smart packaging enables monitoring of the actual condition of products at all stages of production and logistics. Examples of sensors used in such systems are presented, including gas indicators (O₂, CO₂, NH₃, H₂S), temperature and humidity sensors, RFID/NFC tags, as well as wireless communication protocols (BLE, LoRaWAN, NB-IoT). Particular attention is given to the integration of chemical and biosensors capable of detecting pathogens and decomposition metabolites. Industrial case studies are reviewed, such as NFC tags for spinach freshness monitoring, the Wiliot IoT platform, and Sealed Air's QR code solutions, along with prospects for nanomaterials and biodegradable composites. Issues of data security, energy efficiency, standardization, and electronics disposal are analyzed. It is noted that despite high costs and integration challenges, smart packaging has considerable potential to enhance supply chain transparency, extend shelf life, reduce food waste, and improve consumer engagement. Promising directions include the development of energy-autonomous sensors, unification of data exchange standards, and integration with artificial intelligence and blockchain platforms.

Keywords: smart packaging; Internet of Things; quality sensors; freshness monitoring; RFID/NFC; data security; traceability; sustainability.

Введение

Контроль качества пищевых продуктов на всех этапах производства и логистики является ключевым фактором пищевой безопасности и сокращения потерь. По оценкам FAO, около 14% всего продовольствия «теряется» ещё до появления на полках магазинов [1]. Традиционная упаковка обеспечивает механическую защиту продукта, но не даёт оперативной информации о его фактическом состоянии. В этих условиях умная упаковка – объединяющая датчики,

беспроводную связь и аналитику – обещает повысить прозрачность цепочек поставок, сократить риски порчи и улучшить «отслеживаемость» [2].

Результаты и обсуждение

В умной упаковке применяются различные виды сенсоров и меток.

- Газовые индикаторы и датчики отслеживают состав газовой среды внутри упаковки.

Для цитирования

Махов С.М. Умная упаковка: интеграция IoT и датчиков для контроля качества пищевых продуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 46–50. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-46-50

For citation

Makhov S.M. Smart packaging: integration of It and sensors for food quality control. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 46–50. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-46-50

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

Чаще всего используются индикаторы кислорода и углекислого газа, которые меняют цвет при нарушении герметичности или при микробиологическом разложении [3]. Так, для индикации кислорода применяют красители (например, метиленовый синий), меняющие окраску при насыщении кислородом [4]. Новые разработки включают печатные полупроводниковые сенсоры, чувствительные к CO_2 , NH_3 , H_2S и другим газам.

- Температурные и влажностные сенсоры – т. е. цифровые термисторы и гигрометры – контролируют условия хранения. Нарушение температурного режима (особенно для скоропортящейся продукции) критично, поэтому широко используются индикаторы «время–температура» (ТТИ) – химические или биологические метки, изменяющие цвет в зависимости от накопленного теплового воздействия [5]. Такие ТТИ-индикаторы просты в использовании и позволяют фиксировать изначальный температурный профиль продукта. Также датчики влажности и уровня кислорода в упаковке помогают следить за окружающей средой продукта [6], что является важным для оценки условий хранения.

- RFID-метки и метки NFC (радиометки с идентификаторами) позволяют автоматически фиксировать упаковку на этапах логистики и при необходимости измерять внутренние параметры. Пассивные RFID-метки не требуют батареек и могут оснащаться датчиками температуры, влажности и целостности упаковки [7]. Безчиповые RFID-метки обещают дальнейшее удешевление решений – но пока они ограничены дальностью сигнала и сложности его обработки [8]. Метки NFC (Near-Field Communication) активируются при сканировании смартфоном и передают сведения о свежести или дате производства продукта напрямую потребителю.

- Bluetooth Low Energy и LPWAN (т. е. более энергоёмкие протоколы) применяются в упаковке реже. Однако BLE-метки встречаются в «умных» бутылках или контейнерах с едой (например, со встроенным аккумулятором). Для мониторинга крупных партий на складах используют технологии дальнего радиуса действия – LoRaWAN [9] или NB-IoT (сотовые IoT), позволяющие отправлять показания раз в несколько часов без риска быстрой разрядки.

Наконец, помимо сенсоров, в упаковке могут быть и другие элементы – например, кислородо-поглотители химически удаляют избыточный кислород из коробки и замедляют окисление продуктов; в свою очередь этиленовые бенты нейтрализуют парниковый газ этилен и замедляют созревание фруктов [10].

Такие технологии продлевают срок годности; при этом они требуют особого учёта в системе мониторинга [11].

Уровни типичного IoT-решения для умной упаковки отображены на Рисунке 1.

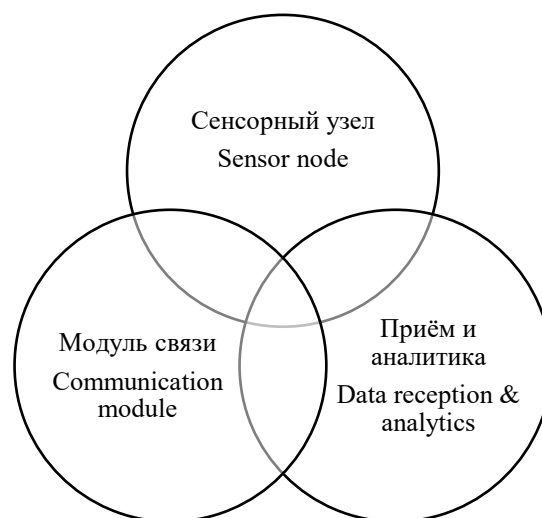


Рисунок 1. Уровни типичного IoT-решения для умной упаковки

Figure 1. Layers of a typical IoT solution for smart packaging

Устройство включает датчики (газ, температура, влажность, pH и др.), микроконтроллер (или специализированный IoT-чип) и источник энергии. Современные разработки демонстрируют автономные «пиксели» Ambient IoT – очень компактные NFC/BLE-метки с интегрированными сенсорами и антенной, которые питаются от радиоволн или света [12]. Такие метки могут крепиться к упаковке и автоматически передавать сигналы при приближении считывателя.

В устройстве предусмотрен передатчик: RFID/NFC-антенна, Bluetooth-модуль или LPWAN-трансивер. Датчики конфигурируются на периодическую или пороговую отправку данных. Популярные протоколы – MQTT, HTTP(S), CoAP – используются для передачи на облачный сервер. Например, специальные IoT-шлюзы на базе LoRaWAN собирают температуру множества меток на складе и пересылают их в облако для анализа.

Данные с сенсоров поступают на централизованный сервер или облачную платформу, где хранятся в базе и обрабатываются. В данном случае задействуются панели мониторинга и мобильные приложения. При отклонении от заданных параметров (например, превышение допустимой температуры) система мгновенно уведомляет ответственных сотрудников и фиксирует произошедшее [13]. Большие объёмы данных позволяют применять методы машинного обучения для прогноза «просрочки» (прогноз сроков годности) и оптимизации логистики.

Теперь рассмотрим примеры научных и промышленных решений. Группа исследователей из Империял Колледжа (Лондон) разработала одноразовый NFC-тег с бумажным газовым сенсором для контроля порчи упакованного шпината [14]. Сенсор, напечатанный углеродной пастой, менял электропроводность при изменении газового состава, а встроенная NFC-антенна передавала результат на смартфон. В экспериментах устройство успешно различало свежую и испорченную продукцию, а стоимость тега составила около \$0.35 – это сделало его практически безотходным решением для мониторинга сроков годности [14]. Исследование А. Соббана и др. показывает, что сочетание биосенсоров и IoT обеспечивает непрерывный контроль упаковки [13]. Биочувствительные датчики определяют патогены и метаболиты разложения (например, бактерии, токсины или изменения pH), а IoT-сети (Wi-Fi, BLE, 5G, NFC) передают эти данные в реальном времени всем участникам цепочки поставок [14]. Авторы отмечают перспективы новых наноматериалов (графен, MXene, биоразлагаемые композиты) и их будущую роль в создании сверхчувствительных и экологических сенсоров.

Исследователи также описывают применение RFID-меток для мониторинга температуры, влажности, pH и целостности упаковки [7]. Такие метки обеспечивают недорогое и энергоэффективное решение, особенно в логистике; позволяют считывать параметры без физического контакта. В перспективе безчиповые RFID-системы должны ещё больше удешевить технологию, хотя сейчас их ограничивают дальность работы, множественность сигналов при большом числе меток и необходимость соблюдения единых стандартов безопасности [7]. На рынке также уже имеются коммерческие платформы умной упаковки. Стартап Wiliot из США уже выпускает «IoT-пиксели» – крошечные автономные BLE-метки без батареи, которые прикрепляются к упаковке и передают данные о температуре и местоположении по радиоканалу [12]. Производители продуктов питания тестируют такие метки для контроля инвентаризации.

Стоит также рассмотреть пример компании Sealed Air (также из США), которая использует цифровую печать уникальных QR-кодов на каждой упаковке [15]. Такие коды распознаются специальными приложениями или IoT-устройствами и содержат в себе ссылку на веб-портал с информацией о продукте (происхождение, состав, экологические сертификаты, рецепты). Например, покупатель может сканировать код и увидеть полную историю партии товара – фактически «от фермы до магазина» [15]. Стартап Tapkit из Великобритании предлагает пользователям

динамические QR-коды – т.е. после печати упаковки ссылка, зашифрованная в коде, может обновляться; тем самым она позволяет изменять контент (рецепты, акции) без перепечатывания этикеток [16]. Такая упаковка превращается в канал взаимодействия с потребителем, предоставляя актуальную информацию и усиливая лояльность.

Отдельно необходимо рассмотреть вопросы безопасности, стандартизации, энергоэффективности и устойчивости. Во-первых, умные упаковки генерируют объёмы информации о происхождении и условиях хранения продукта – поэтому необходимы надёжные средства защиты: каналы связи должны быть зашифрованы (TLS/SSL), а доступ – аутентифицирован [17]. А. Соббан и его коллеги утверждают следующее – без надёжного шифрования и средств аутентификации невозможно гарантировать конфиденциальность и целостность данных, поступающих из сенсоров [13]. Технологии блокчейна рассматриваются для создания учёта всех событий в цепочке поставок. Стоит также отметить, что на данный момент решения разрознены – не существует единого стандарта взаимодействия разных датчиков и систем. Однако набирают силу глобальные стандарты – например, GS1 Digital Link позволяет закодировать в одном QR-коде ссылку на веб-ресурс с информацией о товаре (описание, срок годности, состав, пищевая ценность и т. д.) [18]. На наш взгляд, распространение подобных стандартов (GS1, MQTT, EPC) в будущем упростит интеграцию устройств разных производителей.

Далее рассмотрим встраивание источников питания в одноразовую упаковку, которое является сложным из-за высокой стоимости и ряда экологических рисков. Поэтому специалисты стараются предложить различные альтернативы – например, RF-энергохарвестинг или суперконденсаторы. Так, некоторые NFC-метки оснащаются микросоляром или же являются ориентированными на сбор «световой энергии» [12]. Также системы оптимизируют процессы – например, данные передаются не постоянно, а при появлении аномалий или по расписанию. Наконец, наличие электроники в упаковке ставит задачу утилизации. Применение биоразлагаемых и нетоксичных материалов (целлюлоза, белковые полимеры, графен) в перспективе может уменьшить экологический след таких систем [13, 19]. Одновременно «умная» упаковка сама по себе способствует устойчивости: она помогает сократить пищевые отходы (за счёт продления срока годности и лучшего контроля качества) и оптимизировать логистику. Например, отмечено, что за счёт продления свежести товаров и перераспределения продуктов с истекающим сроком годности объём пищевых отходов заметно снижается [20].

Основные ограничения для широкого внедрения умной упаковки – это стоимость и сложность интеграции. Цены на сенсоры и метки действительно падают – но внедрение даже простого ТТ-датчика или NFC-метки увеличивает себестоимость упаковки. При этом также необходимо перестраивать логистические процессы и обучать персонал работе с новыми данными. Также существует риск недоверия потребителей – часть из них может опасаться слежки или утечки данных, поэтому специалистам индустрии важно обеспечить прозрачность информации. При этом стоит отметить, что перспективы технологии действительно огромны – так, внедрение энергонезависимых технологий (Ambient IoT) и стандартизованных протоколов (6LoWPAN, MQTT) смогут сделать умную упаковку более подходящей для повсеместного использования. Интеграция с AI и блокчейн-платформами позволит строить открытые реестры качества продуктов. Также ожидается появление автономных адаптивных упаковок, которые информируют потребителя и специалиста о состоянии продукта и динамически меняют

условия хранения (например, при необходимости активируют поглотители газов).

Заключение

Технологии умной упаковки объединяют сенсорные решения и Интернет вещей с целью непрерывного мониторинга качества пищевых продуктов. Современные подходы – химические индикаторы, беспроводные сенсорные метки и др. – позволяют повысить безопасность, сократить потери продукции и усилить «отслеживаемость». Опыт научных и промышленных проектов показывает эффективность таких систем – они помогают вовремя выявить отклонения условий хранения и предупредить риски потери качества. При этом не стоит забывать, что нерешенными остаются задачи энергоснабжения, стандартов и стоимости, которые требуют дальнейших тщательных исследований. Перспективные направления дальнейших исследований, следовательно, включают в себя разработки энергонезависимых сенсоров, унификацию стандартов обмена данными и расширенное взаимодействие упаковки с искусственным интеллектом.

Литература

- 1 Mkhari T., Adeyemi J.O., Fawole O.A. Recent advances in the fabrication of intelligent packaging for food preservation: a review // *Processes*. 2024. Vol. 13. No. 2. P. 539. DOI: 10.3390/pr13020539.
- 2 Realini C.E., Marcos B. Active and intelligent packaging systems for a modern society // *Meat science*. 2014. Vol. 98. No. 3. P. 404–419.
- 3 Biji K.B. et al. Smart packaging systems for food applications: a review // *Journal of food science and technology*. 2015. Vol. 52. No. 10. P. 6125–6135.
- 4 Mills A. Oxygen indicators and intelligent inks for packaging food // *Chemical Society Reviews*. 2005. Vol. 34. No. 12. P. 1003–1011.
- 5 Taoukis P.S. Modelling the use of time-temperature // *Food process modelling*. 2001. Vol. 59. P. 402.
- 6 Fathima M. How smart packaging sensors safeguard foods and drugs // *Packaging Digest*. 2017. 13 Apr. URL: <https://www.packagingdigest.com/food-packaging/how-smart-packaging-sensors-safeguard-foods-and-drugs> (дата обращения: 11.05.2025).
- 7 Zuo J., Feng J., Gameiro M.G. et al. RFID-based sensing in smart packaging for food applications: a review // *Future Foods*. 2022. Vol. 6. Art. No. 100198. DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100198.
- 8 Preradovic S., Karmakar N.C. Chipless RFID: Bar code of the future // *IEEE microwave magazine*. 2010. Vol. 11. No. 7. P. 87–97.
- 9 Jedermann R. et al. Testing Lora for food applications-Example application for airflow measurements inside cooled warehouses with apples // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 24. P. 284–289.
- 10 Wei H. et al. Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: A review // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 337. P. 127750.
- 11 Vermeiren L. et al. Developments in the active packaging of foods // *Trends in food science & technology*. 1999. Vol. 10. No. 3. P. 77–86.
- 12 Jenns C. Wiliot launches IoT platform for packaging [Электронный ресурс] // *Packaging Gateway*. 2024. 12 Jan. URL: <https://www.packaging-gateway.com/news/wiliot-iot-platform-packaging> (дата обращения: 11.05.2025).
- 13 Sobhan A., Hossain A., Wei L. et al. IoT-enabled biosensors in food packaging: a breakthrough in food safety for monitoring risks in real time // *Foods*. 2025. Vol. 14. No. 8. P. 1403. DOI: 10.3390/foods14081403.
- 14 Naik A., Goswami J.K., Bagchi M. et al. Smart packaging with disposable NFC-enabled wireless gas sensors for monitoring food spoilage // *ACS Sensors*. 2024. DOI: 10.1021/acssensors.4c02510.
- 15 Как связаны Интернет вещей и свежие продукты в вашем магазине? [Электронный ресурс] // МКА.ру. 2020. 29 апр. URL: <https://www.mka.ru/categories/84/18217> (дата обращения: 11.05.2025).
- 16 Top 7 Smart Packaging Examples in 2023 & 2024 [Электронный ресурс] // *StartUs Insights*. 2024. URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/smart-packaging-startups> (дата обращения: 11.05.2025).
- 17 McKay K., Cooper D. Guidelines for the selection, configuration, and use of transport layer security (TLS) implementations. National Institute of Standards and Technology, 2017. No. NIST Special Publication (SP) 800–52 Rev. 2 (Draft).

- 18 GS1 US. GS1 Digital Link Proof of Concept (Whitepaper) [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://documents.gs1us.org/adobe/assets/.../GS1-Digital-Link-POC-Whitepaper.pdf> (дата обращения: 11.05.2025).
- 19 Irimia-Vladu M. "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future // Chemical Society Reviews. 2014. Vol. 43. No. 2. P. 588–610.
- 20 How Smart Packaging Enhances Sustainability and Consumer Engagement [Электронный ресурс] // bl.ink Blog. 2022. URL: <https://www.bl.ink/blog/how-smart-packaging-enhances-sustainability-and-consumer-engagement> (дата обращения: 11.05.2025).

References

- 1 Mkhari T., Adeyemi J.O., Fawole O.A. Recent advances in the fabrication of intelligent packaging for food preservation: a review. Processes. 2024. vol. 13. no. 2. p. 539. doi: 10.3390/pr13020539
- 2 Realini C.E., Marcos B. Active and intelligent packaging systems for a modern society. Meat Science. 2014. vol. 98. no. 3. pp. 404–419. doi: 10.1016/j.meatsci.2014.06.028
- 3 Biji K.B., Ravishankar C.N., Mohan C.O., Gopal T.K.S. Smart packaging systems for food applications: a review. Journal of Food Science and Technology. 2015. vol. 52. no. 10. pp. 6125–6135. doi: 10.1007/s13197-015-1766-7
- 4 Mills A. Oxygen indicators and intelligent inks for packaging food. Chemical Society Reviews. 2005. vol. 34. no. 12. pp. 1003–1011. doi: 10.1039/b303997p
- 5 Taoukis P.S. Modelling the use of time–temperature. Food Process Modelling. 2001. vol. 59. p. 402. doi: 10.1533/9781855736313.3.402
- 6 Fathima M. How smart packaging sensors safeguard foods and drugs. Packaging Digest. 2017. 13 Apr. URL: <https://www.packagingdigest.com/food-packaging/how-smart-packaging-sensors-safeguard-foods-and-drugs> (in Russian)
- 7 Zuo J., Feng J., Gameiro M.G. et al. RFID-based sensing in smart packaging for food applications: a review. Future Foods. 2022. vol. 6. article no. 100198. doi: 10.1016/j.fufo.2022.100198
- 8 Preradovic S., Karmakar N.C. Chipless RFID: bar code of the future. IEEE Microwave Magazine. 2010. vol. 11. no. 7. pp. 87–97. doi:10.1109/MMM.2010.938571
- 9 Jedermann R. et al. Testing LoRa for food applications – example application for airflow measurements inside cooled warehouses with apples. Procedia Manufacturing. 2018. vol. 24. pp. 284–289. doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.043
- 10 Wei H. et al. Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: a review. Food Chemistry. 2021. vol. 337. p. 127750. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127750
- 11 Vermeiren L., Devlieghere F., van Beest M., de Kruijf N., Debevere J. Developments in the active packaging of foods. Trends in Food Science & Technology. 1999. vol. 10. no. 3. pp. 77–86. doi: 10.1016/S0924-2244(99)00032-1
- 12 Jenns C. Wiliot launches IoT platform for packaging. Packaging Gateway. 2024. 12 Jan. URL: <https://www.packaging-gateway.com/news/wiliot-iot-platform-packaging> (in Russian)
- 13 Sobhan A., Hossain A., Wei L. et al. IoT-enabled biosensors in food packaging: a breakthrough in food safety for monitoring risks in real time. Foods. 2025. vol. 14. no. 8. p. 1403. doi:10.3390/foods14081403
- 14 Naik A., Goswami J.K., Bagchi M. et al. Smart packaging with disposable NFC-enabled wireless gas sensors for monitoring food spoilage. ACS Sensors. 2024. doi:10.1021/acssensors.4c02510
- 15 How are the Internet of Things and fresh products in your store connected? MKA.ru. 2020. 29 Apr. URL: <https://www.mka.ru/categories/84/18217> (in Russian)
- 16 Top 7 Smart Packaging Examples in 2023 & 2024. StartUs Insights. 2024. URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/smart-packaging-startups> (in Russian)
- 17 McKay K., Cooper D. Guidelines for the selection, configuration, and use of transport layer security (TLS) implementations. National Institute of Standards and Technology, 2017. NIST Special Publication (SP) 800–52 Rev. 2 (Draft)
- 18 GS1 US. GS1 Digital Link Proof of Concept (Whitepaper). 2019. URL: <https://documents.gs1us.org/adobe/assets/.../GS1-Digital-Link-POC-Whitepaper.pdf> (in Russian)
- 19 Irimia-Vladu M. "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future. Chemical Society Reviews. 2014. vol. 43. no. 2. pp. 588–610. doi:10.1039/C3CS60235D
- 20 How Smart Packaging Enhances Sustainability and Consumer Engagement. bl.ink Blog. 2022. URL: <https://www.bl.ink/blog/how-smart-packaging-enhances-sustainability-and-consumer-engagement> (in Russian)

Сведения об авторах

Сергей М. Махов аспирант, кафедра биологии и биоинформатики, МГУТУ им. Разумовского, Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, makhovsm@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-9626-4689>

Information about authors

Sergey M. Makhov 3rd-year PhD student, Department of Biology and Bioinformatics, Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Zemlyanoy Val, 73, Moscow, 109004, Russia, makhovsm@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-9626-4689>

Вклад авторов

Сергей М. Махов Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

Sergey M. Makhov All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2026
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2026

Цельнозерновые макароны из полбы с повышенным содержанием пищевой клетчатки за счет побочных продуктов переработки хурмы

Николай В. Меркурьев	¹	merkurevzoom@ya.ru	 0000-0003-2983-9224
Артем Е. Макаров	²	artem.makarov.2011@mail.ru	 0000-0002-6787-7697
Альберт Х.-Х. Нугманов	¹	nugmanov@rgau-msha.ru	 0000-0002-4093-9982
Игорь Ю. Алексанян	³	16081960igor@gmail.com	 0000-0001-5494-1226
Павел Д. Осмоловский	¹	pavel.osmolovsku@mail.ru	 0000-0003-1131-1552
Ксения А. Бородулина	¹	borodulina.ksysha@mail.ru	 0009-0003-9395-0936

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

² ООО «ПАСТАПИЦЦА», ул. Тургенева, 10/14, литера АА2, помещение 3, г. Астрахань, 414000, Россия

³ Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия

Аннотация. Плоды хурмы являются одними из наиболее широко культивируемых плодовых культур во всем мире, они широко распространены в странах Азии и Европы, и их производство растет вместе со спросом потребителей, в том числе и в России. Хурма является хорошим источником питательных веществ и биоактивных соединений, особенно пищевых волокон, каротиноидов и фенольных соединений, среди других биоактивных фитохимических веществ. Хурма относится к фруктам, имеющих не только ограниченный срок хранения, но и значительные потери при сборе урожая, т. е. это сезонный скоропортящийся фрукт, который трудно хранить и транспортировать, вследствие чего почти пятая часть от всех выращенных плодов просто выбрасывается. В настоящее время наблюдается рост валоризации не пригодных к продаже и хранению плодов хурмы для создания возможностей их комплексной переработки и полноценного использования в различных отраслях пищевой промышленности. В данной статье рассматривается возможность потенциального использования сухого порошка из плодов хурмы, прошедших этап экстракционной обработки, при производстве цельнозерновых макарон из полбы для их обогащения пищевыми волокнами. Общеизвестно, что макаронные изделия считаются хорошими носителями биологически активных веществ, в связи с чем и была поставлена цель данного исследования, которая заключалась в совершенствовании технологии цельнозерновых макаронных изделий, имеющих повышенное содержание пищевых волокон вследствие использования в их рецептуре порошка из хурмы. Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования как сушки полученного рафината из плодов хурмы, так и определения рациональной доли внесения полученного порошка в состав макаронного теста. Результат исследования подтвердил целесообразность использования сухого порошка из плодов хурмы в производстве цельнозерновых макарон из полбы, в том числе и за счет проведенного органолептического анализа полученных макаронных изделий как в исходном, так и отварном видах.

Ключевые слова: макаронные изделия, плоды хурмы, полба, пищевые волокна, экстрагирование, обезвоживание, органолептические показатели.

Whole-grain spelt pasta with increased dietary fiber content due to persimmon byproducts

Nikolay V. Merkuryev	¹	merkurevzoom@ya.ru	 0000-0003-2983-9224
Artyom E. Makarov	²	artem.makarov.2011@mail.ru	 0000-0002-6787-7697
Albert H.-H. Nugmanov	¹	nugmanov@rgau-msha.ru	 0000-0002-4093-9982
Igor Y. Aleksanyan	³	16081960igor@gmail.com	 0000-0001-5494-1226
Pavel D. Osmolovskiy	¹	pavel.osmolovsku@mail.ru	 0000-0003-1131-1552
Ksenia A. Borodulina	¹	borodulina.ksysha@mail.ru	 0009-0003-9395-0936

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

² PASTAPITZA LLC, Turgenev St., 10/14, letter AA2, room 3, Astrakhan, 414000, Russia

³ Astrakhan State Technical University, 16/1 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, Russia

Для цитирования

Меркурьев Н.В., Макаров А.Е., Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И.Ю., Осмоловский П.Д., Бородулина К.А. Цельнозерновые макароны из полбы с повышенным содержанием пищевой клетчатки за счет побочных продуктов переработки хурмы // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 51–63. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-51-63

For citation

Merkuriev N.V., Makarov A.E., Nugmanov A.Kh.-Kh., Aleksanyan I.Yu., Osmolovsky P.D., Borodulina K.A. Whole-grain spelt pasta with increased dietary fiber content due to persimmon byproducts. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 51–63. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-51-63

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

Abstract. Persimmon fruits are one of the most widely cultivated fruit crops worldwide, they are widely distributed in Asian and European countries, and their production is growing along with consumer demand, including in Russia. Persimmon is a good source of nutrients and bioactive compounds, especially dietary fiber, carotenoids and phenolic compounds, among other bioactive phytochemicals. Persimmon is one of the fruits that not only has a limited shelf life but also significant losses at harvest, i.e. it is a seasonal perishable fruit that is difficult to store and transport, due to which almost one-fifth of all fruits grown are simply discarded. Currently, there is an increase in the valorization of unsaleable and storable persimmon fruits to create opportunities for their complex processing and full use in various food processing industries. This article considers the possibility of potential use of dry powder from persimmon fruits that have passed the extraction processing stage in the production of whole-grain spelt pasta for their enrichment with dietary fiber. It is well known that pasta products are considered to be good carriers of biologically active substances, in connection with which the aim of this study was set, which was to improve the technology of whole-grain pasta products with increased content of dietary fiber due to the use of persimmon powder in their formulation. To achieve this goal, experimental studies were carried out both drying of the obtained persimmon fruit raffinate and determining the rational share of the obtained powder in the pasta dough composition. The result of the study confirmed the feasibility of using dried persimmon fruit powder in the production of whole-grain spelt pasta, including due to the conducted organoleptic analysis of the obtained pasta products in both initial and boiled forms.

Keywords: pasta, persimmon fruit, spelt, dietary fiber, extraction, dehydration, organoleptic parameters.

Введение

Общеизвестно, что в нашей стране макаронные изделия пользуются устойчивым спросом при сравнительно низкой стоимости, причем реализация полбы для цельнозерновых макаронных изделий повышает их качественные параметры, в частности, пищевую и биологическую значимость [1, 2]. Зерна полбы опережает пшеницу и рожь по сбалансированности питательных веществ, а принимая во внимание то, что ориентировочно третьей частью употребляемых человеком белковых комплексов являются белковые составляющие зерновых культур, понятна важность белковой доли в них и, как следствие в муке. Твердая оболочка зерна полбы защищает от различных заболеваний и вредителей, что, в свою очередь, позволяет значительно сократить использование химических удобрений. Целесообразность выработки муки из зерна полбы для макаронных изделий обоснована данными российских и иностранных ученых, однако на сегодняшний день потребление полбы и продукции из нее низкое, что обусловлено недостатком обоснованных технологий муки из зерна полбы и малым ассортиментом продуктов из нее [3, 4].

Несмотря на это, ассортимент здоровых продуктов, изготовленных из цельного зерна, постоянно расширяется, в частности, на рынке появляются цельнозерновые макаронные изделия, представляющие собой ценный диетический продукт. Это связано с тем, что такие макароны обладают приятным натуральным вкусом и имеют цвет, напоминающий некрепко заваренный чай. При правильном хранении в условиях комнатной температуры макароны, выработанные из цельного зерна полбы, могут сохранять свои полезные и органолептические свойства на протяжении двух лет [2, 3].

Для улучшения состава макаронных изделий перспективным также является использование ягодного или фруктового вторичного сырья, которое является побочным продуктом

переработки в сфере производства соковой продукции, экстракции или переспевшее, т. е. подлежащее к продаже. Побочные продукты агропромышленного производства являются ценными ресурсами, которые могут стать функциональными ингредиентами для производства макаронных изделий с добавленной стоимостью, тем самым снижая экологическую нагрузку [5, 6]. В частности, побочные материалы при экстрагировании могут быть использованы для выработки устойчивой фруктовой муки, обогащенной пищевыми волокнами, которую можно реализовать, к примеру, в производстве макаронных изделий. Рафинат из мякоти плодов хурмы, обогащенный пищевыми волокнами, служит основным побочным продуктом производства концентрированных экстрактов и может успешно использоваться в производстве макаронных изделий [7, 8, 9].

Плоды хурмы (*Diospyros kaki*) являются источником нерастворимых пищевых волокон, провитамина А, кальция, каротиноидов, витамина С и галловой кислоты, а также сахаров [10]. Мякоть плодов хурмы известна своей питательной ценностью, включающей 80% воды, менее 1% белка, 0,2% липидов, 18% углеводов и некоторых минералов (магний, железо, цинк, медь, марганец и т. д.) при этом, содержание пищевых волокон составляет порядка 1,5%. Содержание сахара в хурме выше (12,5 г/100 г) в хурме, чем в других широко потребляемых фруктах, таких как яблоки, персики, груши и апельсины [11, 12]. Все это говорит о пользе при регулярном употреблении мякоти плодов хурмы для исключения появления ряда патологий.

В последние годы возросло выращивание хурмы в России, что привело не только к росту потребления этих свежих фруктов, но и к их индустриализации в направлении производства соков, джемов или обезвоженных сухофруктов, которая, соответственно, привела к появлению большого количества побочных продуктов, состав и свойства которых могут сделать их функциональными ингредиентами,

в том числе и для производства цельнозерновых макаронных изделий из зерна полбы [13, 14]. Следует отметить, что выбор на макаронные изделия пал не только вследствие их широкого потребления в нашей стране, но в основном, потому что они считаются одним из наиболее лучших носителей биологически активных веществ [15–17].

Общеизвестно, что прежде, чем использовать фруктовую муку для обогащения макаронного теста, следует оценить, насколько это целесообразно и эффективно. При этом, важно учитывать, как эта добавка повлияет на качество готовых макаронных изделий и на сам процесс производства, который, несомненно, изменится после внесения соответствующих изменений в рецептуру макаронного теста с необходимостью достижения не только рационального содержания биологически активных веществ в готовых изделиях, но и соответствующего добавке профилактического эффекта [18–20], то есть, добавки должны улучшить продукт, а не ухудшить его потребительские свойства. В целом, решение о применении обогатителей должно приниматься на основе комплексной оценки влияния на всей стадии жизненного цикла продукта – от производства до потребления [1, 2, 16, 18].

Выбор премиксов при выработке цельнозерновых макаронных изделий должен опираться на теоретические положения сбалансированного питания с учетом доли биологически активных компонентов при придании профилактических характеристик, кроме того, гарантии сохранения качественных показателей в процессах варки хранения и перевозки продукции. Представленная выше информация подтверждает потенциальную возможность использования сухого порошка из мякоти плодов хурмы, прошедших этап экстракционной обработки.

Цель работы – совершенствование технологии макаронных изделий из цельнозерновой полбы с премиксом пищевых волокон за счет использования в их рецептуре порошка из мякоти плодов хурмы.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран плоды сорта хурмы «Королек», т. к., во-первых, это один из самых востребованных и продаваемых субтропических плодов на Российском рынке, а, во-вторых, помимо популярности у потребителей, обладают низкой терпкостью и, сравнительно, по отношению к другим видам хурмы, хорошей транспортабельностью. Внешне эта разновидность хурмы схожа с «шоколадной» хурмой, но отличается более крупным размером. Вес отдельных ягод достигает 200 г. и более, цвет от оранжевого до красного (рис. 1 (а)). На вкус плоды сладкие и нежные даже до наступления полной зрелости. Кожица «королька» гладкая, упругая, остается неповрежденной при долгой перевозке. Мякоть коричневая, становится темнее по мере созревания [21, 22].

Плоды хурмы, для изучения, были взяты еще твердыми, полностью окрашенными при завершении срока хранения. Для хранения плоды хурмы размещали в лотки из дерева в один слой, где хранили либо при комнатной температуре (T), при $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, принимая во внимание то, что хранение плодов хурмы при низких T в промышленных условиях более предпочтительно [21, 22].

Также в качестве объекта исследования выступали фигурные макаронные изделия «Campanelle» (рисунок 1 (б)), выработанные из макаронной крупки пшеницы сорта «Гремэ 2У», относящейся к полбе, которая была предоставлена Московским филиалом ФГБУ «Госсорткомиссия».



(a)



(b)

Рисунок 1. Внешний вид объектов исследования: а – плоды хурмы сорта «Королек»; б – фигурные макаронные изделия «Campanelle»

Figure 1. Appearance of research objects: a – fruits of persimmon variety “Korolek”; b – shaped macaroni products “Samranelle”

Рациональные массовые доли твердой и жидкой сред в гидромодуле при экстракции выявлялись в 2-х стадийной опытной серии. На 1-ой стадии диспергированную мякоть плодов хурмы подвергают жидкотвердофазной экстракции (ЖТФЭ) нагретой дистиллированной водной средой при 95 °С в течение 30 минут постоянно перемешивая при варьировании гидромодуля и переносят суспензию, по истечению времени, в термостатирующую емкость, где выстаивают ее при температуре 70 °С и ежечасно взбалтывают (общее время 10 часов), принимая во внимание, что этой продолжительности хватит для установления равновесия в гидромодуле. Далее рафинат мякоти плодов хурмы извлекают от экстракта путем фильтрации. На 2-ой стадии экстракт обезвоживают при конвективном подводе тепла при температуре 50 °С и по сухому остатку выявляют долю экстрактивных компонентов.

Долю сухого остатка в мякоти плодов хурмы и влажность (W) рафината из мякоти плодов хурмы выявляют гравиметрическим способом, по которому проводят определение варьирования массы пробы при термообработке (температура 105 °С) посредством термогравиметрического анализатора влажности МХ-50 с галогенным радиационным излучателем.

Концентрация сухих растворимых веществ в экстракте определялась рефрактометрическим способом, используя прибор ИРФ-454Б2М, принцип работы которого основан на изменении преломления луча света в зависимости от концентрации исследуемого раствора.

Полученный рафинат, для выработки из него муки, обезвоживали при температуре 75 °С до относительной влажности 10%. Высушенные пробы диспергировали до порошкового состояния и разбивали на фракции посредством просеивания на ситовом полотне с перфорациями размером частиц 210 мкм. В результате мука из мякоти плодов хурмы была разделена на два две фракции частиц (крупная (больше 210 мкм) и мелкая (меньше 210 мкм)).

Содержание пищевых волокон в муке из мякоти плодов хурмы определялось известным методом [25], основанным на очистке клетчатки от сопутствующих ей веществ (гемицеллюлоза, лигнин, пектин и др.) обработкой исследуемых плодов смесью крепкой уксусной и азотной кислот. Краткое описание метода: 1 г испытуемой пробы переносят в емкость объемом 300–400 см³, добавляют 100 см³ 4 % раствора серной кислоты, предварительно нагретой до кипения, и тщательно перемешивают. Уровень жидкой среды в емкости фиксируют меткой на ней. Затем композицию перемешивают и кипятят при слабом нагреве в течение 10 мин. Далее, прекращая кипячение следят, чтобы уровень жидкой среды дошел до риски не превышая ее.

После этого добавляют 28 см³ раствора 20 % гидроксида калия и снова кипятят 10 мин. Полученную смесь отстаивают до образования осадка, а осветленную жидкую среду фильтруют. Осадок переносят на фильтр и промывают его дважды 1%-м раствором соляной кислоты в количестве 20 мл каждая промывка. Далее пищевые волокна трижды или четырежды промывают до нейтральной горячей водой, этиловым спиртом и диэтиловым эфиром (по 20 мл каждый). Промытый осадок сушат при температуре 160 °С до неизменной массы. Долю пищевых волокон находят, как:

$$ПВ = \frac{a}{b} 100\%, \quad (1)$$

где a – масса полученной клетчатки, г; b – величина навески исследуемого вещества, г.

Составление и расчет рецептуры макаронного теста, с учетом массовой доли внесенного, в него, порошка из мякоти плодов хурмы, проводился в следующей последовательности: задавались влажностью теста с учетом вида замеса – среднего типа (W теста от 30 до 32 %) для коротких макаронных изделий, включая фигурные «Campanelle». По W теста и муки находят нужный для замеса объем водной среды G_B (л), как:

$$G_B = G_M \frac{W_T - W_M}{100 - W_T}, \quad (2)$$

где G_M – доза муки, кг; W_T, W_M – влажность для теста и муки, %.

Макаронные изделия получали путем экструзии макаронного теста через соответствующую матрицу посредством макаронного пресса «Imperia and monferrina» S.p. A, модель «Dolly».

Органолептические и физико-химические показатели готовых макаронных изделий как в сыром, так и в отварном виде определяли согласно требованиям государственного стандарта ГОСТ 31964–2012 «Изделия макаронные. Правила приемки и определения качества».

Результаты и обсуждение

Отметим, что на эффективность экстрагирования влияет состав гидромодуля [23, 24]. Воздействие температуры и ее рациональное значение выявили в ранее проведенной опытной серии теоретическим анализом. Выявление состава гидромодуля проводилось экспериментально, опираясь на максимально приемлемый удельный выход экстракционных компонентов.

В таблице 1 и в форме гистограммы (рисунок 2) показаны опытные данные по выявлению рационального состава гидромодуля для мякоти плодов хурмы сорта «Королек». Откуда вытекает, что 4-ый вариант является рациональным.

Таблица 1.

Опытные данные по выявлению рационального состава гидромодуля
для мякоти плодов хурмы сорта «Королек»

Table 1.

Experimental data on revealing of rational composition of hydromodule
for pulp of persimmon fruits of “Korolek” variety

Вариант Variant	Соотношение масс сырья и водной среды, г/г Ratio of masses of raw materials and aqueous medium, g/g	Масса экстракта, г Mass of extract, g	Масса сухого остатка, г Mass of dry residue, g	Доля сухого остатка в экстракте, % Proportion of dry residue in extract, %	Удельный выход, % Specific yield, %
1	10/20	12,5640	0,5920	4,710	9,420
2	10/30	12,0520	0,5470	4,540	13,620
3	10/40	12,7710	0,5580	4,370	17,480
4	10/50	12,6930	0,5290	4,170	20,850
5	10/60	12,4520	0,4330	3,480	20,890

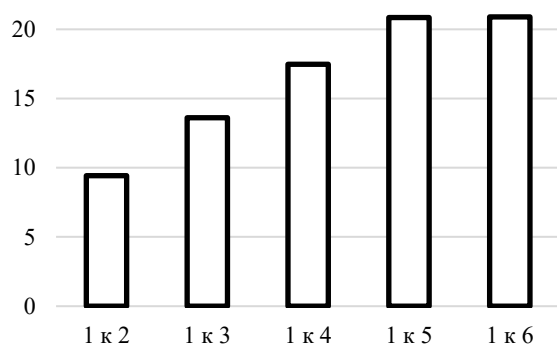


Рисунок 2. Гистограмма для выявления рационального состава гидромодуля для мякоти плодов хурмы сорта «Королек»

Figure 2. Histogram for identification of rational composition of hydromodule for pulp of persimmon fruits of “Korolek” variety

Для определения удельного выхода необходимо знать долю сухого остатка в сырьевом материале, которая приведена в таблице 2. В таблице 3 показаны данные по доле выделения водорастворимых компонентов.

Таблица 2.
Доля сухого остатка в МПХ «Королек»

Table 2.
Share of dry residue in Korolek MPA

1	2	3	4	5	Средняя величина Average
34,510	29,840	32,520	30,120	30,210	31,44

Таблица 3.
Доля выделения растворимых в воде
компонентов

Table 3.
Release fraction of water-soluble components

Доля сухого остатка в мякоти плодов хурмы, % Share of dry residue in persimmon fruit pulp, %	Доля извл. компонентов из мякоти плодов хурмы, % Share of extracted components from persimmon fruit pulp, %	Доля извлечения, % Share of extraction, %
31,440	20,850	66,320

Сравнительный анализ долей извлечения переносимых компонентов приводит к выводу о том, что при определенных T и составе гидромодуля выделяется до 66,32 % по отношению к массе сухого остатка в мякоти плодов хурмы, при этом, учитывая, что в экстракт переносятся сахара, кислоты органического типа и иные компоненты, а белковые, липидные и нерастворимые пектиновые и пигментные составляющие остаются в рафинате из мякоти плодов.

Контрольное экстрагирование проводилось дистиллированной водой, дробленной мякотью плодов хурмы «Королек», W которой составляет 62 %, при гидромодуле 1 к 5, $T = 98-100$ °C и перемешивании до доли сухого остатка в экстракте не ниже 4 % (таблица 1). На рисунке 3 представлены кривые экстракции, на основе полученных результатов экспериментального исследования экстрагирования дистиллированной водой дробленной мякоти хурмы сорта «Королек».



Рисунок 3. Результаты экспериментальных исследований процесса экстрагирования водорастворимых веществ из мякоти хурмы сорта «Королек»

Figure 3. Results of experimental studies of the process of extraction of water-soluble substances from persimmon pulp of “Korolek” variety

Анализ проведенных исследований, посвященных экстрагированию водорастворимых веществ из мякоти хурмы горячей водой (таблицы 1, 2 и 3; рисунки 2 и 3), показывает, что за рациональные режимы его проведения следует принять гидромодуль 1 к 5, а продолжительность

35 минут, соответственно при температуре экстракции близкой к кипению и постоянному механическому перемешиванию водно-фруктовой суспензии.

В ходе обработки мякоти плодов хурмы методом высокотемпературной экстракции [26] в рафинате из мякоти плодов хурмы остается большая доля пищевых волокон, однако для заданной степени набухания высушенного материала влагу из мякоти плодов хурмы надо отводить при $T < 50^\circ\text{C}$. Однако, для эффективного теплопереноса к высушиваемому материалу, T теплоносителя должна превышать T материала. Разница T между фазами обусловлена интенсивностью и направлением перемещения теплового агента. С учетом [27, 28, 29, 30] эта разница составляет 15–20 градусов в конце операции сушки. По этой причине T сушильного агента принимаем, равной 75°C .

Обезвоживание рафината мякоти плодов хурмы планируется проводить в аппарате барабанного типа с прямоточным перемещением фаз. На выходе из данных аппарата [31, 32] интенсивность перемещения теплового агента ограничивается вероятностью пылеуноса. Данный предел составляет 2,5 м/с. В результате варьируется лишь коэффициент заполнения барабана (КЗБ) (1/3; 1/2; 2/3). Рациональное отношение его протяженности принимаем 4, причем при изменении условий и производительности процесса можно использовать масштабный переход к иным габаритам.

Изучение обезвоживания рафината мякоти плодов хурмы осуществляли на опытном стенде (рисунок 4), который скомпонован из: 1 – рабочего отсека; 2 – радиационного бесконтактного пирометра; 3 – термодатчика; 4 – калориферной установки; 5 – подставки; 6 – образца анализа; 7 – анемометра.

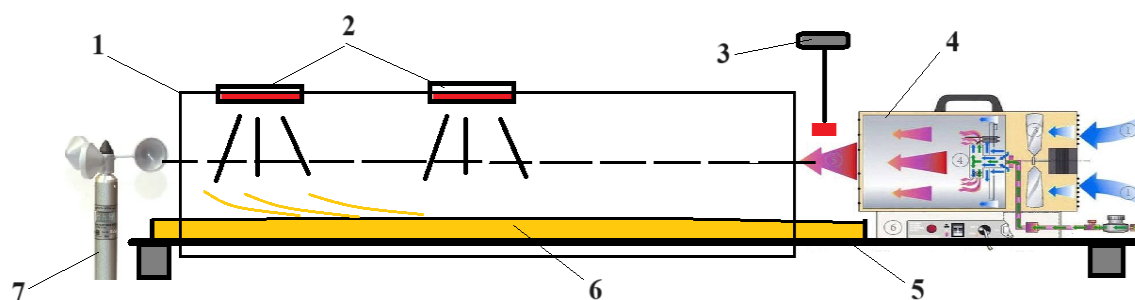


Рисунок 4. Опытный стенд для обезвоживания мякоти плодов хурмы

Figure 4. Experimental stand for dehydration of persimmon fruit pulp

Здесь T и влажность воздушной среды регистрируется посредством пирометра DT-9862. Интенсивность перемещения сушильного агента определяется с помощью анемометра Мегеон 11030,

который позволяет фиксировать не только ее средние величины, но и скачки. В таблице 4 показаны, как переменный, так фиксированные показатели, влияющие на процесс удаления влаги.

Таблица 4.

Показатели режима обезвоживания рафината из мякоти плодов хурмы при перемещении теплоносителя параллельно поверхности слоя продукта

Table 4.

Indicators of the mode of dehydration of persimmon fruit pulp raffinate when the coolant is moved parallel to the surface of the product layer

Исходная W рафината из мякоти плодов хурмы, % Initial W of raffinate from persimmon pulp, %	Коэффициент заполнения барабана Drum filling factor	T теплоносителя $^\circ\text{C}$ Heat carrier T $^\circ\text{C}$	Скорость сушильного агента, м/с Drying agent speed, m/s	Конечная W рафината из мякоти плодов хурмы, % Final W of raffinate from persimmon pulp, %
62	1/3; 1/2; 2/3	75°C	2,5 м/с	10

В результате проведенных экспериментальных исследований построены кривые конвективной сушки частичек рафината из мякоти плодов хурмы, которые представлены на рисунке 5.

$$Y = \frac{M}{\tau V}, \quad (3)$$

Анализ Y приводит к выводу, что рациональный коэффициент заполненности барабана равен 1/2. При этом продолжительность операции составила 95 минут до $W = 10\%$ и $Y = 208$ (кг/(м³·час)).

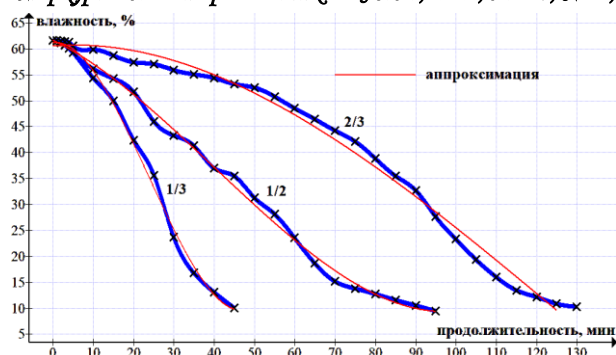


Рисунок 5. Кривые обезвоживания рафината из мякоти плодов хурмы при T теплового агента $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, его скорости $2,5\text{ м/с}$ и варьируемом коэффициенте заполненности барабана от $1/3$ до $2/3$

Figure 5. Dehydration curves of persimmon fruit pulp raffinate at a heat agent T of $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, its velocity of 2.5 м/с and varying drum filling ratio from $1/3$ to $2/3$

Одной из задач при изучении обезвоживания является выявление выхода высушенного материала Y , $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$, отнесенного к объему V зоны сушки и ее продолжительности τ :

Высушенные образцы рафината измельчали с помощью ножевой мельницы и полученный порошок с помощью сита с отверстием 210 мкм разделяли на две фракции. В итоге, были получены две фракции муки из хурмы: крупная (больше 210 мкм) и мелкая (меньше 210 мкм), в которых посредством экспериментального исследования были определены: общее содержание пищевых волокон, а также его распределение на растворимую нерастворимую части. Доступные углеводы рассчитывались по их разнице. Результаты этого этапа исследований представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Данные по пищевым волокнам в муке из плодов хурмы сорта «Королек»

Table 5.

Data on dietary fiber in flour from persimmon fruits of “Korolek” variety

Размер частиц, мкм Particle size, microns	Содержание пищевых волокон, г/100г Dietary fiber content, g/100g			Содержание углеводов, г/100г Carbohydrate content, g/100g
	общее total	растворимых soluble	нерастворимых insoluble	
> 210	43,15	32,19	10,96	41,73
< 210	40,22	31,67	8,55	44,00

Очевидно, что высокое содержание углеводов в исследуемой муке из плодов хурмы (значения находились в пределах $40\text{--}43\text{ г}/100\text{ г}$ соответственно), связано с их большим количеством в используемой мякоти. В отношении содержания общего количества пищевых волокон и нерастворимой части (таблица 5), аналогичные значения были сообщены в работах [33, 34] для подобных порошковых продуктов из плодов хурмы. Усредненное значение нерастворимых пищевых волокон превышает усредненное содержание растворимых пищевых волокон для всех видов муки на 65% , что не является особенным, т. к. об этом факте ранее сообщали другие авторы, в частности [33, 34]. Содержание нерастворимых пищевых волокон во всех видах муки практически не связано с размером частиц, при этом содержание пищевых волокон и растворимых пищевых волокон уже имеет выраженную взаимосвязь, чем больше размер частиц, тем выше содержание пищевых волокон. Таким образом важно подчеркнуть, что наименьшее содержание растворимых пищевых волокон было обнаружено для частиц наименьшего размера.

Компоновка рецептурного состава макаронных изделий из пшеничной крупки «Гремме 2У», принимая во внимание массовую долю введения порошкового премикса их рафината плодов хурмы осуществлялась пошагово с интервалом 5% , то есть контрольная проба и пробы с различной долей премикса (5 ; 10 ; 15 и 20%). В таблице 6 представлены данные, необходимые для расчета рецептуры по уравнению (2), в котором параметр W_M будет соответствовать не только влажности муки для контрольного образца, но и влажности смеси двух видов муки, пшеничной и муки из плодов хурмы.

Таблица 6.

Данные для расчета рецептуры макаронного теста

Table 6.

Data for pasta dough recipe calculation

Образец Sample	G_M , кг	W_T , %	W_M , %	G_B , л
1. контрольный control	1	30	12,0	0,26
2. добавка 5%			11,9	
3. добавка 10%			11,8	
4. добавка 15%			11,7	
5. добавка 20%			11,6	

Общеизвестно, что сырые макаронные изделия представляют собой хорошую среду для протекания различных микробиологических и биохимических процессов, поэтому одним из важнейших этапов в изготовлении макаронных изделий является их сушка. Для предотвращения этих процессов необходимо консервировать макаронные изделия путем их обезвоживания до конечной влажности не более 13 %. Правильность проведения процесса сушки оказывает большое влияние на ряд ключевых показателей качества готовой продукции, а именно – на прочность, кислотность и стекловидность излома [35, 36]. На рисунке 6 представлены фотографии макаронных изделий, полученных путем экструзии макаронного теста через соответствующую матрицу посредством макаронного пресса «Imperia and monferrina» S.p. A, модель «Dolly», на примере образца № 4 и высушенных при «мягком» режиме (таблица 7) [37].

Классический процесс сушки, используемый во многих современных технологиях, включает следующие стадии: предварительная сушка, отволаживание, окончательная сушка. Основные режимы сушки макаронных изделий представлены в таблице 7 [38]. Исследуемые образцы сушили при «мягком» режиме (таблица 7), используя сушильный шкаф.



Рисунок 6. Фотографии макаронных изделий образца № 4

Figure 6. Photographs of pasta sample No. 4

Основные режимы сушки макаронных полуфабрикатов [38]

Таблица 7.

Table 7.

Main modes of drying of pasta semi-finished products [38]

Режим сушки Drying parameters	Параметры сушки				Относительная влажность, % Relative humidity, %
	Т предварительной сушки, °C Pre-drying T, °C	Т окончательной сушки, °C Final drying T, °C	Продолжительность, ч Duration, h		
			сушки drying	стабилизации stabilize	
«мягкий» soft	50–56	38–56	24	–	68–74
«средний» medium	55–67	60–82	11	2–3	66–80
«жесткий» hard	свыше 95	85	4	3	85

С целью выявления органолептических показателей макаронных изделий была сформирована экспертная группа из 5-ти человек, которые проводили оценку формы, внешнего вида, вкуса и аромата по 5-бальной шкале: 5 баллов (высокое качество), 4 балла (хорошее качество), 3 балла (удовлетворительное качество) и 2 балла (неудовлетворительное качество) с учетом поправок на органолептические характеристики, соответствующие полученной муке из хурмы. На рисунке 7 представлены фотографии сырых и отварных макаронных изделий на примере образца № 4.

Экспертная субъективная оценка при корректной организации приближается к физико-химическим способам, а порой служит единственным подходом [39]. На рисунке 8 представлен результат проведенного органолептического анализа сырых и отварных макаронных изделий, который, для лучшей наглядности выполнен в виде профилограмм. Профильный метод сенсорного анализа дает возможность проводить более наглядное и детальное сравнение вырабатываемых обогащенных макаронных изделий с контрольным образцом.

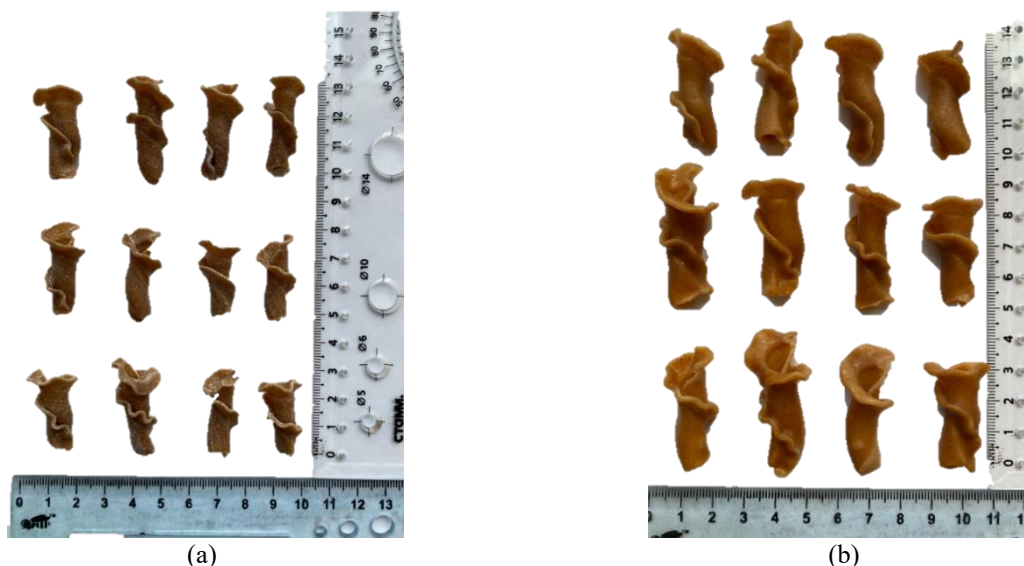


Рисунок 7. Фотографии макаронных изделий в сыром (а), а также и отварном (б) видах, на примере образца № 4
Figure 7. Photographs of pasta in raw (a) as well as boiled (b) forms, based on sample No. 4

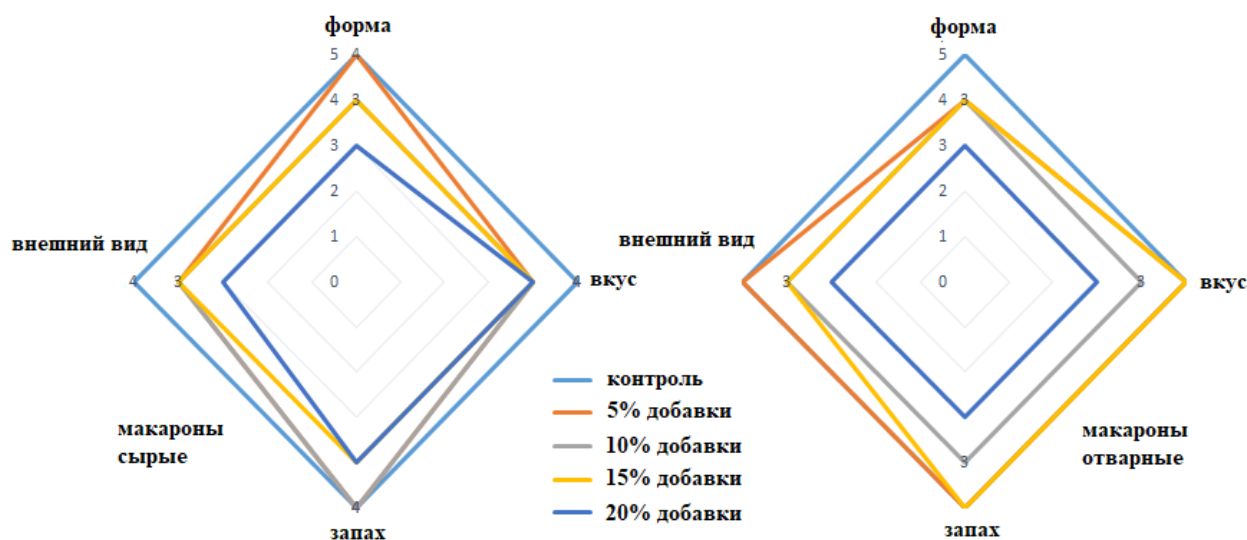


Рисунок 8. Результат органолептического анализа выработанных макаронных изделий
Figure 8. Result of organoleptic analysis of pasta products produced

Органолептический анализ выработанных макаронных изделий из сорта пшеницы «Греммэ 2У» с добавлением муки из плодов хурмы показал, что практически все образцы макаронных изделий, кроме 5-го (таблица 6), могут быть рекомендованы в промышленное производство, при этом количество добавки в интервале от 5% до 15% необходимо выбирать в зависимости от желаемого обогащения пищевыми волокнами (таблица 5). Уровень обогащения пищевыми волокнами (г/100г) макаронных изделий в зависимости от массовой доли добавки (κ , %) учитывая проведенные исследования может быть рассчитан из линейного соотношения (4), представленного ниже.

Известно, что норма потребления пищевых волокон для здорового человека составляет от 25 до 30 г в сутки [20].

$$ПВ = 9,95\kappa + 0,333. \quad (4)$$

Таким образом, проведенные исследования научно подтверждают, что муку из плодов хурмы вполне можно использовать в макаронной промышленности для выработки цельнозерновых обогащенных макаронных изделий, которые не только позволяют расширить ассортимент выпускаемой продукции, но и благотворно повлиять на здоровье человека.

Закключение

В работе показана целесообразность использования фруктового вторичного сырья, на примере хурмы сорта «Королек», подвергнутое переработке в сфере производства безалкогольных напитков, а именно водных экстрактов или переспевшее, т. е. подлежащее к розничной продаже. В итоге, побочные продукты агропромышленного производства становятся ценными ресурсами, которые могут стать функциональными ингредиентами для выработки цельнозерновых макаронных изделий, причем основным сырьевым

материалом для макаронного теста целесообразно применить сорт пшеницу «Гремме 2У», относящейся к полбе, так как у данного вида зерна полбы наблюдается голозерность, что обуславливает выработку макаронных изделий без замачивания, то есть заметно уменьшить подготовку зерна для набухания и размягчения его оболочек, что необходимо для сохранения массы и качественных показателей клейковины, как структурообразователя при выработке готовых макаронных изделий.

Литература

- Осипова Г.А., Хмелева Е.В. Использование зерна полбы сорта Гремме в макаронном производстве // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 1. С. 190–199.
- Хмелева Е.В., Осипова Г.А. Использование полбяной муки в хлебопекарном и макаронном производствах // Продукты питания. Новые технологии. 2022. С. 4–24.
- Кандроков Р.Х., Белявская И.Г., Святославов И.М. Технология получения макаронной муки или крупы типа «манная» из зерна полбы // Главный редактор. 2023. С. 226.
- Chettrariu A., Dabija A. Quality characteristics of spelt pasta enriched with spent grain // *Agronomy*. 2021. V. 11. № 9. P. 1824. doi: 10.3390/agronomy11091824
- Мирошина Т.А., Резниченко И.Ю. Утилизация продуктов питания и побочных продуктов сельского хозяйства // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств. С. 226.
- Raŭ R.N., Bosancu B., Mironeasa S. et al. Application of agri-food by-products in the food industry // *Agriculture*. 2023. V. 13. № 8. P. 1559. doi: 10.3390/agriculture13081559
- Фокина Е. Субтропический фрукт хурма – источник антиоксидантов // Биобезопасность и Биотехнология. 2023. Т. 12. № 1. С. 6–23.
- Макаров А.Е., Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И.Ю. и др. Кинетические закономерности обезвоживания экстрагированного рафината мякоти хурмы // Современная наука и инновации. 2025. № 4. С. 98–111.
- Макаров А.Е., Нугманов А.Х.-Х., Алексанян И.Ю. и др. Исследование кинетики экстракции водорастворимых веществ из мякоти хурмы // Индустрия питания. 2024. Т. 9. № 3. С. 56–68.
- Matheus J.R.V., Andrade C.J., Fai A.E.C. et al. Persimmon (*Diospyros kaki* L.): Chemical properties, bioactive compounds and potential use in the development of new products – A review // *Food Reviews International*. 2022. V. 38. № 4. P. 384–401. doi: 10.1080/87559129.2020.1733599
- Tardugno R., Savini S., Kocsis L. et al. Nutritional and mineral composition of persimmon fruits (*Diospyros kaki* L.) from Central and Southern Italy // *Natural Product Research*. 2022. V. 36. № 20. P. 5168–5173. doi: 10.1080/14786419.2021.1919106
- Шефер В.Э. Хурма: состав, полезные свойства, правила выбора // Конкурентоспособность территорий. 2021. С. 123–125.
- Сорокопудов В.Н., Долгих Е.М., Хромов Н.В. и др. Совершенствование сортимента нетрадиционных садовых культур России // Фундаментальные исследования. 2013. № 11-1. С. 115–121.
- Агирбов Ю.И., Крицкая С.С., Симонова Ж.С. и др. Россия и другие страны на мировом рынке плодово-ягодной продукции // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2021. № 6. С. 129–147.
- Курцева В.Г., Колесниченко М.Н. Макароны изделия с добавлением растительного сырья алтайского края // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: материалы. 2022. С. 114.
- Макаров А.Е. Физико-химические свойства спагетти с использованием муки хурмы как натурального концентрированного экстракта // Научный редактор. 2024. С. 17.
- Цыганова Т.Б., Классина С.Я. Системный подход к разработке функциональных хлебобулочных, кондитерских и макаронных изделий // Пищевые ингредиенты и биологически активные добавки в технологиях продуктов питания и парфюмерно-косметических средств. 2019. С. 66–73.
- Фазулина О.Ф., Смирнов С.О. Макароны изделия повышенной пищевой ценности с использованием полбы // Ползуновский вестник. 2019. № 3. С. 13–18.
- Казеннова Н.К., Шнейдер Д.В., Цыганова Т.Б. Формирование качества макаронных изделий. М.: ДеЛи принт, 2009. 100 с.
- Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: Методические рекомендации МР 2.3.1.2432-08. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2008. 41 с.
- Доровских Г.Н. Количество, вес и размеры семян у хурмы сорта «КОРОЛЕК» // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 2: Биология. Геология. Химия. Экология. 2023. № 1 (25). С. 31–50.
- Акаба А.Н., Щербак Е.В. Полезные свойства плодов хурмы // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции. 2019. С. 616–619.

- 23 Евсеева С.С. Разработка способа получения экстракта из тутовых плодов и совершенствование процесса его сушки: дис. ... канд. техн. наук. 2022. 203 с.
- 24 Андреева Е.В. Научное обоснование процессов комплексной сушильно-экстракционной обработки баклажанной кожуры: дис. ... канд. техн. наук. 2022. 211 с.
- 25 Трухачев В.И., Злыднев Н.З., Ткаченко М.А. и др. Методы химического анализа сырья и продуктов переработки. Ставрополь: АГРУС, 2006. 104 с.
- 26 Akter M.S., Ahmed M., Eun J.B. Effect of blanching and drying temperatures on the physicochemical characteristics, dietary fiber composition and antioxidant-related parameters of dried persimmons peel powder // International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2010. V. 61. № 7. P. 702–712. doi: 10.3109/09637481003769287
- 27 Филоненко Г.К., Гришин М.А., Гольденберг Я.М., Коссек В.К. Сушка пищевых растительных материалов. М.: Пищевая промышленность, 1971. 440 с.
- 28 Алексанян И.Ю., Буйнов А.А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование: монография. Астрахань: АГТУ, 2004. 380 с.
- 29 Lee J.H., Son H.S., Park Y.K. et al. Comparative studies of antioxidant activities and nutritional constituents of persimmon juice (*Diospyros kaki* L. cv. Gapjubaekmok) // Preventive Nutrition and Food Science. 2012. V. 17. № 2. P. 141–151. doi: 10.3746/pnf.2012.17.2.141
- 30 Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1975. 527 с.
- 31 Тожиев Р.Ж., Абдуллаев Ш.Х., Хамраев Ж.Ж. и др. Оптимизация конструкции сушильного барабана на основе системного анализа процесса // Universum: технические науки. 2020. № 11-1 (80). С. 59–65.
- 32 Байтурсев А.М., Ким В.Д., Абдуллаев А.А. и др. Оптимизационная задача определения конструктивных параметров сушильного барабана со смешанным режимом термообработки // Механика и технологии. 2019. № 4. С. 50–58.
- 33 Lucas-González R., Viuda-Martos M., Pérez-Alvarez J.A. et al. Evaluation of particle size influence on proximate composition, physicochemical, techno-functional and physio-functional properties of flours obtained from persimmon (*Diospyros kaki* Trumb.) coproducts // Plant Foods for Human Nutrition. 2017. V. 72. P. 67–73. doi: 10.1007/s11130-016-0589-7
- 34 Lee S.O., Chung S.K., Lee I.S. The antidiabetic effect of dietary persimmon (*Diospyros kaki* L. cv. Sangjudungsi) peel in streptozotocin-induced diabetic rats // Journal of Food Science. 2006. V. 71. № 3. P. S293–S298. doi: 10.1111/j.1365-2621.2006.tb15641.x
- 35 Рахимов Р.Х., Ибрагимов Х.Х., Ходжиев А.А. и др. Конвейерная сушка макаронных изделий // Пищевая промышленность. 2007. № 8. С. 18–19.
- 36 Зудин Е.С., Попов В.М., Афонькина В.А. Инфракрасная сушка макаронных изделий с применением транспортерно-каскадной сушилки СТКИ 7 // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. 2018. С. 95–98.
- 37 Попов В.П., Грузинцева В.А. Проектирование технологического процесса сушки макаронных изделий: монография. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. 141 с.
- 38 Романчиков С.А. Устройство для ускоренной ультразвуковой сушки макаронных изделий в поле инфракрасного излучения // Ползуновский вестник. 2018. № 1. С. 70–76.
- 39 Мардар М.Р., Давыдова Е.А., Лилишенцева А.Н. Deskriptorные методы органолептического анализа в оценке качества сыра // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2021. Т. 13. № 4. С. 6–14.

References

- 1 Osipova G.A., Khmeleva E.V. The use of Gremme spelt grain in pasta production. Storage and processing of agricultural raw materials. 2023. no. 1. pp. 190–199. (in Russian)
- 2 Khmeleva E.V., Osipova G.A. The use of spelt flour in bakery and pasta production. Food products. New technologies. 2022. pp. 4–24. (in Russian)
- 3 Kandrov R.Kh., Belyavskaya I.G., Svyatoslavova I.M. Technology for producing pasta flour or semolina from spelt grain. Editor-in-chief. 2023. p. 226. (in Russian)
- 4 Chetariu A., Dabija A. Quality characteristics of spelt pasta enriched with spent grain. Agronomy. 2021. vol. 11. no. 9. p. 1824. doi: 10.3390/agronomy11091824
- 5 Miroshina T.A., Reznichenko I.Yu. Utilization of food and agricultural by-products. Modern problems of technology and technology of food production. p. 226. (in Russian)
- 6 Rau R.N. et al. Application of agri-food by-products in the food industry. Agriculture. 2023. vol. 13. no. 8. p. 1559. doi: 10.3390/agriculture13081559
- 7 Fokina E. Subtropical persimmon fruit is a source of antioxidants. Biosafety and Biotechnology. 2023. vol. 1. no. 12. pp. 6–23. (in Russian)
- 8 Makarov A.E., Nugmanov A.H.-H., Aleksanyan I.Yu. et al. Kinetic patterns of dehydration, extracted raffinate of persimmon pulp. Modern science and innovations. 2025. no. 4. pp. 98–111. (in Russian)
- 9 Makarov A.E., Nugmanov A.H.-H., Aleksanyan I.Yu. et al. Investigation of the kinetics of extraction of water-soluble substances from persimmon pulp. Food Industry. 2024. vol. 9. no. 3. pp. 56–68. (in Russian)
- 10 Matheus J.R.V. et al. Persimmon (*Diospyros kaki* L.): Chemical properties, bioactive compounds and potential use in the development of new products – A review. Food Reviews International. 2022. vol. 38. no. 4. pp. 384–401. doi: 10.1080/87559129.2020.1858313
- 11 Tardugno R. et al. Nutritional and mineral composition of persimmon fruits (*Diospyros kaki* L.) from Central and Southern Italy. Natural Product Research. 2022. vol. 36. no. 20. pp. 5168–5173. doi: 10.1080/14786419.2021.1919106

- 12 Schafer V.E. Persimmon: composition, useful properties, rules of choice. Competitiveness of territories. 2021. pp. 123–125. (in Russian)
- 13 Sorokopudov V.N. et al. Improving the assortment of non-traditional garden crops in Russia. Fundamental research. 2013. no. 11-1. pp. 115–121. (in Russian)
- 14 Agirbov Yu.I. et al. Russia and other countries on the world market of fruit and berry products. Proceedings of the Timiryazev Agricultural Academy. 2021. no. 6. pp. 129–147. (in Russian)
- 15 Kurtseva V.G., Kolesnichenko M.N. Pasta with the addition of vegetable raw materials of the Altai territory. Modern problems of technology and technology of food production: materials. 2022. p. 114. (in Russian)
- 16 Makarov A.E. Physico-chemical properties of spaghetti using persimmon flour as a natural concentrated extract. Scientific editor. 2024. p. 17. (in Russian)
- 17 Tsyganova T.B., Klassina S.Ya. A systematic approach to the development of functional bakery, confectionery and pasta products. Food ingredients and biologically active additives in food and perfumery and cosmetics technologies. 2019. pp. 66–73. (in Russian)
- 18 Fazullina O.F., Smirnov S.O. Macaroni products of high nutritional value with spelt. Polzunovsky Herald. 2019. no. 3. pp. 13–18. (in Russian)
- 19 Kazennova N.K., Schneider D.V., Tsyganova T.B. Shaping the quality of the pasta. Moscow: Deli Print Publ., 2009. 100 p. (in Russian)
- 20 Norms of physiological energy and nutritional requirements for various groups of the population of the Russian Federation: Methodological recommendations MP 2.3.1.2432 – 08, approved by the Government of the Russian Federation. By Rospotrebnadzor on 12/18/2008: effective from 12/18/2008. Moscow; Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of the Russian Federation. 2008. 41 p. (in Russian)
- 21 Dorovskikh G.N. The number, weight and size of seeds of the persimmon variety "KOROLEK". Bulletin of Syktyvkar University. Series 2. Biology. Geology. Chemistry. Ecology. 2023. no. 1 (25). pp. 31–50. (in Russian)
- 22 Akaba A.N., Shcherbakova E.V. Useful properties of persimmon fruits. Modern aspects of production and processing of agricultural products. 2019. pp. 616–619. (in Russian)
- 23 Evseeva S.S. Development of a method for obtaining extract from mulberry fruits and improving its drying process: specialty 05.18.12 "Processes and devices of food production": dissertation on application for the degree of Candidate of Technical Sciences. 2022. 203 p. (in Russian)
- 24 Andreeva E.V. Scientific substantiation of the processes of complex drying and extraction of eggplant peel: specialty 05.18.12 "Processes and devices of food production": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 2022. 211 p. (in Russian)
- 25 Trukhachev V.I., Zlydnev N.Z., Tkachenko M.A. et al. Methods of chemical analysis of raw materials and processed products. Stavropol: AGRUS Publishing House, 2006. 104 p. (in Russian)
- 26 Akter M.S., Ahmed M., Eun J.B. Effect of blanching and drying temperatures on the physicochemical characteristics, dietary fiber composition and antioxidant-related parameters of dried persimmons peel powder. International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2010. vol. 61. no. 7. pp. 702–712. doi: 10.3109/09637481003763230
- 27 Filonenko G.K., Grishin M.A., Goldenberg Ya.M., Kossek V.K. Drying of food plant materials. Moscow: Food industry Publ., 1971. 440 p. (in Russian)
- 28 Aleksanyan I.Y., Buinov A.A. High-intensity drying of food products. Foam dryer. Theory. Practice. Modeling: a monograph. Astrakhan: AGTU, 2004. 380 p. (in Russian)
- 29 Lee J.H. et al. Comparative studies of antioxidant activities and nutritional constituents of persimmon juice (*Diospyros kaki* L. cv. Gapjubaekmok). Preventive Nutrition and Food Science. 2012. vol. 17. no. 2. p. 141. doi: 10.3746/pnf.2012.17.2.141
- 30 Ginzburg A.S. Fundamentals of theory and technology of food drying. Moscow: Food Industry Publ., 1975. 527 p. (in Russian)
- 31 Tozhiev R.J. et al. Optimization of the drying drum design based on a system analysis of the process. Universum: technical sciences. 2020. no. 11-1 (80). pp. 59–65. (in Russian)
- 32 Baitureev A.M. et al. The optimization problem of determining the design parameters of a drying drum with a mixed heat treatment mode. Mechanics and technology. 2019. no. 4. pp. 50–58. (in Russian)
- 33 Lucas-González R. et al. Evaluation of particle size influence on approximate composition, physicochemical, techno-functional and physio-functional properties of flowers obtained from persimmon (*Diospyros kaki* Trumb.) coproducts. Plant Foods for Human Nutrition. 2017. vol. 72. pp. 67–73. doi: 10.1007/s11130-016-0592-z
- 34 Lee S.O., Chung S.K., Lee I.S. The antidiabetic effect of dietary persimmon (*Diospyros kaki* L. cv. Sangjudungsi) peel in streptozotocin-induced diabetic rats. Journal of food science. 2006. vol. 71. no. 3. pp. 293–298. doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00017.x
- 35 Rakhimov R.H. et al. Conveyor drying of pasta. Food industry. 2007. no. 8. pp. 18–19. (in Russian)
- 36 Zudin E.S., Popov V.M., Afonkina V.A. Infrared drying of pasta using a conveyor cascade dryer STKI 7. Science and education: experience, problems, development prospects. 2018. pp. 95–98. (in Russian)
- 37 Popov V.P., Gruzintseva V.A. Designing the technological process of drying pasta: a monograph. Orenburg: IPK GO OSU, 2008. 141 p. (in Russian)
- 38 Romanchikov S.A. Device for accelerated ultrasonic drying of pasta in the field of infrared radiation. Polzunovsky bulletin. 2018. no. 1. pp. 70–76. (in Russian)
- 39 Mardar M.R., Davydova E.A., Lilishentseva A.N. Descriptive methods of organoleptic analysis in assessing the quality of cheese. Food industry: science and technology. 2021. vol. 13. no. 4. pp. 6–14. (in Russian)

Сведения об авторах

Николай В. Меркурьев аспирант, кафедра технологии хранения и переработки плодовоощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, merkurevzoom@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2983-9224>

Артём Е. Макаров технолог, продукция общественного питания, ООО «ПАСТАПИЦЦА», ул. Тургенева, 10/14, литера АА2, помещение 3, г. Астрахань, 414000, Россия, artem.makarov.2011@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6787-7697>

Альберт Х.-Х. Нугманов д.т.н., профессор, кафедра технологии хранения и переработки плодовоощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, nugmanov@rgau-msha.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

Игорь Ю. Алексанян д.т.н., профессор, кафедра технологических машин, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, 16081960igor@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

Павел Д. Осмоловский к.с.-х.н., доцент, кафедра технологии хранения и переработки плодовоощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, pavel.osmolovsku@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1131-1552>

Ксения А. Бородулина студент, кафедра технологии хранения и переработки плодовоощной и растениеводческой продукции, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, borodulina.ksyacha@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0003-9395-0936>

Вклад авторов

Николай В. Меркурьев проведение экспериментальных исследований и обработка полученных данных

Артём Е. Макаров выбор и подготовка растительного сырья для экспериментальных исследований

Альберт Х.-Х. Нугманов статистическая обработка результатов исследования и их оценка

Игорь Ю. Алексанян общее руководство исследовательской работы

Павел Д. Осмоловский проверка полученных экспериментальных исследований и подготовка рукописи к публикации

Ксения А. Бородулина систематизация информации, полученной при анализе литературных источников

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Nikolay V. Merkuryev postgraduate student, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, merkurevzoom@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2983-9224>

Artyom E. Makarov technologist, catering products, LLC «PASTAPIZZA», Turgenev St., 10/14, letter AA2, room 3, Astrakhan, 414000, Russia, artem.makarov.2011@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6787-7697>

Albert H.-H. Nugmanov Dr. Sci. (Engin.), professor, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, nugmanov@rgau-msha.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

Igor Y. Aleksanyan Dr. Sci. (Engin.), professor, department of technological machine, Astrakhan State Technical University, Tatishcheva str., 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, 16081960igor@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

Pavel D. Osmolovskiy Cand. Sci. (Agric.), associate professor, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, pavel.osmolovsku@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1131-1552>

Ksenia A. Borodulina student, department of technology of storage and processing of fruit and vegetable and crop products, Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russia, borodulina.ksyacha@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0003-9395-0936>

Contribution

Nikolay V. Merkuryev conducting experimental studies and processing the data obtained

Artyom E. Makarov selection and preparation of plant raw materials for experimental research

Albert H.-H. Nugmanov statistical processing of research results and their evaluation

Igor Y. Aleksanyan general guidance of the research work

Pavel D. Osmolovskiy verification of the experimental studies obtained and preparation of the manuscript for publication

Ksenia A. Borodulina Systematization of information obtained by analyzing literary sources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/04/2025	После редакции 18/05/2025	Принята в печать 20/05/2025
Received 21/04/2025	Accepted in revised 18/05/2025	Accepted 20/05/2025

Влияние пробиотической бактерии *Bacillus subtilis* на поведенческие характеристики мышей и биохимические показатели сыворотки крови при индуцированном системном воспалении

Светлана В. Погорелова	¹ ,	zubkova.sweta@gmail.com	 0009-0002-7924-8027
Егор А. Чиркин	¹	chirkin@bio.vsu.ru	 0009-0000-0021-6408
Полина Д. Морозова	¹	ms.cloud00.00@mail.ru	 0009-0000-0075-9170
Михаил Ю. Сыромятников	^{1,2}	syromyatnikov@bio.vsu.ru	 0000-0001-9028-0613
Ольга В. Зверева	¹	bond.vrn15@ya.ru	 0000-0002-7051-9858
Анна А. Толкачева	¹	anna-biotech@ya.ru	 0000-0003-0725-6482

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

² Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, г. Воронеж, 394018, Россия

Аннотация. Настоящее исследование было направлено на комплексную оценку влияния пробиотического штамма *Bacillus subtilis* на поведенческие реакции и биохимические параметры сыворотки крови мышей в условиях липополисахарид-индуцированного системного воспаления. Экспериментальная модель на животных линии C57BL/6 продемонстрировала выраженное модулирующее действие пробиотика на ключевые аспекты поведения. Введение *B. subtilis* привело к значительному снижению частоты актов груминга, что интерпретируется как снижение тревожности и проявление анксиолитического эффекта. Одновременно наблюдалось увеличение исследовательской активности, проявляющееся в росте количества заглядываний в норки и вертикальных стоек в тесте «Открытое поле», что свидетельствует о потенциальном позитивном влиянии на когнитивные функции. Напротив, индуцированное ЛПС воспаление вызывало подавление exploratory-активности и снижение дефекации, что отражает негативное воздействие на кишечную перистальтику и общее стрессовое состояние животных. Биохимический анализ выявил двойственность эффектов *B. subtilis*: на фоне поведенческого улучшения было зафиксировано статистически значимое повышение уровня мочевины в сыворотке крови, что может быть косвенно связано с перестройкой микробиома и метаболическими сдвигами. Параллельно в группе ЛПС было обнаружено снижение концентрации холестерина, вероятно, обусловленное активацией макрофагов и нарушением его синтеза. Полученные данные подчеркивают комплексный характер взаимодействия пробиотика с физиологией хозяина, указывая на необходимость дальнейшего изучения механизмов влияния *B. subtilis* на ось «кишечник–мозг» и метаболизм в условиях воспаления для разработки эффективных стратегий коррекции LPS-индуцированных нарушений.

Ключевые слова: мыши, липополисахарид, *Bacillus subtilis*, тест «Открытое поле», поведенческая активность, биохимический анализ крови.

Effect of *Bacillus subtilis* probiotic bacteria on behavioral characteristics of mice and serum biochemical parameters during induced systemic inflammation

Svetlana V. Pogorelova	¹ ,	zubkova.sweta@gmail.com	 0009-0002-7924-8027
Egor A. Chirkin	¹	chirkin@bio.vsu.ru	 0009-0000-0021-6408
Polina D. Morozova	¹	ms.cloud00.00@mail.ru	 0009-0000-0075-9170
Mikhail Yu. Syromyatnikov	^{1,2}	syromyatnikov@bio.vsu.ru	 0000-0001-9028-0613
Olga V. Zvereva	¹	bond.vrn15@ya.ru	 0000-0002-7051-9858
Anna A. Tolkacheva	¹	anna-biotech@ya.ru	 0000-0003-0725-6482

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

² Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, Voronezh, 394018, Russia

Для цитирования

Погорелова С.В., Чиркин Е.А., Морозова П.Д., Сыромятников М.Ю., Зверева О.В., Толкачева А.А. Влияние пробиотической бактерии *Bacillus subtilis* на поведенческие характеристики мышей и биохимические показатели сыворотки крови при индуцированном системном воспалении // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 64–69. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-64-69

For citation

Pogorelova S.V., Chirkin E.A., Morozova P.D., Syromyatnikov M.Yu., Zvereva O.V., Tolkacheva A.A. Effect of *Bacillus subtilis* probiotic bacteria on behavioral characteristics of mice and serum biochemical parameters during induced systemic inflammation. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 64–69. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-64-69

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

Abstract. This study aimed to comprehensively evaluate the influence of the probiotic strain *Bacillus subtilis* on behavioral responses and serum biochemical parameters in mice under conditions of lipopolysaccharide (LPS)-induced systemic inflammation. The experimental model using C57BL/6 mice demonstrated the probiotic's pronounced modulating effect on key behavioral aspects. The administration of *B. subtilis* significantly reduced the frequency of grooming acts, which is interpreted as a reduction in anxiety and a manifestation of an anxiolytic effect. Simultaneously, an increase in exploratory activity was observed, manifested by a rise in the number of hole pokes and vertical rearings in the Open Field test, indicating a potential positive impact on cognitive functions. In contrast, LPS-induced inflammation caused suppression of exploratory activity and a decrease in defecation, reflecting a negative impact on intestinal peristalsis and the general stress state of the animals. Biochemical analysis revealed a duality of *B. subtilis* effects: alongside behavioral improvement, a statistically significant increase in serum urea levels was recorded, which may be indirectly related to microbiome restructuring and metabolic shifts. Concurrently, a decrease in cholesterol concentration was detected in the LPS group, likely due to macrophage activation and disruption of its synthesis. The obtained data emphasize the complex nature of the interaction between the probiotic and host physiology, indicating the need for further study of the mechanisms of *B. subtilis* influence on the gut-brain axis and metabolism under inflammatory conditions to develop effective strategies for correcting LPS-induced disorders.

Keywords: mice, lipopolysaccharide, *Bacillus subtilis*, open field test, behavioral activity, blood biochemistry.

Введение

В последние годы пробиотики активно исследуются как перспективные средства для модуляции иммунного ответа и снижения воспалительных реакций [1]. Среди них особый интерес представляют грамположительные бактерии *Bacillus subtilis*, демонстрирующие иммунорегуляторные свойства [2]. Их применение на фоне ЛПС – индуцированного воспаления представляет значительный интерес, поскольку липополисахарид (ЛПС) является ключевым патоген-ассоциированным молекулярным паттерном (РАМР), запускающим каскад провоспалительных реакций через активацию Toll-подобных рецепторов (TRL4) [3].

Мыши (*Mus musculus*) являются моделью для воспалительных процессов, благодаря высокой степени схожести иммунных механизмов с человеческими [4].

Bacillus subtilis – спорообразующая бактерия, обладающая высокой устойчивостью к агрессивным условиям желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), а также рядом пробиотических эффектов, включающих укрепление кишечного барьера, антимикробную активность, а также модуляцию иммунного ответа [5].

Липополисахарид (ЛПС) – основной компонент наружной мембраны грамотрицательных бактерий, который при системном введении вызывает мощный иммунный ответ, имитирующий хроническое воспаление [6]. У мышей ЛПС активирует TLR-4-зависимые сигнальные пути, приводя к выбросу провоспалительных цитокинов (IL-6, TNF-α) и инфильтрации иммунных клеток в ткани [7].

В данной работе оценивалось влияние *Bacillus subtilis* на динамику ЛПС-индуцированного воспаления у мышей, основываясь на данных биохимического анализа крови.

Материалы и методы

Эксперимент проводился в течение 3 недель. Модельным объектом были выбраны самцы *Mus musculus* линии C57BL/6 из питомника «Андреевка» (Московская обл. Россия). Животные содержались в стандартных условиях согласно ГОСТ 33215–2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур» и получали порцию корма из расчета 5 г/мышь/день.

При постановке эксперимента мыши были разделены на 4 группы:

1. «Контроль» – группа (n = 10), которая получала стандартную лабораторную диету и внутрибрюшинные инъекции 0,9 % раствора NaCl.
2. «ЛПС – группа» (n = 10), получавшая стандартную лабораторную диету и инъекции ЛПС.
3. «*B. subtilis*» – группа (n = 5), которая принимала пробиотик на основе *B. subtilis* (10⁹ КОЕ/грамм корма), вместе со стандартным рационом, и внутрибрюшинные инъекции 0,9 % раствора NaCl.
4. «ЛПС + *B. subtilis*» – группа (n = 10), которая подверглась воздействию пробиотика на основе *B. subtilis* (10⁹ КОЕ/грамм корма), смешанного со стандартным рационом, и инъекциям ЛПС.

В качестве ЛПС был выбран препарат «Пирогенал» (ФГБУ «НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи», Россия) в концентрации 100 мкг/мл. Внутрибрюшинные инъекции объемом 200 мкл проводили ежедневно в течение последней недели эксперимента. Раствор для введения разводили 1:1 ЛПС с раствором 0,9 % NaCl [8].

Физиологический тест «Открытое поле» проводился перед началом эксперимента и в конце каждой недели. Установка для теста представляла собой квадратный короб 40 x 40, ограниченный непрозрачными бортами высотой 20 см. На дне было 5 случайно расположенных отверстий, моделирующих норки.

Время проведения теста 5 минут, в течение которых регистрировались следующие показатели: горизонтальная активность, вертикальная активность, норковый рефлекс. Также детектировалась вегетативная деятельность: дефекация, количество и продолжительность актов груминга.

Забор крови осуществлялся путем декапитации мышей, предварительно наркотизированных хлороформом, в пластиковые пробирки. Полученную кровь отстаивали 1 ч, затем надосадочную жидкость центрифугировали при 3500g 10 минут. Получившуюся сыворотку анализировали на автоматическом анализаторе «ВитаЛайн 200» (Vitaline 200, Россия).

Статистические манипуляции выполнялись в среде R (Version 4.1.1). Полученные данные в ходе анализа проверялись на нормальность распределения тестом Шапиро-Уилка. Однофакторный дисперсионный тест (ANOVA) и пост-хок тест Тьюки использовались для анализа нормально распределенных данных. Скорректированное р-значение $\leq 0,05$ считалось статистически значимым результатом. Результаты представлены как средние значения $\pm$ стандартное отклонение (SD).

Результаты

В ходе исследования были изучены поведенческие и физиологические показатели экспериментальных животных с помощью теста Открытого поля и проведен анализ результатов (рисунок 1, 2).

В экспериментальной группе «*B. subtilis*» наблюдалось уменьшение актов груминга в 2,1 раза относительно контрольной группы ($3,4 \pm 0,17$ против $1,6 \pm 0,18$, $p = 0,048$). В то же время, у животных, получавших только *B. subtilis*, было детектировано увеличение норкового рефлекса в 1,8 раз в сопоставлении с контролем ($5,2 \pm 0,3$ против $2,9 \pm 0,14$, $p = 0,01$) (рисунок 1).

Также было выявлено статистически значимое снижение актов дефекации в 6 раз у представителей группы, подвергнувшимся исключительно инъекциям ЛПС, в сравнении с группой «Контроль» ($0,4 \pm 0,07$ против $2,4 \pm 0,14$, $p = 0,0009$) (рисунок 1).

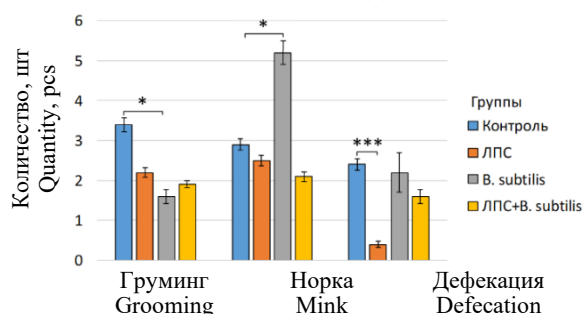


Рисунок 1. Количественные показатели физиологического теста «Открытое поле», * $p \leq 0,05$, *** $p \leq 0,001$

Figure 1. Quantitative indicators of the physiological test "Open field", * $p \leq 0,05$, *** $p \leq 0,001$

В группе животных, получавших только ЛПС, наблюдалось снижение в 1,7 раз вертикальной активности относительно контрольной группы ($8 \pm 0,45$ против $13,8 \pm 0,52$, $p = 0,02$). Напротив, в связи с приемом пробиотика на основе *B. subtilis* выявлено увеличение в 1,5 раза исследовательского рефлекса, выраженного вертикальными стойками, в сравнении с группой «Контроль» ($20,8 \pm 1,3$ против $13,8 \pm 0,52$, $p = 0,04$) (рисунок 2).

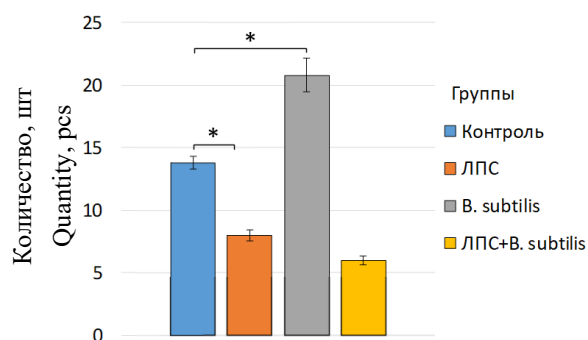


Рисунок 2. Количество вертикальных стоек, зафиксированных во время проведения физиологического теста «Открытое поле», * $p \leq 0,05$

Figure 2. Number of vertical rears recorded during the Open Field physiological test, * $p \leq 0,05$

Также был проведен анализ данных биохимических показателей сыворотки крови. Выявлено статистически достоверное снижение содержания холестерина в группе «ЛПС» относительно группы «Контроль» ($8,43 \pm 0,44$ против $6,20 \pm 0,23$, $p = 0,0001$). На ряду с этим наблюдалось и увеличение содержания мочевины у группы «*B. subtilis*» относительно контрольной группы ($8,16 \pm 1,00$ против $12,95 \pm 0,77$, $p = 0,02$) (рисунок 3).

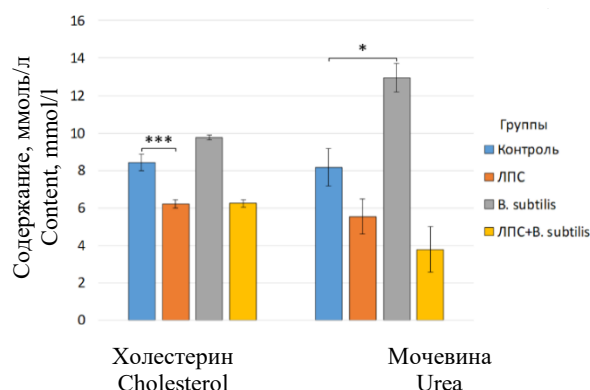


Рисунок 3. Различия в биохимическом составе крови между исследуемыми группами, * $p \leq 0,05$, *** $p \leq 0,001$

Figure 3. Differences in blood biochemistry between study groups, * $p \leq 0,05$, *** $p \leq 0,001$

Обсуждение

Анализ исследовательской активности в тесте «Открытое поле» показал достоверное увеличение количества заглядываний в норки. Это является важным поведенческим маркером когнитивной активности [9], что может свидетельствовать о способности *B. subtilis* увеличивать исследовательскую активность мышей [10].

Изменение актов дефекаций говорит о негативном воздействии липополисахарида на перистальтику кишечника и может свидетельствовать о проявлении стресса у животных [11].

Исследование частоты вертикальной активности разных групп позволяет сделать предположение, что липополисахарид негативно воздействует на исследовательскую активность, а *B. subtilis* наоборот ее повышает, такой эффект ЛПС сходен с воздействием антибиотика [12].

Известно, что чрезмерный груминг у грызунов является стрессовым маркером [13], в то время как в экспериментальной группе *B. subtilis* наблюдалось уменьшение количества актов груминга, что соотносится с литературными данными о снижении тревожности при приеме пробиотиков и может свидетельствовать о анксиолитическом эффекте пробиотического штамма [14].

Снижение содержания холестерина может быть связано с активацией макрофагов, на фоне введения ЛПС. В свою очередь, они останавливают биосинтез холестерина с помощью активации фермента холестерин-25-гидроксилазой (СН25Н). Под действием СН25Н холестерин превращается в 25-гидроксихолестерин, который ингибирует синтез холестерина и стимулирует его выведение [15].

Прием *B. subtilis* способствует улучшению морфологии кишечника и его бактериального состава [16]. Также в литературных источниках описан фермент уреазы, продуцируемый данным видом бактерий. Однако он имеет низкую

эффективность при гидролизе мочевины до аммиака и CO₂ [17]. Результатом нашего исследования является увеличение уровня мочевины на фоне приема *B. subtilis*, что возможно косвенно связано с перестроением микробиома и требует дальнейшего исследования.

Заключение

Влияние ЛПС, индуцирующего воспаление, негативно отражается на поведенческих реакциях организма. Снижается исследовательская активность, ухудшается работа кишечника, в связи со структурными изменениями, вызванными инъекциями ЛПС. В свою очередь пробиотик на основе бактерий вида *B. subtilis* позитивно воздействует на исследовательский интерес животных и приводит к снижению уровня стресса. При этом выявленные эффекты демонстрируют двойственность действий *B. subtilis*: моделируя ось «кишечник-мозг» и снижая тревожность, он одновременно вызывает метаболические изменения. Однако наряду с этим *B. subtilis* увеличивает уровень мочевины в крови и не оказывает должного протекторного свойства на фоне приема ЛПС. Следовательно, требуется дальнейшее более глубокое изучение *B. subtilis* на биохимические показатели крови, включая исследование механизмов взаимодействия пробиотиков с физиологией хозяина при воспалении, а также поиск пробиотика, способного нивелировать негативное воздействие ЛПС.

Перспективным направлением может стать разработка комплексным синбиотических препаратов для коррекции ЛПС-индуцированных нарушений.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZGW-2024-0003).

Литература

- 1 Żółkiewicz J., Marzec A., Ruszczyński M., Feleszko W. Postbiotics—A Step Beyond Pre- and Probiotics // *Nutrients*. 2020. Vol. 12. No. 8. P. 2189. doi: 10.3390/nu12082189.
- 2 Vicente-Hil S., Núñez-Ortiz N., Morel E., et al. Immunomodulatory properties of *Bacillus subtilis* extracellular vesicles on intestinal cells and splenocytes of rainbow trout // *Frontiers in Immunology*. 2024. Vol. 15. P. 1394501. doi: 10.3389/fimmu.2024.1394501.
- 3 Zhang J., Zhang R., Wang J., et al. A Strategy for the Efficient Production of a Novel *Bacillus subtilis* Postbiotic and Its Antioxidant and Anti-Inflammatory Effects // *Molecules*. 2025. Vol. 30. No. 10. P. 2089. doi: 10.3390/molecules30102089.
- 4 Domínguez-Oliva A., Hernández-Ávalos I., Martínez-Burnes J., et al. The Importance of Animal Models in Biomedical Research: Current Advances and Applications // *Animals*. 2023. Vol. 13. No. 7. P. 1223. doi: 10.3390/ani13071223.
- 5 Ren Y., Zhang Y., Li S., et al. Bacteriocin production and inhibition of *Bacillus subtilis* by *Lactobacillus paracasei* HD1.7 in an indirect coculture system // *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. 2022. Vol. 52. No. 7. P. 783–788. doi: 10.1080/10826068.2021.1995412.
- 6 Geng J., Shi Y., Zhang J., et al. TLR4 signalling via Piezo1 is a critical step in macrophage activation during bacterial infection // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 12. No. 1. P. 3519. doi: 10.1038/s41467-021-23683-y.
- 7 Laicki T., Brown M., Craning S.A., et al. LPS induces opposing inflammatory responses in murine bone marrow neutrophils // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22. No. 18. P. 9803. doi: 10.3390/ijms22189803.

- 8 Gryaznova M.V., Burakova I.I., Smirnova Y.S., et al. The Effect of Probiotic Bacteria on the Gut Microbiota in Mice with LPS-Induced Inflammation // *Microorganisms*. 2024. Vol. 12. No. 7. P. 1341. doi: 10.3390/microorganisms12071341.
- 9 Ennaceur A. Tests of unconditioned anxiety — Pitfalls and disappointments // *Physiology & Behavior*. 2014. Vol. 135. P. 55–71. doi: 10.1016/j.physbeh.2014.05.032.
- 10 Yang J., Ning H.C., Zhang C., et al. Effect of *Bacillus subtilis* BS-Z15 on the Gut Microbiota and Weight Gain in Mice // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023. Vol. 15. No. 3. P. 706–715. doi: 10.1007/s12602-021-09897-y.
- 11 Seibenhener M.L., Wooten M.C. Use of the Open Field Maze to Measure Locomotor and Anxiety-Like Behavior in Mice // *Journal of Visualized Experiments (JoVE)*. 2015. No. 96. P. e52434. doi: 10.3791/52434.
- 12 Яковлева О.В. (Архипова), Мулакаева А.И., Салихзянова А.Ф. и др. Влияние метаболита микробиоты – масляной кислоты на двигательную координацию, силу мышц и уровень окислительного стресса в скелетных мышцах при дисбиозе у мышей. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2023. Т. 109. № 6. С. 723–736.
- 13 Kalueff A.V., Stewart A.M., Song C., et al. Neurobiology of rodent self-grooming and its value for translational neuroscience // *Nature Reviews Neuroscience*. 2016. Vol. 17. No. 1. P. 45–59. doi: 10.1038/nrn.2015.8.
- 14 Cheng H.W., Jiang S., Hu J. The Gut-Brain Axis: Probiotic *Bacillus subtilis* Prevents Aggression via Modulation of Serotonergic System // *Gut Microbiota*. 2019. doi: 10.5772/intechopen.86775.
- 15 Dang E.V., McDonald J.G., Russell D.W., Cyster J.G. Oxysterol Restraint of Cholesterol Synthesis Prevents AIM2 Inflammasome Activation // *Cell*. 2017. Vol. 171. No. 5. P. 1057–1071.e11. doi: 10.1016/j.cell.2017.09.029.
- 16 Aljuma M.R., Alhulaifi M.M., Abudabos A.M., et al. *Bacillus subtilis* PB6-Based Probiotic (CloSTAT) Improves Recovery Following Necrotic Enteritis Challenge // *PLOS ONE*. 2020. Vol. 15. No. 6. P. e0232781. doi: 10.1371/journal.pone.0232781.
- 17 Wright J., Morland P., Wipat A., et al. Engineered ureolytic *Bacillus subtilis* and its potential in microbial-induced calcium carbonate precipitation // *Access Microbiology*. 2020. Vol. 2. doi: 10.1099/acmi.ac2020.po0143.
- 18 Salminen S., Collado M.C., Endo A., et al. The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics // *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 2021. Vol. 18. No. 9. P. 649–667. doi: 10.1038/s41575-021-00440-6.
- 19 Nataraj B.H., Ali S.A., Behare P.V., Yadav H. Postbiotics-parabiotics: the new horizons in microbial biotherapy and functional foods // *Microbial Cell Factories*. 2020. Vol. 19. No. 1. P. 168. doi: 10.1186/s12934-020-01426-w.
- 20 Teame T., Wang A., Xie M., et al. Paraprobiotics and Postbiotics of Probiotic *Lactobacilli*, Their Positive Effects on the Host and Action Mechanisms: A Review // *Frontiers in Nutrition*. 2020. Vol. 7. P. 570344. doi: 10.3389/fnut.2020.570344.

References

- 1 Żółkiewicz J., Marzec A., Ruszczyński M., Feleszko W. Postbiotics-A Step Beyond Pre- and Probiotics. *Nutrients*. 2020. vol. 12. no. 8. p. 2189. doi:10.3390/nu12082189
- 2 Vicente-Gil S., Nuñez-Ortiz N., Morel E., Serra C.R., Docando F., Díaz-Rosales P., Tafalla C. Immunomodulatory properties of *Bacillus subtilis* extracellular vesicles on rainbow trout intestinal cells and splenic leukocytes. *Frontiers in Immunology*. 2024. vol. 15. p. 1394501. doi:10.3389/fimmu.2024.1394501
- 3 Zhang J., Zhang R., Wang J., Abbas Z., Tong Y., Fang Y., Zhou Y., Zhang H., Li Z., Si D. et al. Efficient Production Strategy of a Novel Postbiotic Produced by *Bacillus subtilis* and Its Antioxidant and Anti-Inflammatory Effects. *Molecules*. 2025. vol. 30. p. 2089. doi:10.3390/molecules30102089
- 4 Domínguez-Oliva A., Hernández-Ávalos I., Martínez-Burnes J., Olmos-Hernández A., Verduzco-Mendoza A., Mota-Rojas D. The Importance of Animal Models in Biomedical Research: Current Insights and Applications. *Animals*. 2023. vol. 13. no. 7. p. 1223. doi:10.3390/ani13071223
- 5 Ren Y., Zhang Y., Li X., Gao D., Sun Y., Ping W., Ge J. Bacteriocin production and inhibition of *Bacillus subtilis* by *Lactobacillus paracasei* HD1.7 in an indirect coculture system. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*. 2022. vol. 52. no. 7. pp. 783–788. doi:10.1080/10826068.2021.1995412
- 6 Geng J., Shi Y., Zhang J., Yang B., Wang P., Yuan W., Zhao H., Li J., Qin F., Hong L., Xie C., Deng X., Sun Y., Wu C., Chen L., Zhou D. TLR4 signalling via Piezo1 engages and enhances the macrophage mediated host response during bacterial infection. *Nature Communications*. 2021. vol. 12. p. 3519. doi:10.1038/s41467-021-23683-y
- 7 Lajqi T., Braun M., Kranig S.A., Frommhold D., Pöschl J., Hudalla H. LPS Induces Opposing Memory-like Inflammatory Responses in Mouse Bone Marrow Neutrophils. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. vol. 22. no. 18. p. 9803. doi:10.3390/ijms22189803
- 8 Gryaznova M., Burakova I., Smirnova Y., Morozova P., Chirkin E., Gureev A., Mikhaylov E., Korneeva O., Syromyatnikov M. Effect of Probiotic Bacteria on the Gut Microbiome of Mice with Lipopolysaccharide-Induced Inflammation. *Microorganisms*. 2024. vol. 12. no. 7. p. 1341. doi:10.3390/microorganisms12071341
- 9 Ennaceur A. Tests of unconditioned anxiety – pitfalls and disappointments. *Physiology & Behavior*. 2014. vol. 135. pp. 55–71. doi: 10.1016/j.physbeh.2014.05.032
- 10 Yang J., Ning H.C., Zhang Q., Yue J.Q., Cao X.V., Li J.Y., Liu L., Zhao H.P., Zhao H.X. Effects of *Bacillus subtilis* BS-Z15 on Intestinal Microbiota Structure and Body Weight Gain in Mice. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2023. vol. 15. no. 3. pp. 706–715. doi:10.1007/s12602-021-09897-y
- 11 Seibenhener M.L., Wooten M.C. Use of the Open Field Maze to measure locomotor and anxiety-like behavior in mice. *Journal of Visualized Experiments*. 2015. no. 96. p. e52434. doi:10.3791/52434
- 12 Yakovleva O.V. (Arkhipova), Mullakaeva A.I., Salikhzyanova A.F. et al. Effect of Microbiota Metabolite Butyric Acid on Motor Coordination, Muscle Strength and Oxidative Stress Level in Skeletal Muscles of Mice with Dysbiosis. *Russian Physiological Journal Named After I.M. Sechenov*. 2023. vol. 109. no. 6. pp. 723–736. (in Russian)

- 13 Kalueff A.V., Stewart A.M., Song C. et al. Neurobiology of rodent self-grooming and its value for translational neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*. 2016. vol. 17. no. 1. pp. 45–59. doi:10.1038/nrn.2015.8
- 14 Cheng H.W., Jiang S., Hu J. The Gut-Brain Axis: Probiotic *Bacillus subtilis* Prevents Aggression via Modulation of Serotonergic System. *Gut Microbiota*. 2019. doi:10.5772/intechopen.86775
- 15 Dang E.V., McDonald J.G., Russell D.W., Cyster J.G. Oxysterol Restraint of Cholesterol Synthesis Prevents AIM2 Inflammasome Activation. *Cell*. 2017. vol. 171. no. 5. pp. 1057–1071. doi: 10.1016/j.cell.2017.09.029
- 16 Aljuma M.R., Alhulaifi M.M., Abudabos A.M. et al. *Bacillus subtilis* PB6-Based Probiotic (CloSTAT) Improves Recovery Following Necrotic Enteritis Challenge. *PLOS ONE*. 2020. vol. 15. no. 6. p. e0232781. doi: 10.1371/journal.pone.0232781
- 17 Wright J., Morland P., Wipat A. et al. Engineered ureolytic *Bacillus subtilis* and its potential in microbial-induced calcium carbonate precipitation. *Access Microbiology*. 2020. vol. 2. doi: 10.1099/acmi.ac2020.po0143
- 18 Salminen S., Collado M.C., Endo A. et al. The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 2021. vol. 18. no. 9. pp. 649–667. doi:10.1038/s41575-021-00440-6
- 19 Nataraj B.H., Ali S.A., Behare P.V., Yadav H. Postbiotics-parabiotics: the new horizons in microbial biotherapy and functional foods. *Microbial Cell Factories*. 2020. vol. 19. no. 1. p. 168. doi: 10.1186/s12934-020-01426-w
- 20 Teame T., Wang A., Xie M. et al. Paraprobiotics and Postbiotics of Probiotic *Lactobacilli*, Their Positive Effects on the Host and Action Mechanisms: A Review. *Frontiers in Nutrition*. 2020. vol. 7. p. 570344. doi: 10.3389/fnut.2020.570344

Сведения об авторах

Светлана В. Погорелова м.н.с., лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, zubkova.sweta@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0002-7924-8027>

Егор А. Чиркин студент, техник, лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, chirkin@bio.vsu.ru
 <https://orcid.org/0009-0000-0021-6408>

Полина Д. Морозова аспирант, м.н.с., лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ms.cloud00.00@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0000-0075-9170>

Михаил Ю. Сыромятников к.б.н., в.н.с., лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, syromyatnikov@bio.vsu.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9028-0613>

Ольга В. Зверева м.н.с., лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, bond.vrn15@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7051-9858>

Анна А. Толкачева м.н.с., лаборатория метабеномики и пищевых биотехнологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, anna-biotech@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-0725-6482>

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Svetlana V. Pogorelova jr. scientist, laboratory of metagenomics and food biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, zubkova.sweta@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0002-7924-8027>

Egor A. Chirkin student, technician, laboratory of metagenomics and food biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, chirkin@bio.vsu.ru
 <https://orcid.org/0009-0000-0021-6408>

Polina D. Morozova postgraduate student, junior researcher, laboratory of metagenomics and food biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ms.cloud00.00@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0000-0075-9170>

Mikhail Yu. Syromyatnikov Cand. Sci. (Biolog.), leading researcher, laboratory of metagenomics and food biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, syromyatnikov@bio.vsu.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9028-0613>

Olga V. Zvereva junior researcher, laboratory of metagenomics and food biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, bond.vrn15@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7051-9858>

Anna A. Tolkacheva junior researcher, laboratory of metagenomics and food biotechnology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, anna-biotech@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-0725-6482>

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 11/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2025
Received 11/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2025

Методы активной упаковки: сравнительный анализ технологий продления срока годности продуктов

Сергей М. Махов¹ makhovsm@gmail.com  0009-0001-9626-4689

¹ МГУТУ им. Разумовского, ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия

Аннотация. Статья представляет обзор и систематизацию подходов активной упаковки пищевых продуктов с акцентом на механизмы действия и эффективность по ключевым категориям товаров. Цель работы — описать, какие решения (поглотители кислорода и влаги, этилен-ловушки, антимикробные системы, а также упаковка в модифицированной газовой среде, MAP) обеспечивают наибольшее продление срока годности и снижение микробной нагрузки, и в каких случаях их целесообразно комбинировать. Проведено обобщение экспериментальных данных из рецензируемых публикаций и промышленных кейсов с приведением ориентировочных количественных эффектов. Показано, что O₂-поглотители на основе железа в вакууме или в сочетании с MAP снижают остаточный кислород до сотых процента и продлевают хранение мяса до 21–28 суток; для рыбы отмечено двукратное и более увеличение сроков свежести. Для фруктов и овощей наибольший эффект даёт связка этилен-поглотителя с оптимальным газовым режимом (прибавка 2–4 недели), тогда как для хлебобулочных изделий высоко-CO₂-MAP обеспечивает 14–21 день «без плесени». Влагоабсорбенты уменьшают экссудат и косвенно сдерживают порчу, а антимикробные покрытия добавляют 2–5 дней и дают снижение на 1–2 log. Наилучшие результаты достигаются при комбинировании технологий с учётом чувствительности продукта к кислороду, влаге и рисков анаэробного роста; предложена сводная таблица для практического выбора решений.

Ключевые слова: активная упаковка, срок годности, поглотители кислорода, модифицированная атмосфера, антимикробные системы, пищевые продукты.

Active Packaging Methods: A Comparative Analysis of Technologies for Extending Shelf Life of Food Products

Sergey M. Makhov¹ makhovsm@gmail.com  0009-0001-9626-4689

¹ Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, 73 Zemlyanoy Val Street, Moscow, 109004, Russia

Abstract. This article reviews and systematizes approaches to active food packaging, with emphasis on mechanisms and category-specific efficacy. The aim is to identify which solutions—oxygen and moisture scavengers, ethylene traps, antimicrobial systems, and modified-atmosphere packaging (MAP)—deliver the greatest shelf-life extension and microbial risk reduction, and when their combination is justified. We synthesize peer-reviewed data and industrial cases and provide indicative quantitative effects. Iron-based O₂ scavengers used under vacuum or together with MAP lower residual oxygen to hundredths of a percent and extend chilled meat storage to 21–28 days; for fish and seafood, freshness periods typically double or more. For fresh produce, the most effective pairing is an ethylene scavenger with an optimized O₂/CO₂ balance, adding ~2–4 weeks while preserving sensory quality. In bakery products, high-CO₂ MAP yields 14–21 mold-free days. Moisture absorbers reduce exudate and indirectly slow spoilage, whereas antimicrobial coatings/films add 2–5 days and achieve ~1–2 log reductions in target microorganisms. The best outcomes arise from tailoring and combining technologies to product physiology (oxygen and moisture sensitivity) and safety constraints (e.g., anaerobic growth). A summary table is provided to support practical selection and integration.

Keywords: active packaging, shelf life, oxygen scavengers, modified atmosphere, antimicrobial systems, food products.

Введение

Активная упаковка – это тип упаковки, который модифицирует условия хранения с целью продления срока годности и повышения безопасности продукта [1, 2]. В активной упаковке используют специальные компоненты, поглощающие или выпускающие в упаковочную среду биологически активные вещества (кислород, влагу, этилен, антимикробные агенты и т. д.) [1], что дает возможность замедлить порчу продуктов без добавления химических консервантов.

Критически важным является поддержание низкого содержания кислорода, так как именно кислород способствует прогорклости жиров, утрате витаминов, изменению цвета мяса и интенсивному росту бактерий и плесени [3] [4]. Активная упаковка позволяет справиться с этими проблемами – она тормозит окислительные реакции и микробиологические процессы в процессе поглощения кислорода и выделения углекислого газа [5] [2]. В данной статье будут рассмотрены основные типы активной упаковки – поглотители кислорода, влаги, этилена,

Для цитирования

Махов С.М. Методы активной упаковки: сравнительный анализ технологий продления срока годности продуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 70–78. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-70-78

For citation

Makhov S.M. Active Packaging Methods: A Comparative Analysis of Technologies for Extending Shelf Life of Food Products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 70–78. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-70-78

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

антимикробные системы и модифицированные газовые среды – а также их эффективность для различных пищевых категорий – мясо, рыба, фрукты и овощи, молочные и хлебобулочные изделия.

Результаты и обсуждение

Поглотители кислорода представляют собой химические добавки (чаще всего на основе железа), упакованные в маленькие саше, которые помещают внутрь герметичной упаковки [6] – они активно взаимодействуют с кислородом, т. е. удаляют его из пространства упаковки [4, 7]. Типичный механизм – это окисление железного порошка до Fe_2O_3 при участии влаги [8]. Благодаря окислению внутри упаковки создаётся практически безкислородная среда, предотвращающая окисление жиров, потемнение свежего мяса и развитие аэробных микроорганизмов [8]. Например, использование кислородного поглотителя удвоило срок хранения охлаждённой рыбы (тилапии) – с 10 до 20 дней – по сравнению с хранением без поглотителя [9, 10]. В мясной промышленности кислородные поглотители помогают сохранить ярко-красный цвет говядины (предотвращают образование метмиоглобина) и защитить мясо от плесени; в хлебобулочных изделиях они снижают скорость «прогоркания» жиров и тормозят рост плесневых грибов. При этом в продуктах, чувствительных к влаге, необходимо аккуратно дозировать поглотители кислорода, поскольку реакция окисления порой требует ее присутствия.

Избыточная влажность внутри упаковки стимулирует рост плесени и бактерий, ухудшает внешний вид и текстуру продуктов. Поглотители влаги (десиканты) – это материалы (силикагель, натриевые соли угольной кислоты и др. [11]) или впитывающие прокладки, которые впускаются в упаковку для поглощения конденсированной влаги. Они особенно эффективны для свежих овощей и фруктов, а также используются для мяса и морепродуктов. Например, отмечено, что во фруктово-овощных упаковках применяют саше с Na_2CO_3 или силикагелем, а в мясных и рыбных – влагопоглощающие прокладки: они впитывают сок (экссудат), уничтожают неприятные запахи и замедляют рост микроорганизмов [12]. Такая технология позволяет дольше сохранять овощи хрустящими и предотвращает «размякание» тортов и пр. кондитерских изделий. Именно в хлебобулочных изделиях снижение влажности препятствует образованию плесени (молекулы воды необходимы грибкам) – при этом важно следить за тем, чтобы продукция преждевременно не пересыхала и не черствела.

Теперь рассмотрим так называемых «поглотителей этилена». Этилен – это газообразный

гормон растений, стимулирующий созревание плодов (например, яблок, бананов, томатов). При хранении фруктов и овощей его концентрация может повышаться и приводить к ускоренному «увяданию». Поглотители этилена (например, химические реагенты на основе перманганата калия, цеолитов, диолов TiO_2 и др.) «удаляют» газ из атмосферы упаковки – системы вступают в химические реакции или физически адсорбируют этилен [13]. В результате замедляется процесс созревания фруктово-овощной продукции – но при этом сохраняются вкус, текстура и витамины. Исследователи утверждают, что этиленовые поглотители продлевают срок годности и сохраняют исходное качество свежих фруктов и овощей [14], а также ограничивают накопление этилена [13]. Для продуктов других категорий (мясо, рыба, «молочка», хлеб) роль этилена минимальна, поэтому целесообразно использовать «поглотители» преимущественно в упаковке свежих овощей и фруктов.

Антимикробная упаковка состоит из материалов, которые содержат в ее структуре или покрытии вещества с антимикробной «активностью» (натуральные и синтетические) – т. е. органические кислоты (сорбиновая, янтарная), эфирные масла, наноагенты (например, серебро), бактериоцидные пептиды (нисины), ферменты и пр. [15] Такие добавки либо высвобождаются из упаковки, либо контактируют с поверхностью продукта и подавляют рост патогенных и порчеобразующих микроорганизмов. Антимикробные системы значительно продлевают «период покоя» микроорганизмов [16, 17] – также улучшается микробиологическая безопасность и качество продуктов; уменьшается риск порчи, продлевается срок годности. Антимикробная упаковка применяется во многих категориях – в мясной и рыбной промышленности (для свежего и копчёного мяса), в производстве сыров и молочных продуктов, в упаковке готовых блюд и салатов, а также в хлебобулочных изделиях (например, для предотвращения распространения плесени). Выбор конкретного агента и его концентрации зависит от типа продукта и ожидаемого срока хранения [17].

Далее рассмотрим упаковку в модифицированной газовой среде (Modified Atmosphere Packaging, MAP), которая основана на изменении газового состава внутри упаковки [18]. Атмосферу обогащают или разбавляют различными газами (обычно CO_2 , N_2 , O_2) в оптимальных для продукта соотношениях [19]. «Замена» воздуха позволяет снизить окисление и сохранить органолептические свойства. Карбоновый диоксид действует как антимикробный газ – при концентрациях от 20% и выше он тормозит

рост бактерий и грибов [19]. Азот инертен, используется для вытеснения кислорода и предотвращения деформации упаковки. Например, большинство мясных и рыбных продуктов упаковывают в смеси с 25–80% CO_2 и остальным N_2 , это значительно тормозит развитие патогенов [19]. Для свежих фруктов и овощей зачастую применяют пассивное МАР – подбирают полимерную плёнку с необходимой проницаемостью, поддерживающую оптимальный баланс O_2/CO_2 и уменьшающую потерю влаги и витаминов. Для хлебобулочных изделий МАР с высоким содержанием CO_2 (иногда до 100% CO_2) резко увеличивает так называемый «период хранения без плесени» – так, исследователи утверждают, что количество дней может повыситься до тридцати [19]. Однако стоит помнить, что МАР не устраняет, например, черствение хлеба, вызванное постепенным исчезновением из него влаги.

Теперь проведем сравнительный анализ по категориям продуктов.

– Для свежего мяса важно сохранение красного цвета и сохранение жиров. Кислородные поглотители помогают избежать потемнения (метмиоглобина) и замедлить рост аэробных бактерий [4]. МАР с высоким содержанием O_2 (для сохранения цвета) и CO_2 (для антимикробного эффекта) широко применяется на мясокомбинатах [19]. Антимикробные добавки (нисины, молочные кислоты и др.) в упаковке препятствуют росту патогенов. Поглотители влаги удерживают «мясной сок», снижают активность размножения микрофлоры. Также можно отметить следующую взаимосвязь – кислородные поглотители в сочетании с МАР позволяют снижать остаточный O_2 до сотых процента – это увеличивает срок хранения мяса [4].

– Рыбное филе и охлаждённые морепродукты особенно подвержены окислительной порче и росту присутствия псевдомонад. Использование O_2 -поглотителей удваивает (и даже утраивает) время свежести рыбы при охлаждении [10]. Для поглощения влаги применяются специальные впитывающие прокладки, уменьшающие экссудат и задерживающие появление посторонних запахов [12]. Антимикробные плёнки (на основе фитоэлементов, лизоцима и др.) и МАР с высоким содержанием CO_2 дополнительно подавляют микробное загрязнение. На практике специалисты зачастую комбинируют технологии – например, упаковывают филе рыбы в газовую среду с 20–60% CO_2 и добавляют O_2 -поглотитель для минимизации остаточного кислорода [19], что позволяет безопасно хранить свежую рыбу до нескольких недель в холодильнике.

– В случае фруктов и овощей основная проблема – этиленовое созревание и плесневение. Поглотители этилена (саше с KMnO_4

или ферментные системы) задерживают созревание – например, яблоки и бананы хранятся дольше без потери витаминов [13]. Падение влажности в упаковке за счёт десикантов уменьшает гниение, а антимикробные покрытия (например, из хитозана или протеинов) способны подавлять рост грибов и бактерий на поверхности фруктов и овощей. МАР-подходы подбирают следующим образом – например, используются плёнки с регулируемой проницаемостью, поддерживающие пониженный O_2 (2–5%) и повышенный CO_2 (5–15%) – продлевает срок хранения. Можно предположить, что для свежих овощей / фруктов наиболее эффективна комбинация «этиленовый поглотитель + оптимальная газовая среда», а также удаление избыточной влаги.

– При упаковке сыров и других молочных изделий специалисты заостряют внимание на • O_2 -*поглотителях, которые позволяют предотвратить окисление жиров в жирных сырах и сохранить свежее молоко дольше (особенно это касается стерильных упаковок). МАР с CO_2 (10–30%) применяют в сырах для сдерживания распространения плесени и патогенов [20]. Антимикробные добавки (например, нистатин в оболочке сыра или лизоцим) реально увеличивают срок хранения без риска порчи. В молочных напитках (кефир, йогурт) активная упаковка не так распространена, поскольку микрофлора зачастую необходима для вкуса; но может использоваться для удлинения «свежего» периода готовой продукции. Избыток влаги в сухих молочных продуктах (сыворожке, сухом молоке) обычно не является проблемой – поэтому влагопоглотители используются редко.

– Для хлебобулочных изделий главными угрозами являются плесень и черствение. O_2 -поглотители здесь помогают задержать рост аэробных грибов (хотя они не убивают споры), а также замедлить автолиз клейковины. МАР с высоким CO_2 (иногда ближе к 100%) существенно увеличивает «безплесневый» период. Специалисты отмечают, что CO_2 -упаковка может продлить срок хранения изделия до нескольких недель [19]. Антимикробные покрытия (на основе сорбиновой кислоты, пропионатов или растительных экстрактов) активно используются для защиты от грибов и бактерий. Влага контролируется иначе – чаще за счёт самих рецептур и ламинирования упаковок (антифог-плёнки уменьшают запотевание). В целом наиболее эффективной для хлеба является комбинация «МАР + антимикробный агент» – так, первый подавляет развитие плесени, второй подавляет уже живущие микробы, а «смесь» газов сохраняет свежесть мякиша.

Итак, различные методы активной упаковки дополняют друг друга и зачастую применяются в комбинации.

Таблица 1.

Продление срока хранения различных продуктов с помощью активной упаковки (приведены примерные значения: срок годности без и с упаковкой, увеличение в%, снижение микробной нагрузки, основные действующие вещества или технологии)

Категория продукта	O ₂ -поглотители (удаление O ₂)	Поглотители влаги (абсорбция конденсата)	Модифицир. атмосфера (MAP) (газовый состав)	Антимикробные системы (ингибирование микрофлоры)	Этилен-поглотители (удаление C ₂ H ₄)
Мясо (красное мясо, птица)	Срок хранения: ~7–10 дней в обычной атмосфере vs до 21–28 дней с O ₂ -поглотителем в сочетании с вакуумом (увеличение ~+150–200%). Микробная нагрузка: замедлен рост аэробов, подавлено окисление жиров; Вещества: саше с порошком железа (Fe) или аскорбатами, поглощающими кислород	Срок хранения: незначительно влияет отдельно (мясо уже упаковано во влагонепроницаемую плёнку), но влагопоглощающие вкладыши уменьшают «дрип» /подтёки, что косвенно снижает порчу. Микробная нагрузка: снижение общего количества бактерий ~на 0,5–1 log за счёт удаления жидкого субстрата. Вещества: впитывающие подложки с цеолитом и антимикробными пропитками.	Срок хранения: ~7 дней (обычный воздух) vs ~10–14 дней в газовой смеси 60–80% O ₂ + 20–40% CO ₂ (High-O ₂ MAP); при Low-O ₂ MAP (0% O ₂ , 20–30% CO ₂ , N ₂ баланс) – до 21 дня (с последующим «воспусканием» кислорода для покраснения мяса). Увеличение ~+50–100%. Микробная нагрузка: замедлен рост аэробных психротрофов, но возможен рост анаэробов – требуется охлаждение. Газы: типично либо 70% O ₂ /30% CO ₂ (для красного цвета, короткое хранение), либо 0% O ₂ /30% CO ₂ /70% N ₂ (для длительного хранения без окисления).	Срок хранения: +2–5 дней к вышеуказанному (например, охлаждённая говядина ~21 день в обычной вакуумной упаковке vs до 26 дней с антимикробной плёнкой). Микробная нагрузка: снижение на ~1–2 log (в т. ч. Listeria, Pseudomonas) за счёт постепенного высвобождения антибактериальных агентов. Вещества: диоксид хлора, органические кислоты (молочная, сорбиновая), серебро- и цинксодержащие наночастицы, ферменты.	Не применяется (мясные продукты не выделяют этилен; контроль этилена не влияет на срок хранения мяса).
Рыба и морепродукты	Срок хранения: ~4–6 дней в льду (обычно) vs ~10–12 дней с O ₂ -абсорбером в упаковке (например, стейки сома: 10 дн. → 20 дн. при 0 °C, +100%). Микробная нагрузка: подавлен рост аэробных психрофильных бактерий, замедлено прогоркание жиров. Вещества: железный порошок, активированный уголь (для поглощения O ₂ и летучих аминов – запахов рыбы).	Срок хранения: влагопоглощающие вставки уменьшают количество свободной жидкости (талой воды от льда, экссудат), что снижает рост бактерий на поверхности. Прирост срока хранения незначителен (рыба главным образом ограничена микробами и окислением). Микробная нагрузка: снижение ~0,5 log общей микрофлоры. Вещества: абсорбенты на основе целлюлозы, глины; иногда с антисептиками (например, соль бензойной кислоты).	Срок хранения: ~4–5 дней (воздух, охлаждение) vs ~11–15 дней в Modified Atmosphere (обычно 40–60% CO ₂ + 40–60% N ₂) – увеличение ~в 2–3 раза. Микробная нагрузка: значительное замедление роста псевдомонад, Shewanella и др. аэробов; возможен привкус CO ₂ при высоких концентрациях. Газы: 40–60% CO ₂ , остаток N ₂ ; O ₂ обычно исключается во избежание порчи жиров и обесцвечивания.	Срок хранения: +2–4 дня за счёт противомикробных упаковок (например, плёнки с экстрактом семян грейпфрута продлевают хранение филе рыбы с 12 до ~15–16 дней при 4 °C). Микробная нагрузка: подавление специфических патогенов (Listeria monocytogenes, Vibrio spp. и др.) на ~1–2 log. Вещества: антибактериальные покрытия с эфирными маслами (тимол, эвкалиптол), хиты, или биополимерные плёнки с ферментами.	Не применяется (рыба и морепродукты не выделяют значимого количества этилена).
Свежие фрукты и овощи	Срок хранения: некоторая выгода для измельчённых салатов и продуктов с высокой дыхательной активностью – поглотители O ₂ замедляют потемнение и рост плесени (например, резаный салат: +1–2 дня к хранению при 4 °C). Микробная нагрузка: снижение роста аэробных спор образующих плесеней. Вещества: саше с аскорбатом натрия, феррозоль, поглощающие O ₂ внутри упаковки.	Срок хранения: увеличение на ~20–30% за счёт удаления конденсата (например, огурцы без конденсата хранятся ~14 дней vs 10–12 с конденсатом). Поглотители влаги предотвращают гниение и рост плесени на поверхности продуктов (ягод, зелени). Микробная нагрузка: косвенно снижается (сухая среда подавляет грибы). Вещества: фильтры и вкладыши с силикагелем, цеолитом; впитывающие салфетки в лотках с ягодами.	Срок хранения: в модифицированной атмосфере (например, для салата 5% O ₂ + 5% CO ₂) увеличивается примерно в 1,5 раза (листья салата ~5 дн. → 7–8 дней). Для фруктов (яблоки, ягоды) комбинация пониженного O ₂ и повышенного CO ₂ замедляет дыхание и созревание, продлевая хранение на недели. Микробная нагрузка: не основное ограничение (главное – замедление физиологических процессов продукта). Газы: низкий O ₂ (3–5%), CO ₂ 5–10%, остальное N ₂ (для овощей); для фруктов иногда повышенный CO ₂ или добавка N ₂ для инертной среды.	Срок хранения: существенно увеличивается за счёт антимикробных упаковок против плесени и бактерий – например, плёнка с яблочным экстрактом продлевает свежесть ягод на +3–4 дня, снижая плесневение. Микробная нагрузка: уменьшение спор грибов (Botrytis, Penicillium) и бактерий на ~1 log. Вещества: натуральные экстракты (тимьян, розмарин, хмелевые кислоты) в упаковке, противогрибковые препараты (низин, натамицин) для плодов.	Срок хранения: значительно возрастает для чувствительных к этилену плодов: +2–4 недели к хранению при поглощении C ₂ H ₄ . Например, бананы: ~2 недели (без) vs ~4 недели с этилен-фильтром; томаты: ~20 дней → 30–40 дней. Микробная нагрузка: косвенно снижается порча (задерживается перезревание, при котором развиваются плесени). Вещества: поглотители на основе перманганата калия (KMnO ₄) на носителе, активированный уголь, цеолит, а также фильтры с озонаторами для овощехранилищ.

Молочные продукты (сырая и кисломолочная продукция, сыры)	Практически не применяется (упаковка молочки обычно без доступа O_2 – герметичные ёмкости или вакуум). В сыроделии в редких случаях используют упаковки, поглощающие кислород, для предотвращения вздутия упаковки из-за газообразующих бактерий.	Не применяется (лишняя влага обычно не проблема для молочных – напротив, сохранение влаги важно для мягких сыров; конденсат контролируется температурой).	Срок хранения: для сыров и свежей молочки модифицированная атмосфера (например, 100% N_2 для сыра) предотвращает рост плесени и сохраняет качество (сыр в 100% N_2 вместо воздуха: +50% к сроку без консервантов). Микробная нагрузка: замедлен рост плесени и дрожжей, но анаэробные молочнокислые бактерии могут развиваться (учитывается рецептурой). Газы: часто 100% азот (инертная среда) или 30% CO_2 /70% N_2 для сыров; для свежего молока – не применяется (только вакуум или отсутствие доступа воздуха).	Срок хранения: существенное продление для сыров: напр., сыр с антимикробным покрытием (натамицин) хранится ≥ 30 дней vs ~15 дней без обработки (+100%). Для пастеризованного молока активные вставки (с серебром, цинком) могут +2–3 дня дать при холодильном хранении. Микробная нагрузка: подавление плесени на поверхности сыров (натамицин предотвращает рост <i>Penicillium</i>), снижение бактерий в молоке (ионные серебряные фильтры убивают ~99% бактерий). Вещества: натамицин, сорбат калия в оболочке сыров; активные пленки с эфирными маслами (тимол) для йогуртов; серебряные наночастицы в контейнерах.	Не применяется (молочные продукты не производят этилен).
Хлебобулочные изделия	Срок хранения: ~3–4 дня для свежего хлеба (без упаковки) vs ~8–10 дней с поглотителем O_2 в пакете (+~100%). Поглотитель замедляет рост плесени (аэробной), хотя споры не убивает. Микробная нагрузка: снизился рост плесневых грибов на поверхности (невидимых спор) – задержка появления колоний ~на несколько дней. Вещества: саше с железом, активным углем; иногда комбинируются с поглотителями CO_2 , выделяемого хлебом.	Срок хранения: основная проблема – черствение при потере влаги, поэтому влагопоглотители не используют (наоборот, сохраняют влагу). Примечание: для некоторых изделий (торты) бывают влагорегулирующие вкладыши с солью, поддерживающие относительную влажность.	Срок хранения: упаковка в модифицированной атмосфере с CO_2 существенно удлиняет период без плесени: напр., хлеб в атмосфере ~100% CO_2 – до 14–21 дня без роста плесени (в 3–5 раз дольше обычного). Микробная нагрузка: высокий CO_2 подавляет спорообразование грибов и рост бактерий, однако может вызывать незначительное изменение вкуса. Газы: обычно 60–100% CO_2 , остальное N_2 ; O_2 исключается полностью для предотвращения плесени.	Срок хранения: комбинированные методы дают лучший эффект – напр., хлеб в MAP + антимикробный препарат: ~21 день без плесени. Отдельно антимикробные добавки в упаковке (например, импрегнация сорбиновой кислотой пакета) увеличивают хранение ~в 2 раза (с 4 до 8 дней). Микробная нагрузка: подавление ростковой стадии спор плесени, снижение дрожжевой контаминации; сорбат и пропионат препятствуют развитию <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> . Вещества: соли пропионовой и сорбиновой кислот, этанол-выпарители (поглощают влагу и выделяют пары этанола против плесени), фитоциды (экстракт горчицы, гвоздики) в пакетах.	Не применяется (для выпечки ключевое – плесень и черствость, а не этилен).

Table 1.

Shelf-life extension of various products using active packaging (indicative values provided: shelf life without and with packaging, increase in%, reduction of microbial load, main active substances or technologies)

Product Category	O ₂ -absorbers (oxygen removal)	Moisture absorbers (condensate absorption)	Modified Atmosphere Packaging (MAP, gas composition)	Antimicrobial systems (microflora inhibition)	Ethylene absorbers (C ₂ H ₄ removal)
Meat (red meat, poultry)	Shelf life: ~7–10 days in regular atmosphere vs up to 21–28 days with O ₂ -absorber combined with vacuum (increase ~+150–200%). Microbial load: slowed aerobic growth, inhibited fat oxidation. Substances: sachets with iron powder (Fe) or ascorbates absorbing oxygen.	Shelf life: minimal effect when used alone (meat is already in moisture-proof film), but moisture-absorbing pads reduce “drip”/leakage, indirectly lowering spoilage. Microbial load: reduction of total bacteria by ~0.5–1 log due to removal of liquid substrate. Substances: absorbent pads with zeolite and antimicrobial coatings.	Shelf life: ~7 days (air) vs ~10–14 days in gas mix 60–80% O ₂ + 20–40% CO ₂ (High-O ₂ MAP); under Low-O ₂ MAP (0% O ₂ , 20–30% CO ₂ , balance N ₂) – up to 21 days (with later “re-blooming” of O ₂ for red color). Increase ~+50–100%. Microbial load: aerobic psychrotrophs slowed, but anaerobes may grow – cooling required. Gases: either 70% O ₂ /30% CO ₂ (for red color, short storage), or 0% O ₂ /30% CO ₂ /70% N ₂ (for longer storage without oxidation).	Shelf life: +2–5 days in addition (e.g., chilled beef ~21 days in vacuum vs up to 26 days with antimicrobial film). Microbial load: ~1–2 log reduction (incl. <i>Listeria</i> , <i>Pseudomonas</i>) due to gradual release of antibacterial agents. Substances: chlorine dioxide, organic acids (lactic, sorbic), silver – and zinc-based nanoparticles, enzymes.	Not applied (meat products do not release ethylene; ethylene control does not affect shelf life).
Fish & seafood	Shelf life: ~4–6 days in ice (typical) vs ~10–12 days with O ₂ -absorber in pack (e.g., catfish steaks: 10 d → 20 d at 0 °C, +100%). Microbial load: aerobic psychrophiles suppressed, fat rancidity slowed. Substances: iron powder, activated carbon (for O ₂ and fishy odor absorption).	Shelf life: pads reduce free liquid (melted ice water, exudate), lowering surface bacterial growth. Extension minimal (fish spoilage mostly microbe – and oxidation-limited). Microbial load: ~0.5 log reduction. Substances: cellulose or clay-based absorbers, sometimes with antiseptics (e.g., benzoate salts).	Shelf life: ~4–5 days (air, chilled) vs ~11–15 days in MAP (typically 40–60% CO ₂ + 40–60% N ₂) – 2–3× longer. Microbial load: <i>Pseudomonas</i> , <i>Shewanella</i> and other aerobes strongly slowed; CO ₂ may cause off-flavor at high concentrations. Gases: 40–60% CO ₂ , balance N ₂ ; O ₂ usually excluded (prevents lipid oxidation/discoloration).	Shelf life: +2–4 days with antimicrobial packaging (e.g., films with grapefruit seed extract extend fish fillet from 12 → ~15–16 days at 4 °C). Microbial load: ~1–2 log reduction of pathogens (<i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Vibrio</i> spp. etc.). Substances: antimicrobial coatings with essential oils (thymol, eucalyptol), chitosan, or enzyme-loaded biopolymer films.	Not applied (fish/seafood emit negligible ethylene).
76 Fresh fruits & vegetables	Shelf life: some benefit for cut salads and high-respiration produce – O ₂ -absorbers delay browning and mold (e.g., cut lettuce: +1–2 days at 4 °C). Microbial load: reduced mold spore growth. Substances: sachets with sodium ascorbate, ferrozole, O ₂ absorbers.	Shelf life: ~+20–30% via condensate removal (e.g., cucumbers: ~14 d without condensation vs 10–12 d with). Pads prevent surface rot and mold (berries, greens). Microbial load: indirectly reduced (dry environment suppresses fungi). Substances: silica gel, zeolite filters/pads; absorbent liners in berry trays.	Shelf life: MAP (e.g., lettuce 5% O ₂ + 5% CO ₂) extends ~1.5 × (lettuce : 5 d → 7–8 d). For fruits (apples, berries), low O ₂ + higher CO ₂ slows respiration/ripening, extending storage by weeks. Microbial load: not main factor (physiology dominates). Gases: low O ₂ (3–5%), CO ₂ 5–10%, balance N ₂ (for vegetables); fruits: elevated CO ₂ or added N ₂ for inertness.	Shelf life: significantly longer via antimicrobial films against mold / bacteria – e.g., apple-extract films prolong berries + 3–4 days, reducing mold. Microbial load: fungal spores (<i>Botrytis</i> , <i>Penicillium</i>) and bacteria reduced by ~1 log. Substances: natural extracts (thyme, rosemary, hop acids), antifungals (nisin, natamycin) in packaging.	Shelf life: greatly extended for ethylene-sensitive produce: +2–4 weeks. E.g., bananas: ~2 wks (normal) vs ~4 wks with filter; tomatoes: 20 d → 30–40 d. Microbial load: indirectly reduced (delayed over-ripening reduces mold risk). Substances: KMnO ₄ -based absorbers on carriers, activated carbon, zeolite, or ozonator filters for storage rooms.
Dairy products (raw, fermented, cheeses)	Rarely used (most dairy sealed/vacuum-packed). In cheesemaking, O ₂ -absorbing packs sometimes prevent pack swelling from gas-forming bacteria.	Not applied (excess moisture not an issue – moisture retention is desired in soft cheeses; condensation managed by temperature).	Shelf life: MAP for cheese/dairy (e.g., 100% N ₂) prevents mold, preserves quality (cheese in 100% N ₂ vs air: +50% shelf life without preservatives). Microbial load: slowed mold/yeast growth; anaerobic lactic bacteria may still develop (recipe-dependent). Gases: often 100% N ₂ (inert) or 30% CO ₂ /70% N ₂ for cheese; fresh milk – not applied (only vacuum/sealed).	Shelf life: significantly extended for cheeses: e.g., cheese with natamycin coating ≥ 30 days vs ~15 d untreated (+100%). Pasteurized milk with active inserts (silver, zinc) may gain + 2–3 d refrigerated. Microbial load: mold on cheese surface suppressed (natamycin prevents <i>Penicillium</i>), bacteria in milk reduced (~99% killed by silver ion filters). Substances: natamycin, potassium sorbate in cheese rinds; active films with essential oils (thymol) for yogurts; silver nanoparticles in containers.	Not applied (dairy does not emit ethylene).
Bakery products	Shelf life: ~3–4 d fresh bread (unpacked) vs ~8–10 d with O ₂ -absorber in bag (+~100%). Slows mold (aerobic), though spores not killed. Microbial load: mold spore germination delayed by several days. Substances: sachets with iron, activated carbon; sometimes combined with CO ₂ absorbers (bread emits CO ₂).	Shelf life: main issue = staling from moisture loss, so absorbers not used (moisture retention desired). Note: some items (cakes) use humidity-regulating inserts (e.g., salts) to balance RH.	Shelf life: MAP with CO ₂ greatly delays mold: e.g., bread in ~100% CO ₂ lasts 14–21 d mold-free (3–5× longer). Microbial load: high CO ₂ suppresses mold spore germination and bacterial growth, may slightly alter flavor. Gases: 60–100% CO ₂ , rest N ₂ ; O ₂ fully excluded to prevent mold.	Shelf life: best effect with combined methods – e.g., MAP + antimicrobials : ~21 d mold-free. Alone, antimicrobial packaging (e.g., sorbic acid-impregnated bags) doubles life (4 → 8 d). Microbial load: mold spore germination blocked, yeast contamination reduced; sorbate/propionate inhibit <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> . Substances: propionate/sorbate salts, ethanol vapors (absorb moisture, release ethanol antifungal), phytochemicals (mustard, clove extract) in bags.	Not applied (main issues = mold & staling, not ethylene).

Заключение

Поглотители кислорода и МАР (особенно с CO₂) наиболее универсальны для мяса, рыбы и блюд готового приготовления, так как они эффективно замедляют окисление и рост бактерий; поглотители влаги полезны для свежих овощей и фруктов, мяса – они предотвращают заплесневение и гниение; поглотители этилена незаменимы при хранении плодовых и овощных культур (задерживают созревание); антимикробные упаковки могут применяться практически во всех категориях, где микробное загрязнение ограничивает срок годности – сыры, выпечка и т. д.

Наконец, модифицированная атмосфера сама по себе является «активной» технологией, но именно вместе с поглотителями (O₂ или этилена) и антимикробными агентами даёт наибольший синергетический эффект продления свежести продукта и сохранения его качества. Выбор оптимального сочетания зависит от свойств конкретного продукта – его состава, чувствительности к кислороду или влаге, характера микрофлоры и требуемого времени хранения. Исследования учёных подтверждают, что правильно подобранная активная упаковка способна существенно увеличить срок годности продуктов, улучшить их органолептику и безопасность при соблюдении нормативных требований.

Литература

- 1 Vilela C., Kurek M., Hayouka Z. et al. A concise guide to active agents for active food packaging // Trends in Food Science & Technology. 2018. Vol. 80. P. 212–222. doi: 10.1016/J.TIFS.2018.08.006.
- 2 López-Rubio A., Gavara R., Lagaron J.M. Active food packaging: Development and potential of new bioactive materials // Advances in Food and Nutrition Research. 2011. Vol. 62. P. 149–180.
- 3 Domínguez R., Pateiro M., Gagaoua M. et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products // Antioxidants. 2019. Vol. 8. No. 10. P. 429. doi: 10.3390/antiox8100429
- 4 Suppakul P., Miltz J., Sonneveld K., Bigger S.W. Active packaging technologies with an emphasis on antimicrobial packaging and its applications // Journal of Food Science. 2003. Vol. 68. No. 2. P. 408–420. doi: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb05687.x
- 5 Coles R., McDowell D., Kirwan M.J., editors. Food packaging technology. Oxford: Blackwell Publishing, 2003.
- 6 Gupta P. Role of oxygen absorbers in food as packaging material, their characterization and applications // Journal of Food Science and Technology. 2024. Vol. 61. No. 2. P. 242–252.
- 7 Gutierrez-Aguirre B.R. et al. Effect of potassium permanganate as an ethylene scavenger and physicochemical characterization during the shelf life of fresh banana (*Musa paradisiaca*) // International Journal of Food Science. 2023. Vol. 2023. No. 1. P. 4650023. doi: 10.1155/2023/4650023
- 8 Cichello S.A. Oxygen absorbers in food preservation: a review // Journal of food science and technology. 2015. Vol. 52. No. 4. P. 1889–1895. doi: 10.1007/s13197-014-1265-2
- 9 Remya S., Mohan C.O., Ravishankar C.N. Oxygen scavenger packaging for seafood preservation // Fish Technology. 2020. Vol. 57. P. 147–155.
- 10 Sivertsvik M., Rosnes J.T., Nielsen H. Effect of oxygen scavenger on the shelf-life of catfish (*Pangasius sutchi*) steaks during chilled storage // Journal of Food Science. 2002. Vol. 67. No. 9. P. 3412–3417.
- 11 Drago E. et al. Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review // Foods. 2020. Vol. 9. No. 11. P. 1628. doi: 10.3390/foods9111628
- 12 Kirwan M.J., Plant S. Moisture barriers for food packaging // Packaging Technology and Research [Электронный ресурс]. URL: https://www.packagingtechnologyandresearch.com/uploads/2/4/1/1/24118835/moisture_barriers_for_food.pdf (дата обращения: 11.05.2025).
- 13 Charles F., Sanchez J., Gontard N. Ethylene scavengers for active packaging of fresh produce: a review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2016. Vol. 56. No. 4. P. 666–682.
- 14 Mariah M.A.A., Tahir H.E., Mahmud Z.H. et al. The emergence and impact of ethylene scavengers techniques in delaying the ripening of fruits and vegetables // Membranes. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 117.
- 15 Fadji T., Rashvand M., Daramola M.O. et al. A review on antimicrobial packaging for extending the shelf life of food // Processes. 2023. Vol. 11. No. 2. P. 590. doi: 10.3390/pr11020590
- 16 Meena M., Prasad V., Zehra A. et al. Natamycin: a natural preservative for food applications—a review // Food Science and Biotechnology. 2021. Vol. 30. No. 12. P. 1481–1496.
- 17 Kurek M., Bialobrzaska M., Pankiewicz U. Advances in antimicrobial active packaging for food: A review // Processes. 2023. Vol. 11. No. 2. Art. No. 590.
- 18 DeWitt C.A.M., Oliveira A.C.M. Modified atmosphere systems and shelf life extension of fish and fishery products // Foods. 2016. Vol. 5. No. 3. P. 48. doi: 10.3390/foods5030048
- 19 Campden BRI. Modified Atmosphere Packing – how it works and why it helps // Campden BRI Blog [Электронный ресурс]. URL: <https://www.campdenbri.co.uk/blogs/modified-atmosphere-packing.php> (дата обращения: 11.05.2025).
- 20 Mašková E., Pospíšilová M., Velíšek J., Bedáňová I., Svobodová Z. Modified atmosphere packaging and its influence on meat quality and shelf life // Acta Veterinaria Brno. 2023. Vol. 92. No. 3. P. 95–102.

References

- 1 Vilela C., Kurek M., Hayouka Z. et al. A concise guide to active agents for active food packaging. Trends in Food Science & Technology. 2018. vol. 80. pp. 212–222. doi: 10.1016/J.TIFS.2018.08.006.
- 2 López-Rubio A., Gavara R., Lagaron J.M. Active food packaging: Development and potential of new bioactive materials. Advances in Food and Nutrition Research. 2011. vol. 62. pp. 149–180.

- 3 Domínguez R., Pateiro M., Gagaoua M. et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*. 2019. vol. 8. no. 10. pp. 429. doi: 10.3390/antiox8100429
- 4 Suppakul P., Miltz J., Sonneveld K., Bigger S.W. Active packaging technologies with an emphasis on antimicrobial packaging and its applications. *Journal of Food Science*. 2003. vol. 68. no. 2. pp. 408–420. doi: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb05687.x
- 5 Coles R., McDowell D., Kirwan M.J., editors. *Food packaging technology*. Oxford: Blackwell Publishing, 2003.
- 6 Gupta P. Role of oxygen absorbers in food as packaging material, their characterization and applications. *Journal of Food Science and Technology*. 2024. vol. 61. no. 2. pp. 242–252.
- 7 Gutierrez-Aguirre B.R., Hernández-Santos B., Herman-Lara E., Martínez-Sánchez C.E., Ruiz-López I.I. Effect of potassium permanganate as an ethylene scavenger and physicochemical characterization during the shelf life of fresh banana (*Musa paradisiaca*). *International Journal of Food Science*. 2023. vol. 2023. pp. 4650023. doi: 10.1155/2023/4650023
- 8 Cichello S.A. Oxygen absorbers in food preservation: a review. *Journal of Food Science and Technology*. 2015. vol. 52. no. 4. pp. 1889–1895. doi: 10.1007/s13197-014-1265-2
- 9 Remya S., Mohan C.O., Ravishankar C.N. Oxygen scavenger packaging for seafood preservation. *Fish Technology*. 2020. vol. 57. pp. 147–155.
- 10 Sivertsvik M., Rosnes J.T., Nielsen H. Effect of oxygen scavenger on the shelf-life of catfish (*Pangasius sutchi*) steaks during chilled storage. *Journal of Food Science*. 2002. vol. 67. no. 9. pp. 3412–3417.
- 11 Drago E., Campardelli R., Pettinato M., Perego P. Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*. 2020. vol. 9. no. 11. pp. 1628. doi: 10.3390/foods9111628
- 12 Kirwan M.J., Plant S. Moisture barriers for food packaging. *Packaging Technology and Research*. URL: https://www.packagingtechnologyandresearch.com/uploads/2/4/1/1/24118835/moisture_barriers_for_food.pdf (accessed 11 May 2025)
- 13 Charles F., Sanchez J., Gontard N. Ethylene scavengers for active packaging of fresh produce: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016. vol. 56. no. 4. pp. 666–682.
- 14 Mariah M.A.A., Tahir H.E., Mahmud Z.H. et al. The emergence and impact of ethylene scavengers techniques in delaying the ripening of fruits and vegetables. *Membranes*. 2022. vol. 12. no. 2. pp. 117.
- 15 Fadji T., Rashvand M., Daramola M.O., Iwarere S.A. A review on antimicrobial packaging for extending the shelf life of food. *Processes*. 2023. vol. 11. no. 2. pp. 590. doi: 10.3390/pr11020590
- 16 Meena M., Prasad V., Zehra A., Gupta V.K., Upadhyay R.S. Natamycin: a natural preservative for food applications – a review. *Food Science and Biotechnology*. 2021. vol. 30. no. 12. pp. 1481–1496.
- 17 Kurek M., Bialobrzaska M., Pankiewicz U. Advances in antimicrobial active packaging for food: A review. *Processes*. 2023. vol. 11. no. 2. pp. 590.
- 18 DeWitt C.A.M., Oliveira A.C.M. Modified atmosphere systems and shelf life extension of fish and fishery products. *Foods*. 2016. vol. 5. no. 3. pp. 48. doi: 10.3390/foods5030048
- 19 Campden BRI. Modified Atmosphere Packing – how it works and why it helps. Campden BRI Blog. URL: <https://www.campdenbri.co.uk/blogs/modified-atmosphere-packing.php> (accessed 11 May 2025)
- 20 Mašková E., Pospíšilová M., Velíšek J., Bedáňová I., Svobodová Z. Modified atmosphere packaging and its influence on meat quality and shelf life. *Acta Veterinaria Brno*. 2023. vol. 92. no. 3. pp. 95–102.

Сведения об авторах

Сергей М. Махов аспирант, кафедра биологии и биоинформатики, МГУТУ им. Разумовского, Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, makhovsm@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-9626-4689>

Information about authors

Sergey M. Makhov PhD student, biology and bioinformatics department, Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Zemlyanoy Val, 73, Moscow, 109004, Russia, makhovsm@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-9626-4689>

Вклад авторов

Сергей М. Махов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Sergey M. Makhov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 22/04/2025
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 22/04/2025

Разработка технологии получения безлактозного альбумина

Алексей В. Вернер	¹	werneralexey@mail.ru	 0000-0003-2086-5231
Ольга В. Чугунова	¹	chugun.ova@ya.ru	 0000-0002-7039-4047
Дмитрий В. Гращенко	¹	dmitriygr99@mail.ru	 0000-0001-8956-4934
Екатерина В. Пастушкова	¹	pas-ekaterina@ya.ru	 0000-0001-6992-1201
Дмитрий И. Девяткин	¹	devyatkin@mail.ru	 0000-0002-5457-1613

¹ Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия

Аннотация. К современной тенденции развития молочной промышленности относится поиск оптимальных способов производства безлактозной продукции в условиях стабильно высокого спроса у людей с непереносимостью лактозы и низких объемов отечественного производства. К эффективному с экономической и технологической точки зрения методу относится производство молочных аналогов с использованием вторичных ресурсов. Целью исследования является разработка способа получения безлактозной молочной продукции с получением безлактозного альбумина из молочной сыворотки. Оценивалась эффективность подобранной технологии ферментативного гидролиза β -галактозидазы лактозы образцов подсырной и творожной сыворотки по показателю степени гидролиза и влияние данного процесса на органолептические, микробиологические и физико-химические показатели выделяемого альбумина, проводилось сравнение показателей с изготовленным в лабораторных условиях безлактозным творогом. В результате проведенных исследований установлено, что вид используемой молочной сыворотки не влияет на качество выделяемого безлактозного альбумина, имеющего лучшие показатели структуры по сравнению с безлактозным творогом, таким образом его можно использовать в производстве вязких или липких компонентов без потери структурно-механических свойств готовой продукции, с момента получения срок годности альбумина составляет 72 часа при температуре $4 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности не менее 95%. Сравнение с безлактозным творогом показало, что альбумин имеет более рыхлую структуру, меньшую жирность ($< 1\%$) и сопоставимое содержание белка ($\sim 10\%$). При этом его влагосвязывающая способность на 5–6% ниже, а вязкость позволяет использовать его в производстве продуктов с добавлением фруктовых или овощных пюре без потери структурных свойств. На основании проведенных исследований разработана и запатентована (№ 2023106023 от 13.03.2023) технология производства безлактозного альбумина, который может применяться в пищевой промышленности для создания специализированных продуктов для людей с лактазной недостаточностью.

Ключевые слова: безлактозный альбумин, безлактозная продукция, безлактозный творог, молочная сыворотка, β -галактозидаза.

Development of technology for the production of lactose-free albumin

Alexey V. Werner	¹	werneralexey@mail.ru	 0000-0003-2086-5231
Olga V. Chugunova	¹	chugun.ova@ya.ru	 0000-0002-7039-4047
Dmitry V. Grashchenkov	¹	dmitriygr99@mail.ru	 0000-0001-8956-4934
Ekaterina V. Pastushkova	¹	pas-ekaterina@ya.ru	 0000-0001-6992-1201
Dmitry I. Devyatkin	¹	devyatkin@mail.ru	 0000-0002-5457-1613

¹ Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia

Abstract. The current trend in the development of the dairy industry includes the search for optimal ways to produce lactose-free products in conditions of consistently high demand from people with lactose intolerance and low volumes of domestic production. The economically and technologically effective method includes the production of dairy analogues using secondary resources. The aim of the study is to develop a method for producing lactose-free dairy products with the production of lactose-free albumin from whey. The effectiveness of the selected technology of enzymatic hydrolysis of beta-galactosidase lactose of samples of subcutaneous and curd whey was evaluated according to the degree of hydrolysis and the effect of this process on the organoleptic, microbiological and physico-chemical parameters of the released albumin, and the indicators were compared with lactose-free cottage cheese made in the laboratory. As a result of the conducted research, it was found that the type of whey used does not affect the quality of the lactose-free albumin released, which has better structural parameters compared to lactose-free cottage cheese, thus it can be used in the production of viscous or sticky components without loss of structural and mechanical properties of the finished product, from the moment of receipt, the shelf life of albumin is 72 hours at a temperature of $4 \pm 2^\circ\text{C}$ and humidity of at least 95%. Comparison with lactose-free cottage cheese showed that albumin has a looser structure, lower fat content ($< 1\%$) and comparable protein content ($\sim 10\%$). At the same time, its moisture-binding capacity is 5–6% lower, and its viscosity allows it to be used in the production of products with the addition of fruit or vegetable puree without losing its structural properties. Based on the research conducted, a technology for the production of lactose-free albumin was developed and patented (No. 2023106023 dated 13.03.2023), which can be used in the food industry to create specialized products for people with lactase deficiency.

Keywords: lactose-free albumin, lactose-free products, lactose-free cottage cheese, whey, β -galactosidase.

Для цитирования

Вернер А.В., Чугунова О.В., Гращенко Д.В., Пастушкова Е.В., Девяткин Д.И. Разработка технологии получения безлактозного альбумина // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 79–86. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-79-86

For citation

Werner A.V., Chugunova O.V., Grashchenkov D.V., Pastushkova E.V., Devyatkin D.I. Development of technology for the production of lactose-free albumin. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 79–86. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-79-86

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

Введение

Для разработки рационов питания для детей с непереносимостью лактозы необходимо либо исключать продукты, содержащие лактозу, либо заменять их на безлактозные молочные аналоги, так как альтернативные молоку растительные варианты не могут полноценно заменить по ряду технологических и пищевых характеристик [1–4]. Современные тренды здорового питания так же показывают интерес взрослого населения к безлактозным молочным продуктам, употребление которого исключает возникновение негативных последствий при отсутствии достаточного пищеварительного фермента для усвоения лактозы [5], при этом производимые аналоги не должны уступать по качеству традиционным наименованиям продукта [6].

Исходя из роста производства молочной сыворотки как побочного продукта при изготовлении различных молочных продуктов можно сделать вывод, что вопросы ее переработки занимают одни из лидирующих позиций и требуют разнообразных решений для ее использования [7–9].

На основании вышеперечисленных фактов разработка безлактозного альбумина из молочной сыворотки и изготовление из нее готовой безлактозной продукции с использованием современных информационных технологий является актуальной задачей [10,11].

Цель исследования – разработка способа получения безлактозного альбумина из молочной сыворотки и разработка рецептур безлактозных готовых блюд (изделий) на ее основе.

Для достижения поставленной цели исследований были поставлены следующие задачи:

1. изучить рынок безлактозной продукции представленный в торговых сетях города Екатеринбург;
2. разработать способ получения безлактозного альбумина из молочной сыворотки ферментативным способом, провести сравнение показателей с безлактозным творогом.

Материалы и методы.

Теоретические и экспериментальные исследования выполнялись в период с 2020 по 2024 г. на кафедре технологии питания ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет».

Для разработки технологии изготовления безлактозного альбумина использовали следующие сырье и материалы:

– сыворотка молочная, полученная после изготовления твердого сыра типа «Российский» и после изготовления творога, соответствующие требованиям ГОСТ 34352–2017;

– ферментный препарат β -галактозидазы Mayalact® 5000 (изготовитель Mayasan biotech, Турция, импортер ООО «Эдванта», г. Екатеринбург, Россия).

Для проведения исследований, сравнения показателей с безлактозным альбумином и проектирования рецептур безлактозной молочной продукции в связи со сложностью приобретения было принято решение самостоятельно изготавливать безлактозный творог:

– молоко питьевое безлактозное ультрапастеризованное 3,5% жирности, соответствующее требованиям ТУ 10.51.11.070–00425662–2019 (АО «Белгородский молочный комбинат», г. Белгород, Россия);

– закваска для творога, соответствующая требованиям ТУ 10.89.19–001–18137828–2021 (ООО «ВИВО Индустрия», г. Москва, Россия).

При выполнении экспериментальной части работы использовали общепринятые методы физико-химических, органолептических, микробиологических исследований как в исходном сырье, так и в готовой продукции [12, 13].

Результаты и обсуждение

В рамках решения первой задачи проведен анализ ассортимента безлактозных продуктов в крупных торговых сетях города Екатеринбург. За 2020–2022 года был изучен ассортимент безлактозного молока в городе Екатеринбург (альтернативные, на основе растительных компонентов, виды молока не рассматривались), представлен на рисунке 1.

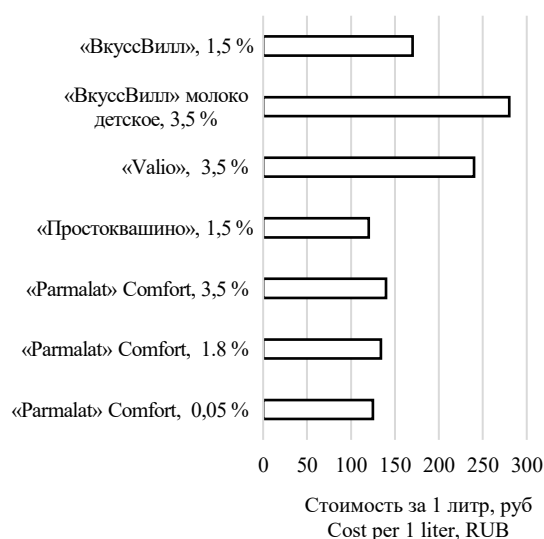


Рисунок 1. Ассортимент безлактозного молока, представленный в городе Екатеринбург

Figure 1. The range of lactose-free milk presented in the city of Yekaterinburg

Установлен узкий ассортимент безлактозных молочных продуктов, который представлен в основном в крупных торговых сетях, а также высокая стоимость (от 80 до 300%) по отношению к классическим вариантам, содержащим лактозу, что обосновывает целесообразность разработки безлактозного альбумина из молочной сыворотки. Безлактозные творог, сметана, сливочное масло были найдены только на полках магазина «ВкусВилл», безлактозный кефир найден не был [14].

В рамках решения второй задачи разработан способ получения безлактозного альбумина из свежей молочной сыворотки. За основу взята традиционная технология получения альбумина, включающая четыре этапа: нагрев до 93–95 °С, увеличение pH кислотной, например, лимонной до значения 4,5–4,6, выдержка в течение 60 минут, фильтрация полученных альбуминных хлопьев. (схему)

Для гидролиза лактозы использовался жидкий фермент β -галактозидаза производства Mayasan biotech Mayalact® 5000 получаемый путем ферментации дрожжей *Kluveromyces lactis* [15, 16]. Показана важность уровня pH

на протяжении всего процесса ферментации, молочная сыворотка в зависимости от происхождения обладает различной степенью pH, для поддержки и оценки оптимального уровня pH на уровне 6,6–6,8 для проведения ферментативного гидролиза использовалась автоматическая установка автотитратора с введением 20% раствора гидроксида кальция [17, 18].

В эксперименте варьировались количество вводимого фермента и время выдержки. Примеры образцов, взятых для исследования и результаты исследования степени гидролиза лактозы представлены в таблице 1 [19].

Исходя из полученных результатов установлены оптимальные параметры для проведения гидролиза лактозы в молочной сыворотке (степень гидролиза лактозы 95–96%):

- температура 37 ± 1 °С;
- продолжительность 4 часа;
- количество вносимого фермента 0,1 г на 100 г сыворотки.

Технологический процесс получения безлактозного альбумина из молочной сыворотки представлен на рисунке 2.

Таблица 1.

Модельные образцы молочной сыворотки, взятые для исследования

Table 1.

Model samples of whey taken for research

Вид исходного сырья Raw material	Подсырная сыворотка Cheese whey						Творожная сыворотка Curd whey					
Количество вносимого фермента на 1 литр сыворотки, г Amount of enzyme added per 1 liter of whey, g	0,5		1,0		1,5		0,5		1,0		1,5	
Температура выдержки, °С Holding temperature, °C	37		37		37		37		37		37	
Время выдержки, час Holding time, hours	3,5	4,0	3,5	4,0	3,5	4,0	3,5	4,0	3,5	4,0	3,5	4,0
Степень гидролиза лактозы, % Degree of lactose hydrolysis, %	73±1		89±1		95±1		70±1		90±1		96±1	

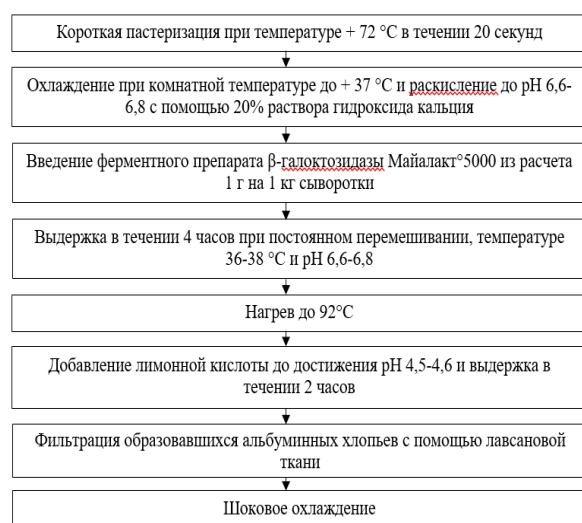


Рисунок 2. Технология получения безлактозного альбумина из молочной сыворотки

Figure 2. Technology to produce lactose-free albumin from whey

Предложенное технологическое решение позволяет получить безлактозный альбумин от 62 до 73% сухой массы молочной сыворотки, органолептическая оценка (таблица 3) и физико-химические показатели полученного безлактозного альбумина представлены на рисунке 3.

Проведенные исследования показывают, что вид молочной сыворотки не влияет на органолептические и физико-химические показатели, продукт можно отнести к безлактозному так как содержание лактозы не более 0,1 г на 1 кг продукта [20].

Результаты исследования органолептических и микробиологических показателей приведены в таблице 2 и 3.

Таблица 2.
Органолептическая оценка полученного
безлактозного альбумина из двух видов
сыворотки

Table 2.
Organoleptic evaluation of the obtained lactose-
free albumin from two types of serum

Показатель Index	Безлактозный альбумин Lactose-free albumin	
	из подсырной сыворотки cheese whey	из творожной сыворотки curd whey
Внешний вид Appearance	пастообразная масса pasty mass	
Консистенция Consistency	нежная, мажущаяся delicate, spreadable	
Цвет Color	белый, слегка с кремовым оттенком, равномерный	белый, равномерный
Запах Smell	характерный для альбумина, молочный, без посторонних запахов characteristic of albumin, milky, without foreign odors	
Вкус Taste	характерный для альбумина, слегка сладковатый, без посторонних привкусов characteristic of albumin, slightly sweet, without foreign flavors	характерный для альбумина, сладковатый, с небольшой кислинкой без посторонних привкусов characteristic of albumin, sweet, with a slight soumess without foreign flavors

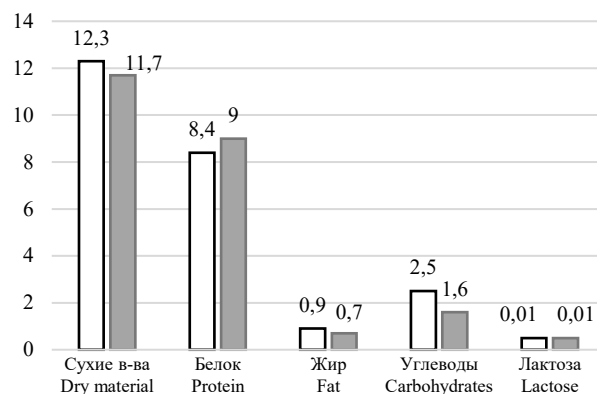


Рисунок 3. Физико-химические показатели безлактозного альбумина из двух видов сыворотки, %

Figure 3. Physico-chemical parameters of lactose-free albumin from two types of serum, %

Таблица 3.
Результаты микробиологического исследования безлактозного альбумина

Table 3.

Results of microbiological examination of lactose-free albumin

Показатель Index	Вид безлактозного альбумина Type of lactose-free albumin	День Day				Норма Norm
		1 (24 ч)	2 (48 ч)	3 (72 ч)	4 (96 ч)	
Микробиологические показатели Values						
КМАФАнМ, КОЕ/г QMAFAnM, CFU/g	из подсырной сыворотки from cheese whey	1 × 10 ²	1,3 × 10 ²	1,6 × 10 ²	1,9 × 10 ²	2 × 10 ⁵
	из творожной сыворотки from curd whey	1 × 10 ²	1,1 × 10 ²	1,3 × 10 ²	1,5 × 10 ²	
Бактерии группы кишечных палочек Bacteria of the coliform group	из подсырной сыворотки from cheese whey	в 0,1 г образца не обнаружены in 0.1 g of sample not detected				не допускается в 0,1 г продукта not allowed
	из творожной сыворотки from curd whey					
<i>S. aureus</i>	из подсырной сыворотки from cheese whey	в 25 г образца не обнаружены in 25 g of sample not detected				не допускается в 25 г продукта not allowed
	из творожной сыворотки from curd whey					
Бактерии рода <i>Proteus</i>	из подсырной сыворотки from cheese whey	в 0,1 г образца не обнаружены in 0.1 g of sample not detected				не допускается в 0,1 г продукта not allowed

Установлены сроки годности полученного безлактозного альбумина – 72 часа (3 суток) с момента окончания технологического процесса при температуре 4 ± 2 °C и влажности не менее 95%.

Для сравнения показателей качества безлактозного альбумина и безлактозного творога был изготовлен творог из безлактозного молока «Parmalat Comfort» жирностью 3,2% путем внесения закваски, согласно классической технологии. Химический состав и органолептические показатели полученного творога представлен в таблице 5 и 6 соответственно.

Таблица 4.
Химический состав безлактозного творога

Table 4.

Chemical composition of lactose-free cottage cheese

Массовая доля, % Mass fraction, %	Значение Value
Сухие вещества, % Dry matter, %	$24,80 \pm 0,02$
Белок, % Protein, %	$10,05 \pm 0,02$
Жир, % Fat, %	$10,26 \pm 0,04$
Углеводы, % Carbohydrates, %	$2,62 \pm 0,03$

Таблица 5.
Органолептические показатели
безлактозного творога

Table 5.
Organoleptic characteristics of lactose-free
cottage cheese

Показатель Index	Значение Value
Консистенция Consistency	Мягкая, мажущаяся Soft, spreadable
Цвет Color	Белый, равномерный White, uniform
Запах Smell	Характерный для кисломолочного продукта, без постороннего запаха Characteristic of a fermented milk product, without foreign smell
Вкус Taste	Характерный для творога, слегка сладковатый, без постороннего привкуса Characteristic of cottage cheese, slightly sweet, without foreign taste

Установлено что безлактозный творог, полученный из безлактозного молока классическим способом, имеет приятные органолептические показатели, которые можно приравнять к органолептическим показателям мягкого творога промышленного производства.

Полученный безлактозный творог содержит практически равное количество белка и жира – 10,05 и 10,26 г соответственно.

Полученный альбумин имеет низкое содержание жира < 1%, по отношению к творогу, содержание белка и углеводов находятся примерно на одинаковом уровне, разница по белку менее 1,7% по углеводам не более 1,1%.

На рисунке 5 приведено сравнение влаго-связывающей способности полученного безлактозного альбумина и безлактозного творога.

Установлено что влагосвязывающая способность безлактозного альбумина на 5–6% меньше чем в безлактозном твороге.

Исследование вязкости производили с помощью ротационного вискозиметра «Реотест-2», зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для полученного безлактозного альбумина и безлактозного творога представлена на в таблице 6.

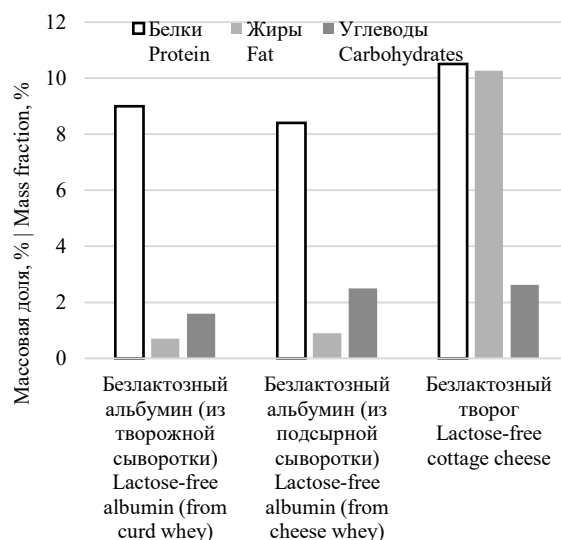


Рисунок 4. Сравнение массовой доли жира, полученного безлактозного альбумина и безлактозного творога
Figure 4. Comparison of the mass fraction of fat obtained from lactose – free albumin and lactose-free cottage cheese

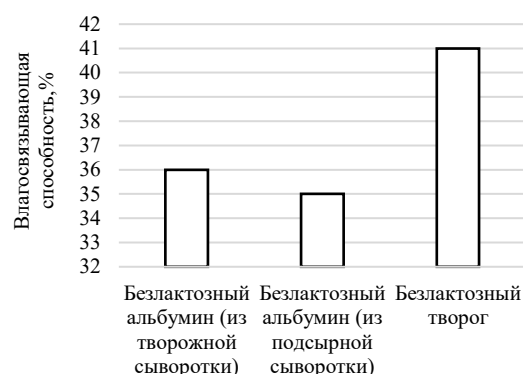


Рисунок 5. Сравнение влаго-связывающей способности безлактозного альбумина и безлактозного творога
Figure 5. Comparison of the moisture binding capacity of lactose-free albumin and lactose-free cottage cheese

Таблица 6.
Зависимость эффективной вязкости безлактозного альбумина и безлактозного творога
от градиента скорости

Table 6.
Dependence of the effective viscosity of lactose-free albumin and lactose-free cottage cheese
on the rate gradient

Значение градиента скорости, с ⁻¹ Velocity gradient value, s ⁻¹	Эффективная вязкость Effective viscosity, Па × с × 10 ⁻²		
	Безлактозный альбумин (из творожной сыворотки) Lactose-free albumin (from curd whey)	Безлактозный альбумин (из подсырной сыворотки) Lactose-free albumin (from cheese whey)	Безлактозный творог Lactose-free curd
0,0333	45,780 ± 2,100	43,560 ± 2,088	50,803 ± 2,246
1,0000	17,600 ± 0,833	17,130 ± 0,750	18,060 ± 0,870
3,0000	5,990 ± 0,278	5,890 ± 0,277	6,355 ± 0,310
9,0000	2,088 ± 0,125	2,010 ± 0,121	2,190 ± 0,105
27,0000	0,730 ± 0,045	0,700 ± 0,059	0,732 ± 0,066
48,6000	0,469 ± 0,018	0,436 ± 0,022	0,420 ± 0,020
81,0000	0,279 ± 0,015	0,277 ± 0,016	0,298 ± 0,013
145,8000	0,173 ± 0,007	0,172 ± 0,008	0,174 ± 0,008

Заключение

Установлено, что безлактозный альбумин имеет более рыхлую и воздушную структуру по отношению к безлактозному творогу, благодаря чему в альбумин можно добавлять большее количество вязких или липких компонентов, например, сладких фруктовых или овощных пюре без потери структурно-механических свойств готовых блюд (изделий) на его основе.

На основании результатов исследований была составлена заявка и получен патент № 2023106023 от 13.03.2023 на разработку способа производства безлактозного альбумина, который может быть использован в качестве сырья для изготовления готовой продукции для питания людей с непереносимостью лактозы.

Литература

- 1 Looijesteijn E., Janssen Duijghuijsen L., van den Belt M., et al. Daily Lactose Supplementation in Lactase Non-Persistent Individuals Induces Colonic Adaptation and Reduces Intolerance Symptoms // The 14th European Nutrition Conference FENS 2023. 2023. Vol. 91. No. 1. Art. 47. doi: 10.3390/proceedings2023091047.
- 2 Рождественская Л.Н., Романенко С.П., Чугунова О.В. Перспективы нутриентного профилирования для профилактики заболеваний и укрепления здоровья // Индустрия питания | Food Industry. 2023. Т. 8. № 2. С. 63–72. doi: 10.29141/2500–1922–2023–8–2–7.
- 3 Darma A., Sumitro K.R., Jo J., Sitorus N. Lactose Intolerance versus Cows Milk Allergy in Infants: a Clinical Dilemma // Nutrients. 2024. Vol. 16. No. 3. Art. 414. doi: 10.3390/nu16030414.
- 4 Гращенков Д.В., Дубенко С.Э., Чугунова О.В. Применение методов математического моделирования при разработке рационов заданной пищевой ценности // Индустрия питания | Food Industry. 2023. Т. 8. № 1. С. 84–91. doi: 10.29141/2500–1922–2023–8–1–9.
- 5 Storhaug C.L., Fosse S.K., Fadnes L.T. Country, Regional, and Global Estimates for Lactose Malabsorption in Adults: a Systematic Review and Meta-Analysis // The Lancet Gastroenterology & Hepatology. 2017. Vol. 2. Iss. 10. P. 738–746. doi: 10.1016/s2468–1253(17)30154–1.
- 6 Девяткин Д.И., Меренкова С.П. Технологические особенности применения нетрадиционных компонентов в рецептуре хлеба обновленного ассортимента // Молодой исследователь: материалы 9-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов, Челябинск, 18–19 мая 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. С. 91–96.
- 7 Andić S., Oğuz Ş. Lactose and Lactose Derivatives // Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2022. Vol. 10. No. 6. P. 1130–1137. doi: 10.24925/turjaf.v10i6.1130–1137.4935.
- 8 Hodges J., Cao S., Cladis D., Weaver C. Lactose Intolerance and Bone Health: the Challenge of Ensuring Adequate Calcium Intake // Nutrients. 2019. Vol. 11, Iss. 4. Art. 718. doi: 10.3390/nu11040718.
- 9 Heyman M.B. Lactose Intolerance in Infants, Children, and Adolescents // Pediatrics. 2006. Vol. 118. Iss. 3. P. 1279–1286. doi: 10.1542/peds.2006–1721.
- 10 Горлова А.И., Ильина А.М. Физиологическая роль лактозы нативного и гидролизованного молока: обзор // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 2(92). С. 57–61. doi: 10.20914/2310–1202–2022–2–57–61.
- 11 Mukhanbetzhanov N.A., Mukhanbetzhanova Zh.Ye., Kozhakhmetov S.S., Kushugulova A.R. The Role of Probiotics in the Modulation of Intestinal Microbiota in Lactose Intolerance // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Биологические науки. 2023. No. 4(145). P. 86–96. doi: 10.32523/2616–7034–2023–145–4–86–96.
- 12 Li A., Zheng J., Han X., et al. Advances in Low-Lactose/Lactose-Free Dairy Products and Their Production // Foods. 2023. Vol. 12. Iss. 13. Art. 2553. doi: 10.3390/foods12132553.
- 13 Хелеф М.Э.А., Голубцова Ю.В., Иванова С.А. Безлактозные молочные продукты: перспективы производства // Новые технологии. 2022. Т. 18. № 3. С. 94–105. doi: 10.47370/2072–0920–2022–18–3–94–105.
- 14 Dekker P.J.T., Koenders D., Bruins M.J. Lactose-Free Dairy Products: Market Developments, Production, Nutrition and Health Benefits // Nutrients. 2019. Vol. 11. P. 551. doi: 10.3390/nu11030551.
- 15 Букуру Л.К., Скворцов Е.В., Багаева Т.В., Канарская З.А. Эффективность применения β-галактозидазы для получения низколактозного напитка на основе молочной сыворотки // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 13. С. 117–119.
- 16 Hidalgo-Fuentes B., de Jesús-José E., Cabrera-Hidalgo A. de J., et al. Plant-Based Fermented Beverages: Nutritional Composition, Sensory Properties, and Health Benefits // Foods. 2024. Vol. 13. Iss. 6. Art. 844. doi: 10.3390/foods13060844.
- 17 Горлов И.Ф., Сложенкина М.И., Мосолова Н.И. и др. Физико-химические показатели молока, произведенного в условиях промышленной технологии // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1(69). С. 360–368. doi: 10.32786/2071–9485–2023–01–39.
- 18 Ходяшев Н.Б., Вихарева Е.А., Ратников Е.А. Исследование влияния отдельных факторов на ферментативный гидролиз лактозы молочной сыворотки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2019. № 4. С. 26–35. doi: 10.15593/2224–9400/2019.4.03.
- 19 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619332, Российская Федерация. Расчет лактозы в сырье и готовой продукции / Гращенков Д.В., Сова Е.В., Тляумбетова М.В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный экономический университет" (УрГЭУ). № 2019618245; заявл. 05.07.2019; опубл. 16.07.2019.

20 Welna M., Szymczycha-Madeja A., Lesniewicz A., et al. The Nutritional Value of Plant Drink against Bovine Milk – Analysis of the Total Concentrations and the Bio-Accessible Fraction of Elements in Cow Milk and Plant-Based Beverages // Processes. 2024. Vol. 12. Iss. 1. Art. 231. doi: 10.3390/pr12010231.

References

- 1 Looijesteijn E., JanssenDuijghuijsen L., van den Belt M. et al. Daily Lactose Supplementation in Lactase Non-Persistent Individuals Induces Colonic Adaptation and Reduces Intolerance Symptoms. The 14th European Nutrition Conference FENS 2023. 2023. vol. 91. no. 1. Art.47. doi:10.3390/proceedings2023091047
- 2 Rozhdestvenskaya L.N., Romanenko S.P., Chugunova O.V. Prospects of nutrient profiling for disease prevention and health promotion. Food industry. 2023. vol. 8. no. 2. pp. 63–72. doi:10.29141/2500–1922–2023–8–2–7 (in Russian)
- 3 Darma A., Sumitro K.R., Jo J., Sitorus N. Lactose Intolerance versus Cows Milk Allergy in Infants: a Clinical Dilemma. Nutrients. 2024. vol. 16. no. 3. Art. 414. doi:10.3390/nu16030414
- 4 Grashchenkov D.V., Dubenko S.E., Chugunova O.V. Application of mathematical modeling methods in the development of diets of a given nutritional value. Food industry. 2023. vol. 8. no. 1. pp. 84–91. doi:10.29141/2500–1922–2023–8–1–9 (in Russian)
- 5 Storhaug C.L., Fosse S.K., Fadnes L.T. Country, Regional, and Global Estimates for Lactose Malabsorption in Adults: a Systematic Review and Meta-Analysis. The Lancet Gastroenterology & Hepatology. 2017. vol. 2. no. 10. pp. 738–746. doi: 10.1016/s2468–1253(17)30154–1
- 6 Devyatkin D.I., Merenkova S.P. Technological features of the use of non-traditional components in the formulation of bread of the updated assortment. Young researcher: materials of the 9th scientific exhibition-conference of scientific, technical and creative works of students. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2022. pp. 91–96. (in Russian)
- 7 Andiç S., Oğuz Ş. Lactose and Lactose Derivatives. Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2022. vol. 10. no. 6. pp. 1130–1137. doi:10.24925/turjaf.v10i6.1130–1137.4935
- 8 Hodges J., Cao S., Cladis D., Weaver C. Lactose Intolerance and Bone Health: the Challenge of Ensuring Adequate Calcium Intake. Nutrients. 2019. vol. 11. no. 4. Art. 718. doi:10.3390/nu11040718
- 9 Heyman M.B. Lactose Intolerance in Infants, Children, and Adolescents. Pediatrics. 2006. vol. 118. no. 3. pp. 1279–1286. doi:10.1542/peds.2006–1721
- 10 Gorlova A.I., Ilyina A.M. The physiological role of lactose in natural and hydrolyzed milk: a review. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. vol. 84. no. 2(92). pp. 57–61. doi:10.20914/2310–1202–2022–2–57–61 (in Russian)
- 11 Mukhanbetzhanov N.A., Mukhanbetzhanova Zh.Ye., Kozhakhmetov S.S., Kushugulova A.R. The role of probiotics in the modulation of intestinal microbiota in lactose intolerance. Bulletin of the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov. Series: Biological Sciences. 2023. no. 4(145). pp. 86–96. doi:10.32523/2616–7034–2023–145–4–86–96 (in Russian)
- 12 Li A., Zheng J., Han X. et al. Advances in Low-Lactose/Lactose-Free Dairy Products and Their Production. Foods. 2023. vol. 12. no. 13. Art. 2553. doi:10.3390/foods12132553
- 13 Khelef M.E.A., Golubtsova Yu.V., Ivanova S.A. Lactose-free dairy products: production prospects. New technologies. 2022. vol. 18. no. 3. pp. 94–105. doi:10.47370/2072–0920–2022–18–3–94–105 (in Russian)
- 14 Dekker P.J.T., Koenders D., Bruins M.J. Lactose-Free Dairy Products: Market Developments, Production, Nutrition and Health Benefits. Nutrients. 2019. vol. 11. pp. 551. doi:10.3390/nu11030551
- 15 Bukuru L.K., Skvortsov E.V., Bagaeva T.V., Kanarskaya Z.A. The effectiveness of the use of β -galactosidase to produce a low-lactose drink based on whey. Bulletin of the Technological University. 2017. vol. 20. no. 13. pp. 117–119. (in Russian)
- 16 Hidalgo-Fuentes B., de Jesús-José E., Cabrera-Hidalgo A. de J. et al. Plant-Based Fermented Beverages: Nutritional Composition, Sensory Properties, and Health Benefits. Foods. 2024. vol. 13. no. 6. Art. 844. doi:10.3390/foods13060844
- 17 Gorlov I.F., Slozhenkina M.I., Mosolova N.I. et al. Physico-chemical parameters of milk produced under the conditions of industrial technology. Izvestiya Nizhnevolzhsky agrouniversitetskiy complex: Science and higher professional education. 2023. no. 1(69). pp. 360–368. doi:10.32786/2071–9485–2023–01–39 (in Russian)
- 18 Khodyashev N.B., Vikhareva E.A., Ratnikov E.A. Investigation of the influence of individual factors on the enzymatic hydrolysis of lactose in whey. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology. 2019. no. 4. pp. 26–35. doi:10.15593/2224–9400/2019.4.03 (in Russian)
- 19 Grashchenkov D.V., Sova E.V., Tlyumbetova M.V. Certificate of state registration of the computer program No. 2019619332 Russian Federation. Calculation of lactose in raw materials and finished products: No. 2019618245: application 05.07.2019: publ. 16.07.2019. applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ural State University of Economics" (USUE). (in Russian)
- 20 Welna M., Szymczycha-Madeja A., Lesniewicz A. et al. The Nutritional Value of Plant Drink against Bovine Milk – Analysis of the Total Concentrations and the Bio-Accessible Fraction of Elements in Cow Milk and Plant-Based Beverages. Processes. 2024. vol. 12. no. 1. Art. 231. doi:10.3390/pr12010231

Сведения об авторах

Алексей В. Вернер аспирант, кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия, werneralexei@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2086-5231>

Ольга В. Чугунова д.т.н., профессор, 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>

Дмитрий В. Гращенко к.т.н., доцент, кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия, dmitriygr99@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8956-4934>

Екатерина В. Пастушкова д.т.н., доцент, кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия, pas-ekaterina@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6992-1201>

Дмитрий И. Девяткин аспирант, кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, г. Екатеринбург, 620144, Россия, devyatkdin@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5457-1613>

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

Alexey V. Werner graduate student, Department of Food Technology, Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia, werneralexei@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2086-5231>

Olga V. Chugunova Dr. Sci. (Engin.), professor, Department of Food Technology, 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>

Dmitry V. Grashchenkov Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Food Technology, Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia, dmitriygr99@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8956-4934>

Ekaterina V. Pastushkova Dr. Sci. (Engin.), assistant professor, Department of Food Technology, Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia, pas-ekaterina@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6992-1201>

Dmitry I. Devyatkin graduate student, Department of Food Technology, Ural State University of Economics, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, Yekaterinburg, 620144, Russia, devyatkdin@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5457-1613>

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 01/04/2025	После редакции 18/05/2025	Принята в печать 25/05/2025
Received 01/04/2025	Accepted in revised 18/05/2025	Accepted 25/05/2025

Тенденции и перспективы развития интеллектуальной собственности в биотехнологиях и пищевых технологиях: анализ данных университетского центра трансферов технологий

Альбина О. Сапронова¹ sapronova.ao@dvfu.ru  0000-0001-7514-2829

¹ Дальневосточный федеральный университет, д. 10, п. Аякс, г. Владивосток, Приморский край, 690022, Россия

Аннотация. В представленном материале освещается анализ тенденции развития интеллектуальной собственности в сфере биотехнологий, в том числе пищевых технологий, и биоэкономики. Выявлены ключевые тенденции патентной активности и динамики объектов интеллектуальной собственности, что позволит понять эффективность научной деятельности университета и его вклад в развитие биоэкономики, решить проблему оценки эффективности научной деятельности университета через интеллектуальную собственность. Получены данные с 2020 по 2024 годы по всем объектам интеллектуальной собственности в сфере биотехнологий, пищевых технологий Дальневосточного федерального университета. Сформулированы следующие выводы: несмотря на спад в течение пятилетнего периода в динамике регистрации новых объектов интеллектуальной собственности, основу патентов составляют объекты интеллектуальной собственности в области пищевой технологии и биотехнологии, также растет количество свидетельств на ЭВМ и базы данных в области биоэкономики. Сделан вывод, действительно, существует, сопоставимая с общенациональной, тенденция к увеличению количества объектов интеллектуальной собственности в сфере биотехнологий и биоэкономики в университете, так, пищевые науки лидируют в общей доле зарегистрированных патентов, что возможно связано как со сложившейся культурой особого внимания к патентованию, но и также с развитием пищевых технологий и биотехнологии в университете и в стране в целом. Данная работа будет полезна исследователям, занимающимся вопросами инноваций и коммерциализации научных достижений, а также специалистам в области биотехнологий и пищевой промышленности.

Ключевые слова: биотехнология, пищевая технология, биоэкономика, интеллектуальная собственность, экономика пищевых систем.

Trends and prospects for the development of intellectual property in biotechnology and food technologies: an analysis of university's centres technology transfers

Albina O. Sapronova¹ sapronova.ao@dvfu.ru  0000-0001-7514-2829

¹ Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay., Vladivostok, 690022, Russia

Abstract. The presented material highlights the analysis of trends in the development of intellectual property in the field of biotechnology, including food technologies and bioeconomy. Key trends in patent activity and dynamics of intellectual property objects have been identified, which will help to understand the effectiveness of the university's scientific activities and its contribution to the development of the bioeconomy, as well as address the problem of assessing the effectiveness of the university's scientific activities through intellectual property. The author obtained data from 2020 to 2024 on all intellectual property objects in the fields of biotechnology and food technology at Far Eastern Federal University, a leading university in the Eurasian region. The following conclusions were drawn: despite a decline over the five-year period in the registration of new intellectual property objects, patents are primarily based on intellectual property in the areas of food technology and biotechnology, with an increase also seen in certificates for computer programs and databases in the field of bioeconomy. It was concluded that there is indeed a trend comparable to the national one towards increasing the number of intellectual property objects in the fields of biotechnology and bioeconomy within the university, with food sciences leading in terms of registered patents, possibly due to both the established culture of paying special attention to patenting and the development of food technologies and biotechnology within the university and the country as a whole. The article will be useful to researchers dealing with issues of innovation and commercialization of scientific achievements, as well as specialists in the fields of biotechnology and food industry.

Keywords: biotechnology, food technology, bioeconomics, intellectual property, food systems economics.

Введение

Мировая патентная активность растет от года в год, в том числе в области пищевой и биотехнологии, и наша страна стабильно входит в топ-10 по активности патентования,

а также по расходам на интеллектуальную собственность, однако незначительно отстает по коммерциализации объектов интеллектуальной собственности [1].

Для цитирования

Сапронова А.О. Тенденции и перспективы развития интеллектуальной собственности в биотехнологиях и пищевых технологиях: анализ данных университетского центра трансферов технологий // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 87–94. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-87-94

For citation

Sapronova A.O. Trends and prospects for the development of intellectual property in biotechnology and food technologies: an analysis of university's centres technology transfers. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 87–94. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-87-94

На сегодняшний день в России можно заметить значительный научный прогресс в области биотехнологии, что связано с особым вниманием к развитию здоровьесберегающих технологий на государственном уровне в соответствии со Стратегией научно-технического развития РФ до 2030 г.

Существующий фокус на биотехнологиях отражает глобальный тренд, признающий потенциал данной области для решения актуальных проблем человечества, таких как здоровье, продовольственная безопасность и экологическая устойчивость [2]

В частности, вопросы питания, разработки технологии продуктов питания отнесены к важнейшим инструментам решения острой проблемы оптимизации здоровья населения [3] согласно Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, Стратегии повышения качества пищевых продуктов 2030 года.

Эти стратегические инициативы способствуют формированию благоприятных условий для реализации крупных научных проектов в области биотехнологий и стимулируют рост научного потенциала российских университетов и научно-исследовательских институтов [7]. Одной из важнейших метрик оценки успеха в развитии биотехнологий является количество зарегистрированных патентов, отражающее уровень инновационной активности и конкурентоспособность национальной науки [4].

В связи с этим существует тенденция к росту числа зарегистрированных патентов, относящихся к области биотехнологии, выступающих как маркер результативности труда, повышения эффективности научной деятельности и развития промышленности [6].

Так, по оценкам экспертов, пищевая промышленность является лидером по количеству зарегистрированных патентов среди всех отраслей реального сектора экономики [7].

Все вышеперечисленное указывает на наличие предпосылок для роста числа зарегистрированных объектов интеллектуальной собственности, относящихся к области биотехнологии, университетов России – драйверов современной отечественной науки и на необходимость проанализировать наличие соответствующей тенденции в ведущем университете Дальнего Востока – Дальневосточном федеральном университете (ДВФУ) [5].

Цель исследования – оценка патентной активности Дальневосточного федерального университета в области биотехнологий и пищевых технологий, а также выявлении тенденций,

влияющих на эффективность научной деятельности университета в данных областях.

Материалы и методы

Исследование проведено с использованием общенаучных и специальных научных методов, в том числе метода сравнительного анализа, интерпретирования результатов анализа, а также методов анализа баз и массивов данных. Проанализированы объекты интеллектуальной собственности, зарегистрированные в государственных реестрах РФ за полные 5 лет с 2020 по 2024 годы, с использованием открытого реестра и открытой базы данных федерального института промышленной собственности (далее – ФИПС), открытой базе данных объектов интеллектуальной собственности департамента инновационной деятельности и центра трансфера технологий ДВФУ и данных зарегистрированных лицензионных соглашений на использования интеллектуальной собственности в реальном секторе экономики [5], а также проведен контент-анализ и обобщение данных научной литературы по ключевым запросам, отражающих тему исследования, в открытых базах данных e-Library, E.lanbook, Scopus, биотехнологических журналах.

Результаты

Согласно определению «Европейской федерации биотехнологии» биотехнология – обширный раздел технологии как части науки или как метод исследований в науках о жизни и биомедицины [8]. И в том, и другом случае, биотехнология имеет прикладное значение и решает отраслевые задачи экономики. Следовательно, преимущества биотехнологических разработок заключены в том, что инновации могут достигать своих конечных целей в реальном секторе экономики достаточно быстро [9]. Следовательно, число разработок, в том числе изобретений в данной области по нашим предположениям увеличивается. В качестве одного из приоритетных направлений развития ДВФУ выделяет биотехнологии в рамках Передовой инженерной школы: института биотехнологии, биоинженерии и пищевых систем ДВФУ.

1. Общий анализ объектов интеллектуальной собственности ДВФУ.

Представлен анализ объектов интеллектуальной собственности ДВФУ и сравнительная характеристика доли зарегистрированных патентов на изобретения в области биотехнологий: а) среди зарегистрированных патентов на изобретения всех научных школ, б) среди всех охранных документов.

Таблица 1.

Динамика количества объектов интеллектуальной собственности ДВФУ, зарегистрированных в государственных реестрах РФ в 2020–2024 гг.

Table 1.

The dynamics of the number of intellectual property objects of the Far Eastern Federal University registered in the state registers of the Russian Federation in 2020–2024

Год Year	Патенты на изобретения и полезные модели Patents for inventions and utility models	% от общего числа % of the total number	Свидетельства на программы ЭВМ и базы данных Certificates for computer programs and databases	% от общего числа % of the total number	Всего охранных документов Total protection documents
2020	68	53	61	47	129
2021	71	52	66	48	137
2022	28	32	60	68	88
2023	34	39	53	61	87
2024	45	49	47	51	92

По данным таблицы 1 можно отметить, что за период сразу после пандемии, начиная с 2020 года, доля патентов на изобретения и полезные модели была наибольшей и составляла более половины от общего числа охранных документов. Это может свидетельствовать о активной научной и инновационной деятельности университета в условиях постпандемийного восстановления, когда многие исследователи искали новые решения и разработки [10].

Обратную ситуацию можно наблюдать за следующие два года. Наибольшую долю в объектах интеллектуальной собственности ДВФУ стали занимать программы ЭВМ и базы данных. В 2021 году доля патентов немного снижается до 52%, но уже в 2022 году она резко падает до 32%, что указывает на значительное сокращение активности в области патентования изобретений и полезных моделей. Вместо этого, программы ЭВМ и базы данных начинают занимать большую долю, увеличившись с 47% в 2020 году до 68% в 2022 году. Это изменение, скорее всего, связано с растущими потребностями в цифровизации и разработке программных решений, что стало особенно актуально в условиях перехода на удалённые форматы работы [11].

Однако, в 2023 году наблюдается небольшое улучшение ситуации с патентами – их доля увеличивается до 39%, однако программы ЭВМ и базы данных продолжают оставаться на высоком уровне, составив 61% от общего числа охранных документов. Это подтверждает устойчивый интерес к разработке программных продуктов и технологий.

В 2024 году количество зарегистрированных объектов интеллектуальной собственности снова увеличивается до 92, при этом доля патентов на изобретения и полезные модели возрастает до 49%. Это может свидетельствовать о восстановлении интереса к патентованию

и инновациям в области технологий, несмотря на сохраняющуюся популярность программ ЭВМ и баз данных, которые составляют 51%.

На представленной диаграмме (рисунок 1) можно лучше заметить, что за 5 лет структура охранных объектов претерпела значительные изменения, так, если в начале исследуемого пятилетнего периода, а именно, в 2020–2021 годах, – количество изобретений и полезных моделей было доминирующим, в середине периода 2022–2023 годы – преобладали цифровые решения, представленные компьютерными программами и базами данных, в конце исследуемого периода, 2024 год – количество изобретений и полезных моделей практически сравнялось с количеством цифровых решений.

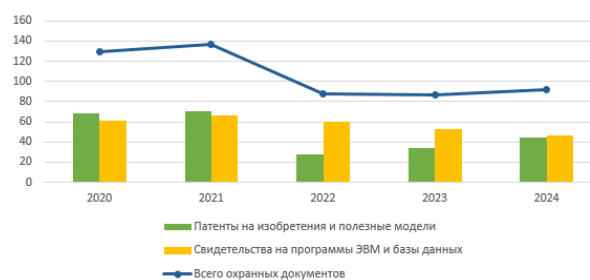


Рисунок 1. Объекты интеллектуальной собственности ДВФУ 2020–2024 гг.

Figure 1. Intellectual Property Objects of Far Eastern Federal University in 2020–2024

Стоит отметить, что число охранных документов значительно уменьшилось за счет резкого снижения количества полученных патентов на изобретения и полезные модели за период 2022–2023 гг., возможно, это связано ужесточившимися санкционными режимами, влияющими на закупку необходимых материалов и оборудования [12], что вероятнее всего усложнило процесс создания разработок.

Несмотря на колебания долей различных видов интеллектуальной собственности, общее число охраняемых документов остается относительно стабильным. В целом, видна общая тенденция к сокращению количества зарегистрированных объектов интеллектуальной собственности ДВФУ, процент отрицательного прироста на 2024 г. составил 64% по сравнению с 2020 г. Пик был достигнут в 2021 году (137 документов), а минимальное значение наблюдалось в 2023 году (87 документов).

Несмотря на колебания долей различных видов интеллектуальной собственности, общее число охраняемых документов остается относительно стабильным. В целом, видна общая тенденция к сокращению количества зарегистрированных объектов интеллектуальной собственности ДВФУ, процент отрицательного прироста на 2024 г. составил 64% по сравнению с 2020 г. Пик был достигнут в 2021 году (137 документов), а минимальное значение наблюдалось в 2023 году (87 документов).

Важно отметить, что даже несмотря на изменения в структуре охраняемых объектов, университет продолжает активно регистрировать интеллектуальную собственность, что подчеркивает его вклад в развитие науки и техники.

Таким образом, данные таблицы и диаграммы показывают эволюцию фокуса научных исследований и разработок ДВФУ от преимущественно технических изобретений к балансу

технических решений, с одной стороны, и, программного обеспечения и информационных технологий, с другой стороны. Эти изменения могут быть обусловлены как внешними факторами, такими как потребности рынка и технологические тренды, так и внутренними – стратегическими приоритетами университета в области научных исследований и разработок.

2. Анализ объектов интеллектуальной собственности ДВФУ в области биотехнологии.

Представлен анализ объектов интеллектуальной собственности ДВФУ и сравнительная характеристика доли зарегистрированных патентов на изобретения в области биотехнологии: а) среди разделов биотехнологии, б) среди зарегистрированных патентов на изобретения всех научных школ, в) среди всех охраняемых документов.

Традиционно, в университете исследования по направлениям агропищевой биотехнологии и пищевой технологии сосредоточены в институте наук о жизни и биомедицины (ИНЖБ), школе экономики и менеджмента (ШЭМ), передовой инженерной школе: институт биотехнологии, биоинженерии и пищевых систем (ПИШ), исследования по медицинской биотехнологии проводятся учеными школы медицины (ШМ) и института наукоемких технологий и передовых материалов (ИНТПМ). Соответствующее наименование подразделений (школ) университета дано в шапке таблицы 2.

Таблица 2.

Общее количество объектов интеллектуальной собственности ДВФУ, зарегистрированных в государственных реестрах РФ в 2020–2024 гг.

Table 2.

The dynamics of the number of intellectual property objects of the Far Eastern Federal University registered in the state registers of the Russian Federation in 2020–2024

Год Year	ИНЖБ / ШЭМ / ПИШ Агропищевая биотехнология, в том числе пищевые технологии INJB / SHEM / NSP Agri-food biotechnology, including food technologies	ШМ / ИНТПМ Медицинская биотехнология SHM / INPM Medical biotechnology	Биотехнология, общее количество Biotechnology, total number	% от общего числа патентов и полезных моделей % of total number of patents and utility models	Патенты на изобретения и полезные модели Patents for inventions and utility models	Свидетельства на программы ЭВМ и базы данных Certificates for computer programs and databases	% от общего числа % of total number	Всего охраняемых документов Total protection documents
2020	12	8	20	29	68	61	47	129
2021	20	4	24	34	71	66	48	137
2022	8	6	14	50	28	60	68	88
2023	7	5	12	35	34	53	61	87
2024	16	2	18	40	45	47	51	92

По данным таблицы 2, объекты интеллектуальной собственности в области биотехнологии занимают значительное место в структуре патентов ДВФУ.

В 2020 году доля патентов в этой области достигла 29%, в следующем году доля выросла

до 34% от общего числа, еще через год. В 2022 году доля патентов в области биотехнологии стала занимать ровно половину от всех патентов, полученных ДВФУ по различным направлениям, что подтверждает активное развитие направления в университете. Годом

позднее, в 2023 году, соотношение патентов в области биотехнологии к прочим отраслям изменилось в сторону некоторого снижения, однако по сравнению с 2020 годом, остается существенной. Уже в 2024 году наблюдается восстановление интереса к патентованию в области биотехнологии, когда общая доля в объеме патентов увеличилась до 40%.

Тем не менее, одно из направлений биотехнологии, агропищевая биотехнология и пищевые технологии, демонстрирует значительные колебания в течение рассматриваемого периода: в 2020 год: 12 проектов, в 2021 году 20 патентов, рост на 66,7%, в 2022 году 8 патентов, снижение на 60%, в 2023 году 7 патентов, небольшое снижение на 12,5%, в 2024 году 16 патентов и рост на 128,6%. Наибольшее количество патентов по направлениям агропищевой биотехнологии и пищевой технологии было зафиксировано в 2021 году, что может быть связано с повышенным интересом к устойчивому сельскому хозяйству и продовольственной безопасности. Снижение в 2022 и 2023 годах может указывать на временные трудности или недостаток финансирования. Однако в 2024 году наблюдается восстановление, что может свидетельствовать о возобновлении интереса к агропищевой биотехнологиям.

Интересно отметить, что динамика медицинской биотехнологии в целом противоположна динамике агропищевой. Минимум объектов интеллектуальной собственности в медицинской биотехнологии наблюдается в 2021 году, когда агропищевая достигает своего пика. В отличие от агропищевой биотехнологии, медицинская демонстрирует более стабильные, но низкие показатели, колеблясь в диапазоне от 4 до 8 патентов в год, за исключением небольшого роста в 2020 году. Так, в 2020 году было зарегистрировано 12 патентов в сфере агропищевой биотехнологии, 8 – в области медицинской биотехнологии. Общее количество патентов составило 20. Это свидетельствует о значительном интересе к агропищевым биотехнологиям, который превышает внимание к медицинским разработкам почти в полтора раза. В следующем году наблюдается резкий рост числа объектов интеллектуальной собственности в агропищевом секторе до 20, тогда как медицинская биотехнология показывает снижение до 4 патентов. Однако общий объем патентов увеличивается до 24, что указывает на значительный вклад агропищевых технологий в общую картину. В 2022 году ситуация меняется кардинально: число проектов в агропищевой отрасли падает до 8, медицинская биотехнология демонстрирует небольшой

рост до 6 патентов. Общий показатель снижается до 14, что является минимальным значением за рассматриваемый период. В 2023 году продолжается спад в агропищевой биотехнологии до 7 патентов, однако медицинские разработки показывают стабильный уровень, а именно 5 патентов. Общий результат составляет 12 патентов, что продолжает тенденцию снижения активности в этой области. К 2024 году ожидается увеличение числа патентных разработок в агропищевой биотехнологии до 16, в то время как медицинская биотехнология остается на минимальном уровне в 2 патента. Общая цифра снова возрастает до 18, что свидетельствует о восстановлении интереса к агропищевому сектору.

Сравнивая обе категории, можно заметить, что агропищевая биотехнология в целом привлекает больше внимания и ресурсов, чем медицинская. Это может быть связано с актуальностью вопросов продовольственной безопасности и устойчивого развития в биоэкономике, особенно в условиях дальневосточного макрорегиона. Данные за 5 лет показывают, что биотехнология в целом является динамично развивающейся областью, но с различными темпами роста в зависимости от направления исследования. Агропищевая биотехнология демонстрирует большую гибкость и адаптивность к изменениям в потребностях общества, в то время как медицинская биотехнология развивается размеренно, требуя больше ресурсов для разработок.

Динамика общего числа проектов по биотехнологиям в значительной степени повторяет динамику агропищевой биотехнологии. Это говорит о том, что агропищевое направление играет доминирующую роль в общем объеме биотехнологических исследований, представленных в таблице 2. Согласно проведенному анализу, объекты интеллектуальной собственности в области агропищевой биотехнологии и пищевой технологии составляют основу объектов интеллектуальной собственности ДВФУ, что соответствует мировой и общероссийской тенденции [13] интенсивного развития пищевых наук и агропищевых биотехнологий.

Обсуждение

В результате проведенного анализа объектов интеллектуальной собственности центров трансфера технологий ДВФУ были выявлены значительные изменения в структуре зарегистрированных патентов, особенно в области биотехнологий и пищевых технологий. Данные, представленные в таблице 1, показывают, что в 2020 году патенты на изобретения

и полезные модели составляли более половины от общего числа охранных документов, что свидетельствует о высоком уровне инновационной активности в этот период. Однако в последующие годы наблюдается заметное снижение доли патентов. Наиболее выраженное сокращение зарегистрированных патентов произошло в 2022 и 2023 годах, когда доля патентов на изобретения и полезные модели упала до 32 и 39% соответственно.

Сравнительный анализ доли зарегистрированных патентов на изобретения среди всех научных школ ДВФУ также показывает, что пищевые технологии и биотехнологии остаются лидерами в области патентования. Это может быть обусловлено как культурой патентования, сложившейся в университете, так и активным развитием этих направлений в стране в целом.

Согласно данным таблицы 2, значительная доля объектов интеллектуальной собственности приходится на область агропищевой биотехнологии и пищевых технологий. Например, в течение исследуемого периода такие разработки составляли 41% от общего числа патентов на изобретения и полезные модели в сфере биотехнологий. Эта доля остается значительной и в последующие годы, что подтверждает общемировую и российскую тенденцию роста интереса к агропромышленному сектору и продовольственной безопасности.

Заключение

За период исследования структура зарегистрированных патентов в центрах трансфера технологий ДВФУ претерпела значительные изменения, особенно в областях биотехнологий и пищевых технологий, а именно: патенты на изобретения и полезные модели составляют более половины от общего числа охранных документов, что свидетельствует о высокой инновационной активности в этот период.

Пищевые технологии и биотехнологии остаются ведущими областями патентования среди всех научных школ ДВФУ, что отражает как культурные особенности университета, так и общие тенденции развития науки в стране.

Объекты интеллектуальной собственности в области агропищевой биотехнологии составляют значительную долю от общего числа патентов на изобретения и полезные модели в сфере биотехнологий, что подчеркивает важность и перспективность агропромышленного сектора и продовольственной безопасности.

Результаты исследования показывают, что несмотря на общее снижение количества охранных документов, ДВФУ продолжает активно развивать биотехнологические проекты, особенно в области агропищевой биотехнологии. Это соответствует глобальным трендам и отражает высокую значимость экономики пищевых систем для региона и страны в целом.

Литература

- 1 Караваева Н.М. Рынок интеллектуальной собственности: особенности мирового развития и перспективы для России // Вестник Прикамского социального института. 2020. № 7. С. 75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-intellektualnoy-sobstvennosti-osobennosti-mirovogo-razvitiya-i-perspektivy-dlya-rossii> (дата обращения: 31.03.2025).
- 2 Маркетинговое исследование рынка интеллектуальной собственности в России и за рубежом, данные на 2024 г. // Компания Профиль. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-intellektualnoy-sobstvennosti-v-rossii/> (дата обращения: 31.03.2025).
- 3 Новосельский С.О., Телегина О.В., Шатохин М.В. Управление интеллектуальной собственностью предприятий пищевой промышленности // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-intellektualnoy-sobstvennostyu-predpriyatiy-pischevoy-promyshlennosti> (дата обращения: 31.03.2025).
- 4 Актуальные тренды и лучшие практики в сфере интеллектуальной собственности международной конференции Роспатента «Эра IP» 9 октября 2024 // Роспатент. URL: <https://rospatent.gov.ru/ru/news/itogi-ehra-ip-2024> (дата обращения: 31.03.2025).
- 5 Открытый реестр объектов интеллектуальной собственности // Федеральный институт промышленной собственности. URL: <https://www.fips.ru/registers-web/> (дата обращения: 31.03.2025).
- 6 Saurabh B. History, scope and development of biotechnology // IOP Publishing Ltd. 2021. P. 5. URL: <https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1299-8/chapter/bk978-0-7503-1299-8ch1> (accessed: 31.03.2025).
- 7 Сапронова А.О., Сапронова Е.А. О трансферах биотехнологий с использованием промышленного образца // Технологическое предпринимательство, коммерциализация результатов интеллектуальной деятельности и трансфер технологий: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Пермь, 11 ноября 2021 года. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48031455> (дата обращения: 01.03.2025).
- 8 Springham D.G., Moses V., Cape R.E. Biotechnology – The Science and the Business. CRC Press, 2023. 686 p.
- 9 Криничная Е.П. Проблемы развития аграрного сектора России и потенциальные направления их решения // Вестник ОрелГАУ. 2024. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problems-razvitiya-agrarnogo-sektora-rossii-i-potentsialnye-napravleniya-ih-resheniya> (дата обращения: 01.04.2025).

- 10 Мусина Л.Р. Сравнительный анализ моделей инновационной активности вузов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право. 2023. Т. 23. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-modeley-innovatsionnoy-aktivnosti-vuzov> (дата обращения: 01.03.2025).
- 11 Анисимов А.Ю., Алексахин А.Н., Алексахина С.А. и др. Роль университетов в процессе трансфера технологий // Вестник Академии знаний. 2024. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-universitetov-v-protseste-transfera-tehnologii> (дата обращения: 01.03.2025).
- 12 Chi-Ham C.L. An intellectual property sharing initiative in agricultural biotechnology: development of broadly accessible technologies for plant transformation // Plant Biotechnology Journal. 2021. Vol. 10. P. 10. DOI: 10.1111/j.1467-7652.2011.00674.x
- 13 Atkinson R.C. Intellectual property rights. Public sector collaboration for agricultural IP management // Science. 2023. Vol. 11. P. 12. doi: 10.1126/science.1085553
- 14 Григорьев Ю.А., Дыбова А.С. Патентная активность как индикатор технологического развития: методы оценки и анализ тенденций // Инновации. 2020. № 5 (259). С. 50-58.
- 15 Dziallas M., Blind K. Innovation indicators throughout the innovation process: An extensive literature analysis // Technovation. 2019. Vol. 80-81. P. 3-29. DOI: 10.1016/j.technovation.2018.05.005
- 16 Маркова Е.В., Нечаев А.С. Оценка результативности деятельности центров коммерциализации и трансфера технологий в университетах // Инновации. 2021. № 5 (271). С. 52-61.
- 17 Dahiya P., Jha S. Recent trends in intellectual property rights protection in fermented dairy products // Advances in Dairy Microbial Products. Woodhead Publishing, 2022. P. 81-92.
- 18 Intellectual property management and technology licensing: guide for policymakers and managers of research and development institutes // ESCAP U.N. 2022. 145 p.
- 19 Chuma-Okoro H., Oluwasemilore I.A. Intellectual property rights, agricultural biotechnology and food sufficiency: strengthening the Nigerian intellectual property legal framework for food self-sufficiency in the aftermath of a global pandemic // International Review of Law, Computers & Technology. 2022. Vol. 36. No. 1. P. 48-67.
- 20 Burrell R., Reichman J.H., Rimmer M. et al. Intellectual property rights, climate technology transfer and innovation in developing countries // INET Oxford Working Paper. 2023. No. 2023-10.
- 21 Agarwal S., Kumari S., Khan S. (ed.). Bioentrepreneurship and transferring technology into product development. IGI Global, 2021. 350 p.

References

- 1 Karavaeva N.M. The Intellectual Property Market: Features of Global Development and Prospects for Russia. Bulletin of the PriKam Social Institute. 2020. no. 7. p. 75. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-intellektualnoy-sobstvennosti-osobennosti-mirovogo-razvitiya-i-perspektivy-dlya-rossii> (in Russian)
- 2 Marketing Research on the Intellectual Property Market in Russia and Abroad, Data for 2024: Profile Company. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-intellektualnoy-sobstvennosti-v-rossii/> (in Russian)
- 3 Novoselsky S.O., Telegina O.V., Shatokhin M.V. Management of Intellectual Property in Food Industry Enterprises. Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2020. no. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-intellektualnoy-sobstvennostyu-predpriyatiy-pischevoy-promyshlennosti> (in Russian)
- 4 Rospatent: Current Trends and Best Practices in the Field of Intellectual Property from the International Conference of Rospatent "Era IP" October 9, 2024. URL: <https://rospatent.gov.ru/ru/news/itogi-ehra-ip-2024> (in Russian)
- 5 Federal Institute of Industrial Property: Open Register of Intellectual Property Objects. URL: <https://www.fips.ru/register-web/> (in Russian)
- 6 Saurabh B. History, Scope and Development of Biotechnology. IOP Publishing Ltd. 2021. no. 5. URL: <https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1299-8/chapter/bk978-0-7503-1299-8ch1>
- 7 Sapronova A.O., Sapronova E.A. On Technology Transfers Using Industrial Samples. Technological Entrepreneurship, Commercialization of Intellectual Activity Results and Technology Transfer: Materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, Perm, November 11, 2021. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2021. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48031455> (in Russian)
- 8 Springham D.G., Moses V., Cape R.E. Biotechnology - The Science and the Business. CRC Press. 2023. no. 8. p. 686
- 9 rinichnaya E.P. Problems of Agricultural Sector Development in Russia and Potential Directions for Their Solution. Bulletin of Orel State Agrarian University. 2024. no. 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-razvitiya-agrarnogo-sektora-rossii-i-potentsialnye-napravleniya-ih-resheniya> (in Russian)
- 10 Musina L.R. Comparative Analysis of Models of Innovative Activity in Higher Educational Institutions. Proceedings of Saratov University New Series Series Economics Management Law. 2023. no. 3. pp. 255-260. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-modeley-innovatsionnoy-aktivnosti-vuzov> (in Russian)
- 11 Anisimov A.Yu., Alexakhin A.N., Alexakhina S.A. et al. The Role of Universities in the Technology Transfer Process. Bulletin of the Academy of Knowledge. 2024. no. 5. pp. 55-61. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-universitetov-v-protseste-transfera-tehnologii> (in Russian)
- 12 Chi-Ham C.L. An intellectual property sharing initiative in agricultural biotechnology: development of broadly accessible technologies for plant transformation. Plant Biotechnology Journal. 2021. no. 10. pp. 501-510. doi:10.1111/j.1467-7652.2011.00674.x
- 13 Atkinson R.C. Intellectual property rights. Public sector collaboration for agricultural IP management. Science. 2023. no. 11. doi:10.1126/science.1085553

- 14 Grigoriev Yu.A., Dybova A.S. Patent activity as an indicator of technological development: assessment methods and trend analysis. *Innovations*. 2020. no. 5(259). pp. 50-58. (in Russian)
- 15 Dziallas M., Blind K. Innovation indicators throughout the innovation process: An extensive literature analysis. *Technovation*. 2019. vol. 80-81. pp. 3-29. doi:10.1016/j.technovation.2018.05.005
- 16 Markova E.V., Nechaev A.S. Evaluation of the effectiveness of commercialization and technology transfer centers in universities. *Innovations*. 2021. no. 5(271). pp. 52-61. (in Russian)
- 17 Dahiya P., Jha S. Recent trends in intellectual property rights protection in fermented dairy products. *Advances in Dairy Microbial Products*. Woodhead Publishing, 2022. pp. 81-92
- 18 ESCAP U.N. et al. Intellectual property management and technology licensing: guide for policymakers and managers of research and development institutes. 2022
- 19 Chuma-Okoro H., Oluwasemilore I.A. Intellectual property rights, agricultural biotechnology and food sufficiency: strengthening the Nigerian intellectual property legal framework for food self-sufficiency in the aftermath of a global pandemic. *International Review of Law, Computers & Technology*. 2022. vol. 36. no. 1. pp. 48-67
- 20 Burrell R. et al. Intellectual property rights, climate technology transfer and innovation in developing countries. *INET Oxford Working Paper*. 2023
- 21 Agarwal S., Kumari S., Khan S. (ed.). *Bioentrepreneurship and transferring technology into product development*. IGI Global, 2021

Сведения об авторах

Альбина О. Сапронова аспирант, кафедра биоэкономики, Дальневосточный федеральный университет, 690022, Россия, Приморский край, Владивосток, г. Владивосток, п. Аякс, д. 10, sapronova.ao@dvvu.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-7514-2829>

Information about authors

Albina O. Sapronova postgraduate student, bioeconomics department, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay., Vladivostok, 690022, Russia, sapronova.ao@dvvu.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-7514-2829>

Вклад авторов

Альбина О. Сапронова написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Albina O. Sapronova wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила 24/03/2025	После редакции 12/04/2025	Принята в печать 30/04/2025
Received 24/03/2025	Accepted in revised 12/04/2025	Accepted 30/04/2025

Оптимизация режимов сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой

Сергей В. Роднищев	¹	sergey.2587@ya.ru	 0009-0006-3413-9782
Дмитрий В. Дмитриев	²	rosagro.kr@yandex.ru	 0009-0000-9947-174X
Игорь А. Бакин	³	bakin@rgau-msha.ru	 0000-0001-5678-1975
Сергей В. Шахов	¹	s_shahov@mail.ru	 0000-0002-5865-2357
Ирина А. Глотова	⁴	glotova-irina@ya.ru	 0000-0002-9991-1183
Александр С. Муравьев	¹	hntrun@mail.ru	 0000-0002-5989-0752

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

² ООО «НПО КВИНОА ЦЕНТР», ул. Кооперативная, 81, г. Новокубанск, Краснодарский край, 352240, Россия

³ Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия

⁴ Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований первичных технологических процессов переработки семян киноа отечественной селекции на пилотной сушильной установке. Цель исследования – выявить рациональные значения параметров процесса послеуборочной сушки семян в барабанной сушилке непрерывного действия. Объектом исследований являлся процесс конвективной сушки семян киноа отечественной селекции НПО «КВИНОА ЦЕНТР», г. Новокубанск Краснодарского края, сорта Кади, урожая 2024 года. Эксперимент проведен на пилотной установке барабанной сушилки с канальными насадками для поперечной подачи сушильного агента. Изучено влияние на процесс основных технологических параметров (температура и расход теплоносителя, производительность по влажному материалу). Оптимизация сушки проводилась из условия минимизации удельных энергозатрат при достижении влажности семян киноа до 8,0–8,5 % на выходе из сушилки. Многокритериальная задача оптимизации решалась с использованием метода трехфакторного планирования эксперимента Бокса-Уилсона. Дисперсионный анализ проводился по методу ANOVA. Для анализа и визуализации экспериментальных данных использована методология поверхности отклика. Нахождение области оптимальных значений проводилось по функции желательности Харрингтона. Из анализа массива решений установлены рациональные интервалы значений входных факторов: температура теплоносителя на входе в барабан 323–325 град. К; расход теплоносителя 0,312–0,316 м³/с; производительность по влажным семенам 1583,8–1586,12 кг/ч. Применение указанных режимов удаления влаги из семян киноа обеспечивает минимизацию энергозатрат на процесс сушки при требуемых показателях хранения.

Ключевые слова: киноа отечественной селекции, послеуборочная обработка, интенсивный режим сушки, многокритериальная оптимизация.

Optimizing quinoa seed drying modes in a drum dryer with a channel nozzle

Sergey V. Rodnishchev	¹	sergey.2587@ya.ru	 0009-0006-3413-9782
Dmitrij V. Dmitriev	²	rosagro.kr@yandex.ru	 0009-0000-9947-174X
Igor A. Bakin	³	bakin@rgau-msha.ru	 0000-0001-5678-1975
Sergey V. Shakhov	¹	s_shahov@mail.ru	 0000-0002-5865-2357
Irina A. Glotova	⁴	glotova-irina@ya.ru	 0000-0002-9991-1183
Alexander S. Muravyev	¹	hntrun@mail.ru	 0000-0002-5989-0752

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

² LLC "Scientific and Production Association Quinoa Center", Cooperative st., 81 Novokubansk, Krasnodarskiy Territory, 352240, Russia

³ Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy Climent A. Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49 Moscow, 127434, Russia

⁴ Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina st., 1 Voronezh, 394087, Russia

Abstract. The article presents the results of experimental studies of primary technological processes for processing quinoa seeds of domestic selection on a pilot drying unit. The purpose of the study is to identify rational values of the parameters of the post-harvest seed drying process in a continuous drum dryer. The object of the study was the process of convective drying of quinoa seeds of domestic selection of NPO "KVINOA CENTER", Novokubansk, Krasnodar Territory, variety Kadi, harvest of 2024. The experiment was carried out on a pilot unit of a drum dryer with channel nozzles for transverse feeding of the drying agent. The influence of the main process parameters (temperature and flow rate of the heat carrier, productivity for wet material) on the process was studied.

Для цитирования

Роднищев С.В., Дмитриев Д.В., Бакин И.А., Шахов С.В., Глотова И.А., Муравьев А.С. Оптимизация режимов сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 95–105. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-95-105

For citation

Rodnishchev S.V., Dmitriev D.V., Bakin I.A., Shakhov S.V., Glotova I.A., Muravyev A.S. Optimizing quinoa seed drying modes in a drum dryer with a channel nozzle. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 95–105. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-95-105

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

Drying optimization was carried out based on the condition of minimizing specific energy consumption when reaching the moisture content of quinoa seeds up to 8.0–8.5% at the outlet of the dryer. The multicriterial optimization problem was solved using the three-factor design of the Box-Wilson experiment. The dispersion analysis was carried out using the ANOVA method. The response surface methodology was used to analyze and visualize the experimental data. Finding the region of optimal values was carried out using the Harrington desirability function. Rational intervals of input factor values were established from the analysis of the array of solutions: heat carrier temperature at the inlet to the drum 323-325 deg. K; heat carrier flow rate 0.312-0.316 m³/s; productivity for wet seeds 1583.8-1586.12 kg/h. The use of these modes of moisture removal from quinoa seeds ensures the minimization of energy costs for the process drying at the required storage parameters.

Keywords: domestically bred quinoa, post-harvest processing, intensive drying mode, multi-criteria optimization.

Введение

Киноа (*Chenorodium Chenopodium quinoa Willd.*) считается культурой с высоким потенциалом для обеспечения глобальной продовольственной безопасности. Помимо традиционного использования её в виде крупы, перспективными продуктами переработки являются экстракты в виде порошкообразных концентратов, изолятов [1], а также экструдированных хлопьев [2]. Киноа продуцирует высококачественный белок с минимальным воздействием на окружающую среду, при этом дает хорошие урожаи в зоне с засушливыми и жаркими климатическими условиями, включая засоленные почвы [3, 4]. Это соответствует целям устойчивого развития, утвержденным Генеральной Ассамблеей ООН [5].

Для России киноа является новой перспективной высокобелковой культурой, которая относится к семейству амарантовые (*Amaranthaceae*) [1, 2, 6]. Родиной киноа являются склоны Анд в Южной Америке, ареал культивирования киноа по данным за 2018 год включает более 120 стран [7]. В России данная культура практически не распространена, известны единичные опыты по возделыванию, в частности на территории Краснодарского края. В компании ООО «Научно-производственное объединение КВИНОА ЦЕНТР» (г. Новокубанск Краснодарского края) изучены и выведены три отечественных сорта киноа [6].

В связи с фенологическими особенностями киноа послеуборочная обработка семян имеет особенности, по сравнению с другими белковыми культурами. Известно, что созревание киноа происходит постепенно, на протяжении периода от 90 до 220 дней, под влиянием погодных условий и других факторов [3]. Ранее установлено, что причиной изменчивости сроков созревания становится то, что у каждого растения киноа вырастает несколько метелок или ветвей, которые на одном и том же растении могут созревать в разное время [4]. Рекомендовано уборку семян проводить в фазе полной спелости зёрен, т. к. если собрать урожай слишком рано, киноа не будет готова, а в случае, если сделать это слишком поздно, семена могут осыпаться,

что приведёт к большим потерям [8]. При традиционной технологии послеуборочную сушку семян киноа проводят на воздухе или с использованием ленточных сушилок, что приводит к потерям зерна, в том числе из-за теплового повреждения, в связи со сложностью обеспечения оптимальных режимов процесса сушки [9].

С учетом результатов исследований по оптимизации формы насадок барабанных сушилок, имеются рекомендации по использованию канальных поверхностей, что позволяет интенсифицировать процесс дегидратации капиллярно-пористых сыпучих продуктов [10–12]. В то же время отсутствуют исследования, учитывающие конструктивные особенности барабанной сушилки с канальной насадкой, в связи с чем актуальны исследования по изучению и оптимизации технологических процессов послеуборочной сушки семян киноа с учетом агротехнических допусков.

Цель работы – выявить рациональные значения параметров процесса послеуборочной сушки семян в барабанной сушилке непрерывного действия.

Материалы и методы

Объектом исследований являлся процесс конвективной сушки семян киноа отечественной селекции НПО «КВИНОА ЦЕНТР», г. Новокубанск Краснодарского края, сорта Кади, урожая 2024 года. В исследовании процесс сушки рассматривался как элемент системы процессов послеуборочной обработки. Для интенсификации процесса сушки семян киноа в барабанной сушилке предложено использовать канальные насадки с поперечной подачей сушильного агента (рисунок 1). Исследования проводились на усовершенствованной конструкции барабанной сушильной установки с канальной насадкой [13]. Данное конструктивное решение показало возможность интенсификации процессов сушки в осциллирующих режимах для семян зерновых культур [14]. В исследованиях использовалась пилотная установка для изучения процесса сушки семян киноа в условиях, сочетающих преимущества шахтной сушилки и сушки мелкодисперсных объектов в активном

гидродинамическом режиме, с учетом термических характеристик биополимерных матриц продуктов переработки семян киноа [15, 16].

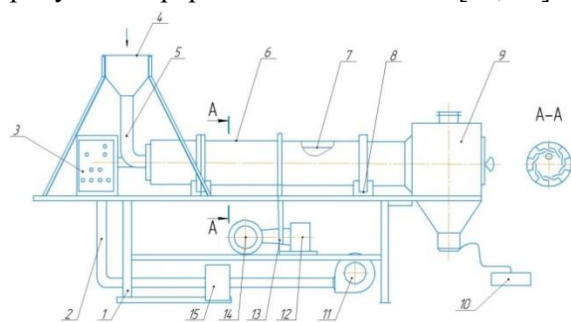


Рисунок 1. Общий вид барабанной сушилки с каналной насадкой: 1 – рама; 2 – трубопровод для теплоносителя; 3 – блок управления; 4 – бункер загрузки семян; 5 – патрубок подачи; 6 – барабан; 7 – каналная насадка; 8 – опорные ролики; 9 – бункер разгрузочный; 10 – датчик контроля влажности; 11 – вентилятор; 12 – редуктор; 13 – цепная передача; 14 – привод; 15 – калорифер

Figure 1. General view of a drum dryer with a channel nozzle: 1 – frame; 2 – discharge pipeline for coolant; 3 – control panel; 4 – loading hopper; 5 – product supply pipe; 6 – drying drum; 7 – channel nozzles; 8 – support rollers; 9 – unloading hopper; 10 – humidity sensor; 11 – fan; 12 – gearbox; 13 – chain drive; 14 – engine; 15 – heater

В проведенном исследовании многокритериальная задача оптимизации решалась с использованием метода Бокса–Уилсона, с реализацией матрицы трехфакторного планирования эксперимента с верхней и нижней «звездными» точками [17]. Результаты эксперимента обрабатывались в системе программирования *Mathcad*, используя встроенные функции, позволяющие анализировать данные статистическими методами регрессионного и корреляционного анализа. Полученные данные обрабатывались с использованием методологии поверхности отклика [18, 19]. Для проведения процедуры дисперсионного анализа результатов эксперимента и статистической оптимизации применялся программный модуль ANOVA [20]. Таблицы дисперсионного анализа использовались для обобщения результатов, при этом определялись статистически значимые различия (p -значение принималось равным 0,05) между средними значениями в независимых группах расчетных и экспериментальных данных [21].

Статистический анализ предусматривал построение математической модели с получением функций отклика в виде зависимостей $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ и $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ с учетом межфакторных взаимодействий на основе аппроксимации данных численного эксперимента. Для проведения процедуры регрессионного анализа и получения полиномиальных моделей второго порядка использовался ранее

апробированный статистический подход [22]. Далее строились поверхности отклика в виде трехмерного изображения и контуров на плоскости, по которым делалось предположение о необходимости учета межфакторных взаимодействий.

Метод поиска оптимума в виде комбинации числовых значений уровней количественных факторов на основе пошаговой процедуры движения к точке оптимума включал нахождение области оптимальных значений с использованием функции желательности Харрингтона (D) [23].

В экспериментальных исследованиях в качестве варьируемых факторов изучались: температура теплоносителя на входе в сушильный барабан (X_1 , град. К); объемный расход теплоносителя (X_2 , м³/с); производительность по влажным семенам, (X_3 , кг/ч). Поиск оптимальных параметров производился из условия минимизации удельных энергозатрат для достижения влажности семян на выходе из сушилки в пределах значений 8,0–8,5 %. Для выбранных факторов производилась проверка отсутствия корреляции. Пределы факторов в натуральных значениях приведены в таблице 1.

Таблица 1.
Пределы изменения входных факторов
процесса сушки

Table 1.
Limits of input factors changes
of the drying process

Условия планирования Planning conditions	Кодированное значение Coded values	Значения факторов в точках плана Values		
		X_1	X_2	X_3
		T_e, K	$V_e, m^3/c$	$G_m, kg/h$
Основной уровень Main level	0	324,0	0,315	1945
Интервал варьирования Variation interval	Δ	8,0	0,045	215
Верхний уровень Upper level	+1	332,0	0,36	2160
Нижний уровень Lower level	-1	316,0	0,27	1730
Верхняя «звездная» точка Upper "star" point	+1,680	337,4	0,39	2306
Нижняя «звездная» точка Lower "star" point	-1,680	310,6	0,24	1584

Критериями оценки влияния входных факторов на процесс сушки являлись: Y_1 – влажность высушенного продукта, %; Y_2 – удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции, (кВт×ч/кг).

Результаты и обсуждение

На первом этапе в конструкции пилотной сушильной установки реализован план эксперимента сушки семян киноа из 20 опытов (таблица 2).

Результаты проведенного дисперсионного анализа полученных экспериментальных данных приведены в таблицах 3–4.

Таблица 2.

Матрица планирования и результаты экспериментов

Table 2.

Planning matrix and experimental results

№	Кодированные значения факторов Coded factor values			Натуральные значения факторов Natural factor values			Влажность высушенного продукта Y_1 , % Moisture content of dried product Y_1 , %	Удельные энергозатраты Y_2 , (кВт×ч/кг) Specific energy consumption Y_2 , (kWh/kg)
	X_1	X_2	X_3	$T_в, K$	$V_в, м^3/с$	$G_{вм}, кг/ч$		
1	-1,000	-1,000	-1,000	316	0,27	1730	10,13	0,2486
2	1,000	-1,000	-1,000	332	0,27	1730	10,32	0,2676
3	-1,000	1,000	-1,000	316	0,36	1730	7,835	0,3163
4	1,000	1,000	-1,000	332	0,36	1730	8,351	0,3553
5	-1,000	-1,000	1,000	316	0,27	2160	13,8	0,3431
6	1,000	-1,000	1,000	332	0,27	2160	12,08	0,4021
7	-1,000	1,000	1,000	316	0,36	2160	9,783	0,3608
8	1,000	1,000	1,000	332	0,36	2160	8,404	0,4398
9	1,680	0,000	0,000	337,44	0,315	1945	9,574	0,4097
10	-1,680	0,000	0,000	310,56	0,315	1945	10,58	0,3274
11	0,000	1,680	0,000	324	0,3906	1945	7,721	0,4075
12	0,000	-1,680	0,000	324	0,2394	1945	12,74	0,3191
13	0,000	0,000	1,680	324	0,315	2306,2	11,49	0,3687
14	0,000	0,000	-1,680	324	0,315	1583,8	8,37	0,2183
15	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
16	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
17	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
18	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
19	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428
20	0,000	0,000	0,000	324	0,315	1945	9,947	0,3428

Таблица 3.

Таблица дисперсионного анализа ANOVA для квадратичной модели сушки (Y_1)

Table 3.

ANOVA table for quadratic model of dried product moisture content (Y_1)

Индекс Index	Сумма квадратов отклонений Sum of squared deviations	Количество степеней свободы (df) Degrees of freedom (df)	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	F-значение F value	p-значение p value
Модель Model	46,96	9	5,22	$1,645 \times 10^6$	<0,0001
X_1	1,22	1	1,22	$3,853 \times 10^5$	<0,0001
X_2	30,47	1	30,47	$9,607 \times 10^6$	<0,0001
X_3	11,77	1	11,77	$3,711 \times 10^6$	<0,0001
$X_1 X_2$	0,0556	1	0,0556	17536,49	<0,0001
$X_1 X_3$	1,81	1	1,81	$5,707 \times 10^5$	<0,0001
$X_2 X_3$	1,47	1	1,47	$4,635 \times 10^5$	<0,0001
X_1^2	0,0306	1	0,0306	9645,23	<0,0001
X_2^2	0,1452	1	0,1452	45781,09	<0,0001
X_3^2	0,0005	1	0,0005	159,85	<0,0001

Таблица 4.

Таблица дисперсионного анализа ANOVA для квадратичной модели удельных энергозатрат (Y_2)

Table 4.

ANOVA table for the quadratic model of specific energy consumption of finished product (Y_2)

Индекс Index	Сумма квадратов отклонений Sum of squared deviations	Количество степеней свободы (df) Degrees of freedom (df)	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation	F-значение F value	p-значение p value
Модель Model	0,0543	9	0,0060	$8,371 \times 10^6$	<0,0001
X_1	0,0082	1	0,0082	$1,137 \times 10^7$	<0,0001
X_2	0,0095	1	0,0095	$1,314 \times 10^7$	<0,0001
X_3	0,0273	1	0,0273	$3,795 \times 10^7$	<0,0001
$X_1 X_2$	0,0002	1	0,0002	$2,777 \times 10^5$	<0,0001
$X_1 X_3$	0,0008	1	0,0008	$1,111 \times 10^6$	<0,0001
$X_2 X_3$	0,0013	1	0,0013	$1,736 \times 10^6$	<0,0001
X_1^2	0,0012	1	0,0012	$1,659 \times 10^6$	<0,0001
X_2^2	0,0008	1	0,0008	$1,051 \times 10^6$	<0,0001
X_3^2	0,0044	1	0,0044	$6,089 \times 10^6$	<0,0001

Как следует из таблиц 3–4 значения критерия Фишера (F-значения) для статистических моделей Y_1 и Y_2 равны соответственно 1.645×10^6 и 8.371×10^6 , т. е. обе модели статистически значимы, при рассчитанных значениях коэффициентов для выбранного квадратичного уравнения регрессии. Оценка адекватности моделей, проведенная с использованием коэффициента детерминации R^2 , показала, что значение прогнозируемого R^2 , равного 1,00, хорошо согласуется со скорректированным табличным значением R^2 .

После статистической обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии, с учетом значимости коэффициентов, описывающие процесс при воздействии выбранных для исследования факторов, в виде выражений:

$$Y_1 = 9,94 - 0,29X_1 - 1,49X_2 + 0,92X_3 + 0,08X_1X_2 - 0,47X_1X_3 - 0,42X_2X_3 + 0,04X_1^2 + 0,11X_2^2 - 0,01X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,342 + 0,024X_1 + 0,026X_2 + 0,044X_3 + 0,004X_1X_2 + 0,01X_1X_3 - 0,012X_2X_3 + 0,009X_1^2 + 0,007X_2^2 - 0,017X_3^2 \quad (2)$$

Для анализа и визуализации экспериментальных данных использована методология поверхности отклика. Графическая интерпретация уравнений (1) и (2), на основе которых определяются эффекты взаимодействия и влияния входных факторов $X_i, i = \overline{1,3}$ на выходные Y_1 и Y_2 , приведены на рисунках 2–7.

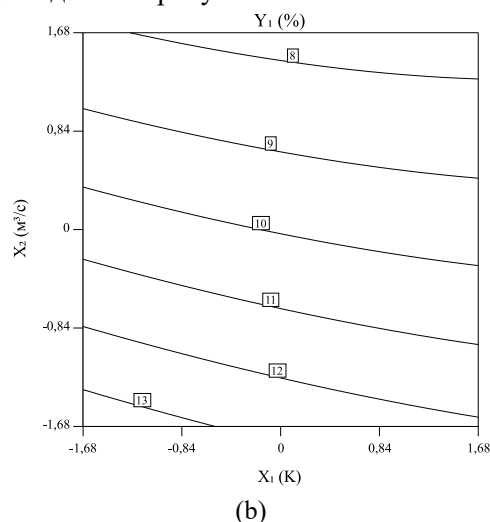
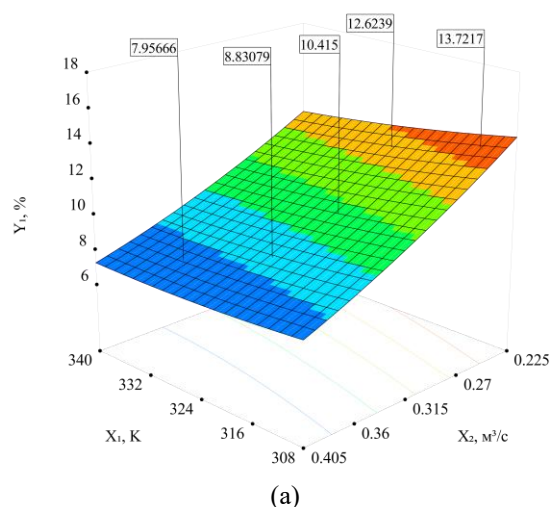


Рисунок 2. Совместное влияние на влажность высушенного продукта (Y_1 , %) температуры теплоносителя на входе в барабан (X_1 , К) и расхода теплоносителя (X_2 , м³/с): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 2. Combined effect of the temperature of the coolant at the drum inlet (X_1 , K) and the coolant flow rate (X_2 , m³/s) on the humidity of the dried product (Y_1 , %): а – response surface; б – curves of equal values

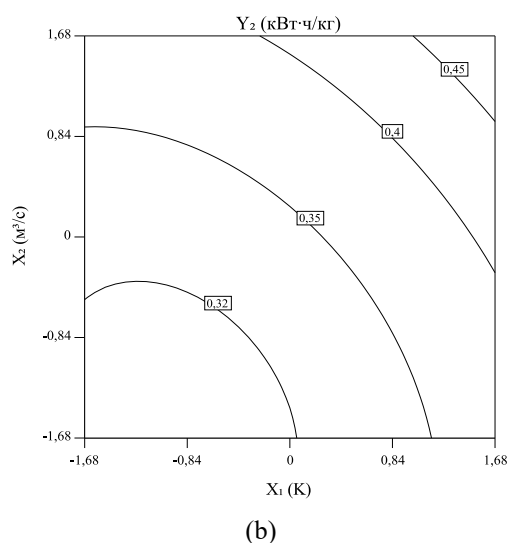
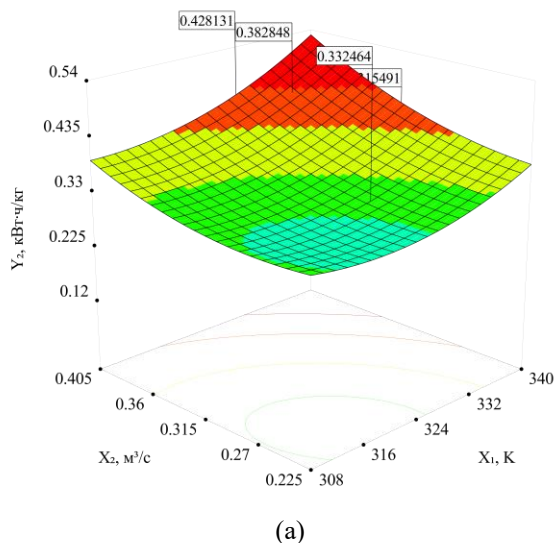


Рисунок 3. Совместное влияние на удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции (Y_2 , кВт·ч/кг) температуры теплоносителя на входе в барабан (X_1 , К) и расхода теплоносителя (X_2 , м³/с): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 3. Combined effect on specific energy consumption per 1 kg of finished product (Y_2 , kW·h/kg) of the coolant temperature at the drum inlet (X_1 , K) and the coolant flow rate (X_2 , m³/s): а – response surface; б – curves of equal values

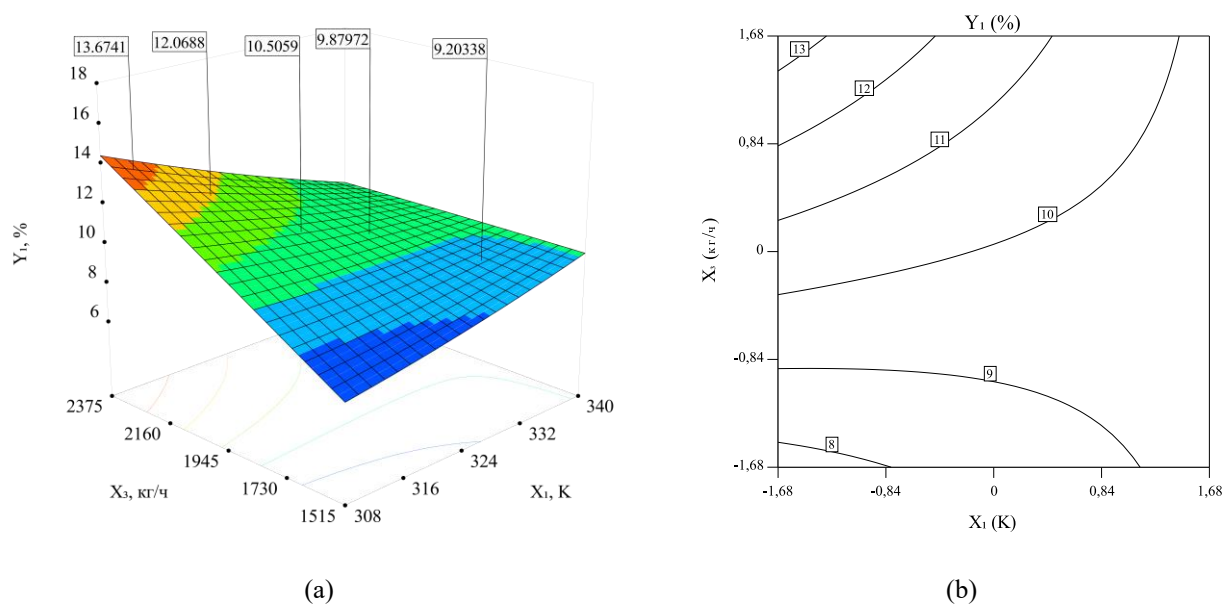


Рисунок 4. Совместное влияние на влажность высушенного продукта (Y_1 , %) температуры теплоносителя на входе в барабан (X_1 , K) и расхода влажного материала на входе в сушилку (X_3 , кг/ч): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 4. Combined effect of the temperature of the coolant at the drum inlet (X_1 , K) and the flow rate of wet material at the dryer inlet (X_3 , kg/h) on the humidity of the dried product (Y_1 , %): а – response surface; б – equal value curves

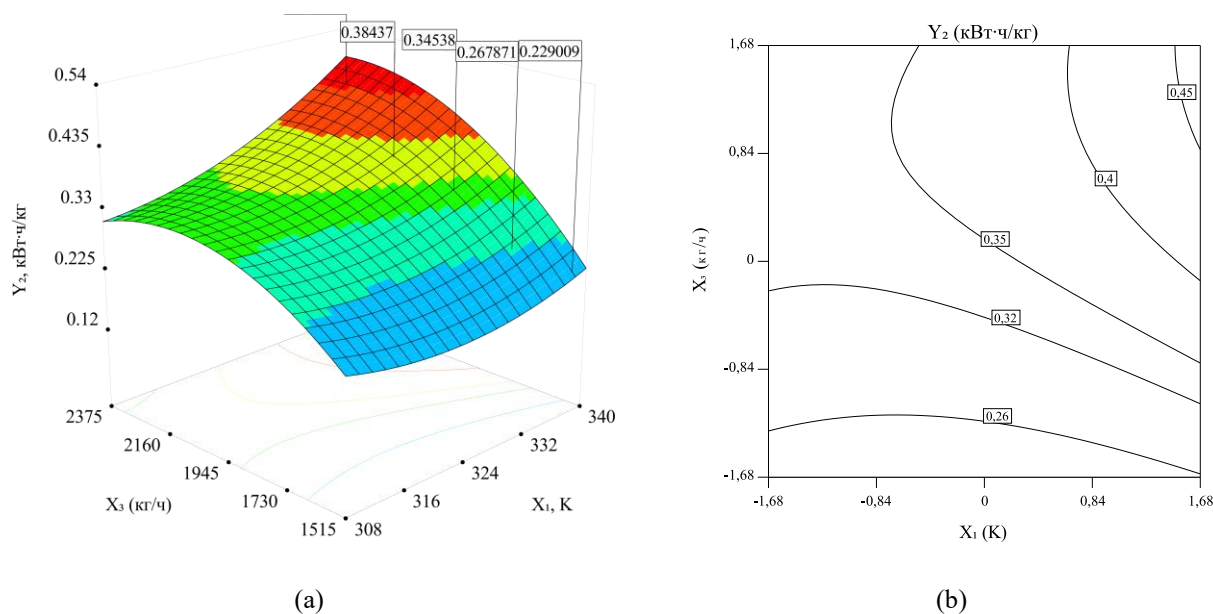


Рисунок 5. Совместное влияние на удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции (Y_2 , кВт·ч/кг) температуры теплоносителя на входе в барабан (X_1 , K) и расхода влажного материала на входе в сушилку (X_3 , кг/ч): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 5. Combined effect on specific energy consumption per 1 kg of finished product (Y_2 , kW·h/kg) of the coolant temperature at the drum inlet (X_1 , K) and the flow rate of wet material at the dryer inlet (X_3 , kg/h): а – response surface; б – equal value curves

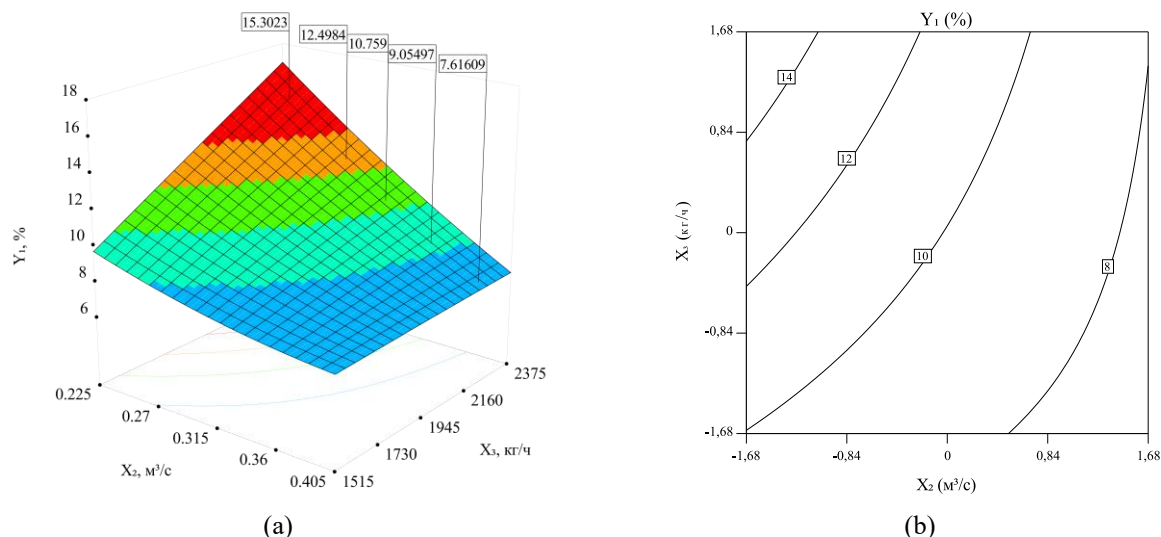


Рисунок 6. Совместное влияние на влажность высушенного продукта (Y_1 , %) расхода теплоносителя (X_2 , $\text{м}^3/\text{с}$) и расхода влажного материала на входе в сушилку (X_3 , $\text{кг}/\text{ч}$): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 6. Combined effect of heat carrier flow rate (X_2 , m^3/s) and wet material flow rate at the dryer inlet (X_3 , kg/h) on the humidity of the dried product (Y_1 , %): а – response surface; б – equal value curves

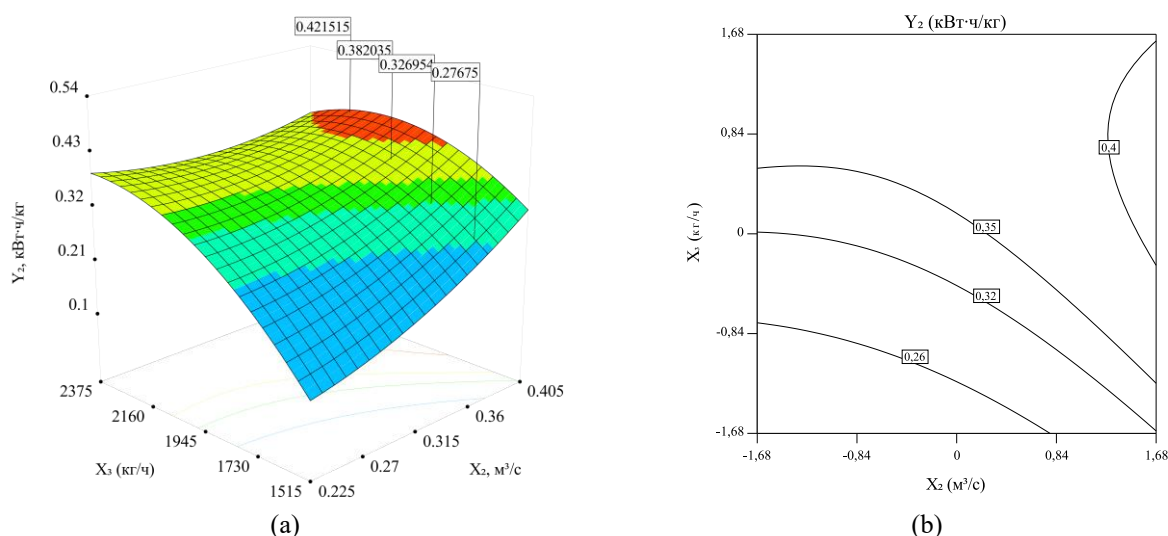


Рисунок 7. Совместное влияние на удельные энергозатраты на 1 кг готовой продукции (Y_2 , $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$) расхода теплоносителя (X_2 , $\text{м}^3/\text{с}$) и расхода влажного материала на входе в сушилку (X_3 , $\text{кг}/\text{ч}$): а – поверхность отклика; б – кривые равных значений

Figure 7. Combined effect on specific energy consumption per 1 kg of finished product (Y_2 , $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$) of heat carrier flow rate (X_2 , m^3/s) and flow rate of wet material at the dryer inlet (X_3 , kg/h): а – response surface; б – equal value curves

На следующем этапе исследований проводился поиск оптимальных режимных параметров процесса. Нахождение оптимума и решения задачи оптимизации реализовано с использованием частной функции желательности d [23], при этом выходной параметр Y_i переводился в параметрический вид функции $d_i \in \{0 \dots 1\}$. Если целевая функция Y_i определяет оптимум (максимальное или минимальное значение), или же оптимальное значение является заданным, например, экономической целесообразностью, то значения функции $d_i = 1$. В случае, когда оптимальное

значение не соответствует интервалу заданных значений $Y_j \notin \{0 \dots 1\}$, то функция $d_i = 0$. Для нахождения максимальных значений функции желательности d_i использовано выражение:

$$D = (d_1 d_2 \dots d_i)^{(1/j)}. \quad (3)$$

Задача оптимизации процесса сушки проводилась из условия достижения минимального значения удельных энергозатрат и значений влажности готового продукта, которые должны находиться в диапазоне $8,0 \div 8,5$ % (таблица 5). Полученные решения из первых 24 вариантов задачи оптимизации сведены в таблицу 6.

Таблица 5.

Постановка задачи оптимизации

Table 5.

Statement of the optimization problem

Фактор Factor	Цель Targe	Нижний предел Lower Limit	Верхний предел Upper Limit	Вес нижний Lower Weight	Вес верхний Upper Weight	Важность Importance
X ₁	в диапазоне in range	323	326	1	1	3
X ₂		0,2394	0,3906	1	1	3
X ₃		1583,8	2306,2	1	1	3
Y ₁		8,0	8,5	1	1	3
Y ₂	мин min	0,2183	0,4398	1	1	3

Таблица 6.

Массив вариантов решений оптимизационной задачи

Table 6.

An array of possible solutions to an optimization problem

Решение Solution	X ₁ , К	X ₂ , м ³ /с	X ₃ , кг/ч	Y ₁ , %	Y ₂ , (кВт×ч/кг)	Функция желательности Desirability function
1	323,000	0,316	1583,800	8,294	0,218	0,952
2	323,000	0,316	1583,909	8,299	0,218	0,951
3	323,000	0,316	1583,800	8,283	0,219	0,951
4	323,000	0,317	1583,800	8,271	0,220	0,951
5	323,000	0,315	1584,848	8,308	0,218	0,951
...	...	...	...	...	...	...
20	325,199	0,314	1583,800	8,467	0,218	0,937
21	325,452	0,313	1583,800	8,489	0,218	0,935
22	325,769	0,313	1583,801	8,517	0,218	0,932
23	325,998	0,313	1583,802	8,537	0,218	0,930
24	325,985	0,312	1586,120	8,564	0,218	0,928

Из полученного массива (таблица 6) значений функции D выбраны значения, при которых $D \rightarrow 1$, для которых рациональные интервалы значений входных факторов равны: $X_1 = 323...325$ К; $X_2 = 0,312...0,316$ м³/с; $X_3 = 1583,800...1586,120$ кг/ч.

Заключение

В результате экспериментальных исследований технологических процессов послеуборочной сушки семян киноа отечественной селекции на пилотной установке барабанной сушилки с канальными насадками установлены оптимальные интервалы значений входных факторов: температура теплоносителя на входе в барабан 323–325 град. К; расход теплоносителя 0,312–0,316 м³/с; производительность по влажным

семенам 1583,8–1586,12 кг/ч. Оптимизация процесса сушки проводилась из условия минимизации удельных энергозатрат при достижении влажности семян киноа до 8,0–8,5 % на выходе из сушилки.

Применение указанных режимов удаления влаги из семян киноа при послеуборочной обработке с использованием барабанной сушилки с канальной насадкой позволит минимизировать энергозатраты на процесс сушки, при этом позволит улучшить качество продукта в процессе хранения и последующей переработки. Полученные режимные параметры первичных процессов переработки семян могут быть использованы в будущем для усовершенствования технологий и достижения экономически эффективного способа конвективной сушки.

Литература

- 1 Romano N., Ureta M.M., Guerrero-Sánchez M. et al. Nutritional and technological properties of a quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) spray-dried powdered extract // Food Research International. 2020. Vol. 129. 108884. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108884
- 2 Kuktaite R., Repo-Carrasco-Valencia R., Mendoza C. et al. Innovatively processed quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) food: chemistry, structure and end-use characteristics // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2021. Vol. 102. P. 5065–5076. doi: 10.1002/jsfa.11214
- 3 Manjarres Hernández E.H., Morillo Coronado A.C., Cárdenas Chaparro A. et al. Yield, phenology and triterpene saponins in Colombian quinoa // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2022. Vol. 6. 919885. doi: 10.3389/fsufs.2022.919885
- 4 Султанова З.С., Тодерич К.Н. Возделывание киноа в условиях Южного Приаралья // Science Review. 2019. Т. 8. № 25. С. 16–18. doi: 10.31435/rsglobal_sr/31102019/6749
- 5 Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации за 2018 год / под ред. С.Н. Бобылева, Л.М. Григорьева. М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2018. 172 с.

- 6 Воршева А.В. Квиноа – новая перспективная крупяная культура для России, питательная ценность и история возделывания: обзор // *АгроЭкоИнфо*. 2024. № 1(61). doi: 10.51419/202141131
- 7 Alandia G., Rodríguez J.P., Jacobsen S.E. et al. Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region // *Global Food Security*. 2020. Vol. 26. 100429. doi: 10.1016/j.gfs.2020.100429
- 8 Moscon E., Blum L.E., Spehar C. et al. Kinetics and quality of quinoa seeds after drying and during storage // *Journal of Agricultural Science*. 2020. Vol. 12. № 2. P. 71–81. doi: 10.5539/jas.v12n2p71
- 9 Bakhtavar M.A., Afzal I. Climate smart Dry Chain Technology for safe storage of quinoa seeds // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 12554. doi: 10.1038/s41598-020-69190-w
- 10 Ахунбаев А.А. Оптимизация формы насадки барабанных сушилок // *Universum: технические науки*. 2023. № 6-1(111). С. 21–26. doi: 10.32743/UniTech.2023.111.6.15705
- 11 Бакин И.А., Шахов С.В., Мустафина А.С. и др. Оптимизация параметров технологии сушки и хранения сублимированной растительной продукции // *ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия*. 2023. Т. 20. № 7. С. 49–58.
- 12 Ктач В.В., Шевцов А.А. Виртуальный испытательный стенд для компьютерного проектирования барабанных сушилок по кинетическим закономерностям процесса сушки // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2023. Т. 50. № 1. С. 152–160. doi: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160
- 13 Пат. 2367865 С1 Российская Федерация, МПК F26B 11/04. Барабанная сушилка с канальной насадкой / Антипов С.Т., Шахов С.В., Гавриленков А.М.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. № 2008128107; заявл. 09.07.2008; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26.
- 14 Воронов С.С., Кузнецов И.В., Гавриленков А.М. и др. Реализация осциллирующих режимов сушки в барабанном сушильном агрегате // *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 5-1. С. 161–165.
- 15 Jabir K., Palwasha G., Qingyun L. et al. Drying kinetics and thermodynamic analysis; enhancing quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) quality profile via pre-treatments assisted germination and processing // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2025. Vol. 117. 107337. doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107337
- 16 Орлова Т.В., Айдер М. Крахмал зерна квиноа (*Chenopodium quinoa* Willd.): состав, морфология и физико-химические свойства // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51. № 1. С. 98–112. doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-98-112
- 17 Бойко А.Ф., Воронкова Н.М. Теория планирования многофакторных экспериментов. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. 75 с.
- 18 Subramani D., Tamilselvan S., Murugesan M. et al. Optimization of sand puffing characteristics of quinoa using response surface methodology // *Current Research in Nutrition and Food Science*. 2020. Vol. 8. № 2. P. 469–478. doi: 10.12944/CRNFSJ.8.2.16
- 19 Макарова Д.Ю., Новикова Е.К., Александрова Л.Ю. Методология поверхности отклика в количественном определении полисахаридов в корнях купены лекарственной // *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2023. Т. 22. № 4. С. 208–213. doi: 10.37903/vsgma.2023.4.28
- 20 Carvalho A.M.X., Souza M.R., Marques T.B. et al. Familywise type I error of ANOVA and ANOVA on ranks in factorial experiments // *Ciencia Rural*. 2023. Vol. 53. № 7. e20220146. doi: 10.1590/0103-8478cr20220146
- 21 Tabatabaei M., Hartikainen M., Miettinen K. et al. ANOVA-MOP: ANOVA decomposition for multiobjective optimization // *SIAM Journal on Optimization*. 2018. Vol. 28. № 4. P. 3260–3289. doi: 10.1137/16M1096505
- 22 Коршунов А.О., Лаврентьева Е.А., Лазарев М.А. и др. Оптимизация процесса омыления таллового пека методом планирования эксперимента // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2022. № 1(385). С. 173–187. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-173-187
- 23 Захachatнов В.Г., Попов В.М., Афонькина В.А. Функция желательности Харрингтона как критерий оптимального выбора зерносушилки // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022. № 2(94). С. 110–114. doi: 10.37670/2073-0853-2022-94-2-110-114

References

- 1 Romano N., Ureta M.M., Guerrero-Sánchez M. et al. Nutritional and technological properties of a quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) spray-dried powdered extract. *Food Research International*. 2020. vol. 129. p. 108884. doi: 10.1016/j.foodres.2019.108884
- 2 Kukkaite R., Repo-Carrasco-Valencia R., Mendoza C. et al. Innovatively processed quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) food: chemistry, structure and end-use characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. vol. 102. pp. 5065–5076. doi: 10.1002/jsfa.11214
- 3 Manjarres Hernández E.H., Morillo Coronado A.C., Cárdenas Chaparro A. et al. Yield, phenology and triterpene saponins in Colombian quinoa. *Front. Sustain. Food Syst*. 2022. vol. 6. p. 919885. doi: 10.3389/fsufs.2022.919885
- 4 Sultanova Z.S., Toderich K.N. Vozdelyvanie Kinoa v Usloviyah Yuzhnogo Priaral'ya. *Science Review*. 2019. no. 8(25). (in Russian). doi: 10.31435/rsglobal_sr/31102019/6749
- 5 Doklad o chelovecheskom razvitii v Rossijskoj Federacii za 2018 god. Ed. by Bobylev S.N., Grigoriev L.M. Moscow: Analiticheskii tsentr pri Pravitel'stve Rossijskoj Federatsii, 2018. 172 p. (in Russian)
- 6 Vorsheva A.V. Quinoa is a new promising cereal crop for Russia, nutritional value and history of cultivation: an overview. *AgroEkoInfo*. 2024. no. 1(61). (in Russian). doi: 10.51419/202141131
- 7 Alandia G., Rodríguez J.P., Jacobsen S.E. et al. Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Glob. Food Sec*. 2020. vol. 26. p. 100429. doi: 10.1016/j.gfs.2020.100429

- 8 Moscon E., Blum L.E., Spehar C. et al. Kinetics and quality of quinoa seeds after drying and during storage. *Journal of Agricultural Science*. 2020. vol. 12. no. 2. pp. 71–71. doi: 10.5539/jas.v12n2p71
- 9 Bakhtavar M.A., Afzal I. Climate smart Dry Chain Technology for safe storage of quinoa seeds. *Sci Rep*. 2020. vol. 10. p. 12554. doi: 10.1038/s41598-020-69190-w
- 10 Axunbaev A.A. Optimization of the shape of the nozzle of drum dryers. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2023. no. 6–1(111). pp. 21–26. (in Russian). doi: 10.32743/UniTech.2023.111.6.15705
- 11 Bakin I., Shahov S. et al. Optimization of drying and storage parameters for freeze-dried plant products. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2023. no. 20. pp. 49–58. (in Russian)
- 12 Tkach V.V., Shevtsov A.A. Virtual test bench for computer-aided design of drum dryers based on kinetic laws of the drying process. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2023. vol. 50. no. 1. pp. 152–160. (in Russian). doi: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160
- 13 Pat. 2367865 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK F26B 11/04. Barabannaya sushilka s kanal'noj nasadkoj / Antipov S.T., Shahov S.V., Gavrilencov A.M.; zayavitel' Voronezh. gos. tekhnol. akad. № 2008128107; zayavl. 09.07.2008; opubl. 20.09.2009. (in Russian)
- 14 Voronov S.S., Kuznetsov I.V., Gavrilencov A.M. et al. Realizaciya oscilliruyushchih rezhimov sushki v barabannom sushil'nom aggregate. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014. no. 5–1. p. 161. (in Russian)
- 15 Jabir K., Palwasha G., Qingyun L., Kunlun L. Drying kinetics and thermodynamic analysis; enhancing quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) quality profile via pre-treatments assisted germination and processing. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2025. vol. 117. p. 107337. doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107337
- 16 Orlova T.V., Aider M. Starch Grain Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, Morphology and Physico-Chemical Properties. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021. vol. 51. no. 1. pp. 98–112. (in Russian). doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-98-112
- 17 Boyko A.F., Voronkova N.M. Teoriya planirovaniya mnogofakturnykh eksperimentov. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2020. 75 p. (in Russian)
- 18 Subramani D., Tamilselvan S., Murugesan M. et al. Optimization of sand puffing characteristics of quinoa using response surface methodology. *Curr Res Nutr Food Sci*. 2020. vol. 8. no. 2. doi: 10.12944/CRNFSJ.8.2.16
- 19 Makarova D.Yu., Novikova E.K., Alexandrova L.Yu. Response surface methodology in the quantitative determination of polysaccharides in the roots of the *polygonatum officinale*. *Vestnik Smolenskoj gosudarstvennoj medicinskoj akademii*. 2023. vol. 22. no. 4. pp. 208–213. (in Russian). doi: 10.37903/vsgma.2023.4.28
- 20 Carvalho A.M.X.De, Souza M.R.De, Marques T.B. et al. Familywise type I error of ANOVA and ANOVA on ranks in factorial experiments. *Ciencia Rural*. 2023. vol. 53. no. 7. doi: 10.1590/0103-8478cr20220146
- 21 Tabatabaei M., Hartikainen M., Miettinen K. et al. ANOVA-MOP: ANOVA decomposition for multiobjective optimization. *SIAM Journal on Optimization*. 2018. vol. 28. no. 4. pp. 3260–3289. doi: 10.1137/16M1096505
- 22 Korshunov A.O., Lavrenteva E.A., Lazarev M.A. et al. Optimization of tall oil pitch saponification by experimental design. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2022. no. 1(385). pp. 173–187. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-173-187
- 23 Zakhakhatnov V.G., Popov V.M., Afonkina V.A. The Harrington desirability function as a criterion for the optimal choice of a grain dryer. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022. no. 2(94). pp. 110–114. (in Russian). doi: 10.37670/2073-0853-2022-94-2-110-114

Сведения об авторах

Сергей В. Роднищев аспирант, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sergey.2587@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0006-3413-9782>

Дмитрий В. Дмитриев учредитель, ООО «Научно-производственное объединение КВИНОА ЦЕНТР», ул. Кооперативная, 81, г. Новокубанск., Краснодарский край, 352240, Россия, rosagro.kr@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9947-174X>

Игорь А. Бакин д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия, bakin@rgau-msha.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5678-1975>

Сергей В. Шахов д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, s_shahov@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5865-2357>

Information about authors

Sergey V. Rodnischchev graduate student, machines and equipment for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sergey.2587@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0006-3413-9782>

Dmitrij V. Dmitriev CEO, LLC "Scientific and Production Association Quinoa Center", Cooperative st., 81 Novokubansk, Krasnodarskiy Territory, 352240, Russia, rosagro.kr@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9947-174X>

Igor A. Bakin Dr. Sci. (Engin.), professor, processes and apparatus for processing industries department, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49 Moscow, 127434, Russia, bakin@rgau-msha.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5678-1975>

Sergey V. Shakhov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and equipment for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, s_shahov@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5865-2357>

Ирина А. Глотова д.т.н., профессор, кафедра технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, glotova-irina@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9991-1183>

Александр С. Муравьев к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, hntrun@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5989-0752>

Вклад авторов

Сергей В. Роднищев предложил методику проведения эксперимента

Дмитрий В. Дмитриев обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

Игорь А. Бакин обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

Сергей В. Шахов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Ирина А. Глотова консультация в ходе исследования

Александр С. Муравьев консультация в ходе исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Irina A. Glotova Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of storage and processing of agricultural products department, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina st., 1 Voronezh, 394087, Russia, glotova-irina@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9991-1183>

Alexander S. Muravyev Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, machines and equipment for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, hntrun@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5989-0752>

Contribution

Sergey V. Rodnishchev proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Dmitrij V. Dmitriev review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Igor A. Bakin review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

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

Irina A. Glotova consultation during the study

Alexander S. Muravyev consultation during the study

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 22/04/2025
Received 21/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 22/04/2025

Трегалоза как защитный стресс-фактор пробиотических дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii*

Анастасия С. Андреева	¹	aandreeva@itmo.ru	 0000-0001-6179-2265
Татьяна В. Меледина	¹	meledinata@ya.ru	 0000-0001-7485-2802
Инна В. Новикова	²	noviv@list.ru	 0000-0002-2360-5892
Алексей А. Федоров	¹	aafedorov@itmo.ru	 0000-0003-3860-7708
Олеся С. Веселова	¹	ole-saveselova3308@gmail.com	 0009-0007-6397-8339
Виктор О. Фаустов	¹	faustoff94@ya.ru	 0009-0009-5998-5565

¹ Университет ИТМО, ул. Ломоносова, 9, Санкт-Петербург, 191002, Россия

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

Аннотация. *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* (*S. boulardii*) – это пробиотический штамм дрожжей, который является единственным дрожжевым пробиотиком, одобренным FDA (U.S. Food and Drug Administration) для применения в клинической практике. Обычно используется для профилактики или лечения острой диареи и других желудочно-кишечных расстройств, включая антибиотик-ассоциированную диарею, вызванную инфекциями *Clostridium difficile*. Отсутствие зарегистрированной и доступной к реализации технологии культивирования пробиотических дрожжей, а также выпуск препарата в сухой активной форме, ставит несколько фундаментальных задач для исследования. Помимо подбора питательной среды и разработки технологии получения биомассы, необходимо создать условия для повышения ксерорезистентности культуры. В процессе жизненного цикла получения пробиотического лиофилизата дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* на культуру воздействует множество стрессов. Возникновение стрессов, способствует снижению активности штамма, а также при воздействии окислительного и термических стрессов, запрограммированной гибели клеток, что представляет риск для жизнеспособности пробиотических микробов. В результате снижается метаболическая активность дрожжей и увеличивается количество нежизнеспособных клеток. Одним из способов сохранения физиологической активности клеток после дегидратации является направленный синтез трегалозы. Исследования, проведенные с пекарскими дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* свидетельствуют от том, что трегалоза – синтезируется при отсутствии эффекта Кребтри в стационарной стадии роста при температуре от 37 до 42 °C. Сведений о биосинтезе трегалозы в дрожжах *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* отсутствуют. Исследование отражает зависимость углеродного состава и параметров культивирования, на процесс накопления трегалозы клеткой. Представлены сравнения потенциала образования трегалозы в культурах *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* от *Saccharomyces cerevisiae*. В результате проведения исследований установлено, что для получения ксерорезистентных дрожжей, содержащих более 15 % трегалозы, способствует культивирование *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* при температуре 39–40 °C с дефицитом питательных веществ в среде.

Ключевые слова: дрожжи, пробиотики, трегалоза, питание, выживаемость микроорганизмов, культивирование, штамм.

Trehalose as a protective stressor for the probiotic yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii*

Anastasia S. Andreeva	¹	aandreeva@itmo.ru	 0000-0001-6179-2265
Tatiana V. Meledina	¹	meledinata@ya.ru	 0000-0001-7485-2802
Inna V. Novikova	²	noviv@list.ru	 0000-0002-2360-5892
Alexey A. Fedorov	¹	aafedorov@itmo.ru	 0000-0003-3860-7708
Olesya S. Veselova	¹	ole-saveselova3308@gmail.com	 0009-0007-6397-8339
Victor O. Faustof	¹	faustoff94@ya.ru	 0009-0009-5998-5565

¹ , ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia

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

Abstract. *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* (*S. boulardii*) is a probiotic yeast strain that is the only yeast probiotic approved by the FDA (U.S. Food and Drug Administration) for clinical use. It is commonly used to prevent or treat acute diarrhea and other gastrointestinal disorders, including antibiotic-associated diarrhea caused by *Clostridium difficile* infections. The lack of a registered and available technology for the cultivation of probiotic yeast, as well as the release of the drug in a dry active form, poses several fundamental tasks for the study. In addition to the selection of a nutrient medium and the development of a technology for obtaining biomass, it is necessary to create conditions for increasing the xeroreistance of the crop. During the life cycle of *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* yeast probiotic lyophilisate, the culture is exposed to many stresses. The occurrence of stress contributes to a decrease in the activity of the strain, as well as when exposed to oxidative and thermal stresses, programmed cell death, which poses a risk to the viability of probiotic microbes. As a result, the metabolic activity of yeast decreases, and the number of non-viable cells increases. One of the ways to preserve the physiological activity of cells after dehydration is the directed synthesis of trehalose. Studies conducted with baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* indicate that trehalose is synthesized in the absence of the Crabtree effect in the stationary stage of growth at a temperature of 37 to 42 °C. There is no information about the biosynthesis of trehalose in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii*. The study reflects the dependence of the carbon composition and cultivation parameters on the process of trehalose accumulation by the cell. Comparisons of the potential for trehalose formation in *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* cultures from *Saccharomyces cerevisiae* are presented. As a result of the research, it has been established that to obtain xeroreistant yeasts containing more than 15 % trehalose, the cultivation of *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* at a temperature of 39–40 °C with a deficiency of nutrients in the medium is facilitated.

Keywords: yeast, probiotics, trehalose, nutrition, survival of microorganisms, cultivation, strain.

Для цитирования

Андреева А. С., Меледина Т. В., Новикова И. В., Федоров А. А., Веселова О. С., Фаустов В. О. Трегалоза как защитный стресс-фактор пробиотических дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 106–115. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-106-115

For citation

Andreeva A.S., Meledina T.V., Novikova I.V., Fedorov A.A., Veselova O.S., Faustof V.O. Trehalose as a protective stressor for the probiotic yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii*. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 106–115. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-106-115

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

Введение

Пробиотики обычно определяются как живые микроорганизмы с низкой патогенностью или без нее, которые оказывают благотворное влияние на здоровье хозяина при употреблении в достаточных количествах [2]. Большинство микроорганизмов, признанных пробиотиками, являются бактериями. Тем не менее, непатогенные дрожжи, *Saccharomyces cerevisiae boulardii*, являются единственными пробиотическими дрожжами, которые были одобрены Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов для употребления в пищу человеком [3]. Назначение *Saccharomyces cerevisiae boulardii* было клинически одобрено для лечения антибиотик-ассоциированной диареи (ААД), связанной с бактериальными инфекциями, такими как *Clostridium difficile*, на долю которой приходится треть клинических проявлений ААД [4–8]. Польза *Saccharomyces cerevisiae boulardii* в качестве пробиотика подтверждена несколькими клиническими исследованиями, которые продемонстрировали его эффективность в профилактике острых кишечных заболеваний.

Трегалоза выполняет значительно больше функций в жизнедеятельности дрожжей, чем гликоген. Так, помимо резервного депо клетки, она обладает свойствами осмо-, крио- и термопротектора. Протекторные свойства связаны с наличием трегалозы во внешней мембране ЦПМ, благодаря этому предотвращается денатурация белка и фазовые переходы в липидных слоях клетки, когда в мембране нарушается ориентация молекул. В этих условиях высокое содержание трегалозы в клетках позволяет сохранить их жизнеспособность как при замораживании, так и при высушивании (дегидратации). Подобными свойствами обладают также маннит, сорбит, аминокислоты пролин и глутаминовая кислота, а также сахароза [9].

Saccharomyces cerevisiae boulardii – непатогенные дрожжи, впервые выделенные французским ученым Анри Буларом из плодов личи и мангостина в 1923 году [10]. Более ранние сообщения указывали на то, что *S. boulardii* является штаммом *Saccharomyces cerevisiae*, имеющим высокий уровень геномного родства (~99 %) [11]. Дальнейший анализ таксономических, метаболических и генетических свойств показал, что эти два штамма имеют различный генетический состав и профили ферментов [10–13].

Примечательно, что *S. boulardii* является термотолерантным штаммом, который оптимально растет при 37 °С (физиологической температуре хозяина), в то время как штаммы *S. cerevisiae* растут и метаболизируются при 30 °С [14, 15]. *S. boulardii* это кислотоустойчивые дрожжи, которые выделяют некоторые

определенные физиологически активные факторы. Некоторые недавние исследования показали, что *S. boulardii*, более устойчив, чем штамм *S. cerevisiae*, при воздействии моделируемой желудочной среды [16, 17]. Важно отметить, что *Saccharomyces boulardii* продемонстрировал клиническую и экспериментальную эффективность при желудочно-кишечных заболеваниях с преобладающим воспалительным компонентом [13–18]. Благодаря этим уникальным характеристикам *Saccharomyces cerevisiae boulardii* широко используется в качестве пробиотика [19, 20].

Пробиотики – это особая группа живых микроорганизмов, которые поддерживают или улучшают микробный баланс кишечника, тем самым способствуя пользе для здоровья потребителей [21, 22]. Чтобы продемонстрировать пользу для здоровья человека, пробиотики должны соответствовать нескольким критериям [21–23]. Он должен обладать отличными технологическими свойствами, чтобы его можно было производить и добавлять в пищевые продукты без потери жизнеспособности и функциональности [24, 25]. Он должен выжить через верхние отделы желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и прибыть живым к месту своего действия, а также быть способным функционировать в кишечной среде.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выступало три штамма дрожжей:

1. *Saccharomyces cerevisiae boulardii* ВКПМ Y-3925
2. *Saccharomyces cerevisiae boulardii* препарат Энтерол
3. *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-1037

Исследование морфологии. Для оценки морфологического состояния микроорганизмов образцы высевали дрожжей высевали на плотную питательную среду UEPD истончающим штрихом, после чашки Петри инкубировали 48 часов при температуре 30⁰ С в термостате. Выросшие колонии оценивали макроморфологически внешне Binocular microscope Binocular microscope, микроморфология оценивалась с помощью микроскопии препарата раздавленная капля, на микроскопе Upright microscope (ZEISS Axio Lab. A1).

Получение инокулята. Для реализации дальнейших исследований использовалась накопительная культура дрожжей лабораторной стадии культивирования. В качестве основной питательной среды использовали среду UEPD. Культивирование реализовывали простым периодическим способом. В стерильную емкость со средой помещали 1 петлю микроорганизмов, образец инкубировали 24 часа при температуре 30 °С,

после производили пересев в 300мл среды, процесс повторяли до увеличения объема среды 5000мл. На каждом этапе дрожжи переносили в емкость большего объема, кратного 10. Процесс пересева был реализован в чистой зоне микробиологической лаборатории в условиях Microbiological safety cabinet (БМБ-II «Ламинар-С»–1,2). Общий объем дрожжей в среде после окончательного этапа производства биомассы помещали в холодильное оборудование с температурным режимом 6–4 °С, для интенсификации флокуляции, культуральную жидкость удаляли, а дрожжевой осадок отмывали от остатков питательной среды физиологическим раствором и многократным центрифугированием на Unrefrigerated benchtop centrifuge (Sigma 3–16L) for 6 50 ml test tubes. Абсолютно сухую биомассу дрожжей определяли гравиметрическим способом.

Определение термоустойчивости культур.

Для исследования толерантности микроорганизмов к температурам производили посев культур в полусинтетическую питательную среду, состоящую из пептона, декстрозы и дрожжевого экстракта (UEPD) в количестве 1 % абсолютно сухой биомассы дрожжей с учетом концентрации сахаров и объема среды. Измерения проводили на планшетном ридере Microplate Reader SPECTROstar Nano 12 часов с постоянным перемешиванием. В качестве температурного диапазона воздействия выбрано 30–45 °С с шагом 5 °С.

Содержание трегалозы. Для определения содержания трегалозы в дрожжевых клетках используется метод ступенчатого фракционирования углеводов по Тревелену и Гаррисону [27] с последующим определением индивидуального углевода в каждой фракции колориметрически при 590 нм с Антроновым реактивом [28]. Перед определением содержания трегалозы в клетках дрожжей строится калибровочная кривая по стандартным растворам глюкозы (рисунок 1).

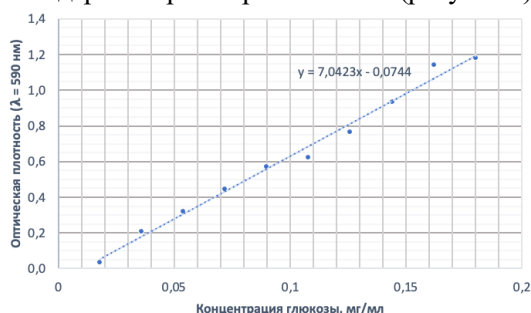


Рисунок 1. Калибровочная кривая по стандартным растворам глюкозы

Figure 1. Calibration curve for standard glucose solutions

Формула расчета содержания трегалозы %, от СВ:

$$A = (B \cdot 10 \cdot 100) : C \quad (1)$$

где А – содержание трегалозы, % от СВ; В – количество глюкозы в 1 см³ раствора, определенное

по величине оптической плотности с помощью калибровочного графика, мг; 10 – разведение пробы; С – содержание СВ в 10 см³ исследуемой суспензии дрожжей, мг; 100 – пересчет на проценты.

Спектрофотометрия в ультрафиолетовой и видимой областях (ОФС.1.2.1.1.0003.15)

Измерение оптической плотности проводят при указанной длине волны (590 нм) с использованием кювет с толщиной слоя 1 см и при температуре (20 ± 1) °С по сравнению с тем же растворителем или той же смесью растворителей, в которой растворено вещество.

Гравиметрический метод определение абсолютно сухой биомассы дрожжей

Пипеткой отбирают 10 см³ культуральной жидкости, помещают в центрифугу. Обрабатывают 10 мин при скорости 5000 об/мин. Затем сливают над осадочную жидкость и дистиллированной водой из цилиндра (5 см³) стеклянной палочкой промывают осадок, оставшиеся 5 см³ воды используют для смыва находящихся на палочке дрожжей (количественный метод). После этого снова центрифугируют 10 мин при скорости 5000 об/мин. Далее дрожжи мерно, как указано выше, переносят в бюксы с известной массой. Бюкс помещают в сушильный шкаф и сушат до постоянной массы при 105 °С в течение не менее 10 часов.

Влияние температуры культивирования и питательной углеводного компонента среды на содержание трегалозы в дрожжах. Для оценки влияния температуры и питательной среды на накопление трегалозы, готовили полусинтетические питательные среды с содержанием сахарозы 2; 5; 8 %, глюкозы 2; 5; 8 % и мальтозы 2; 5; 8 %. Тип сахара был выбран с учетом того, что эти сахара являются основными в составе многих природных питательных сред для культивирования микроорганизмов. Приготовленные среды разливали в пробирки стерилизовали 15 минут при давлении 1.1МПа и температуре 121 °С. В условиях микробиологического бокса в пробирки со стерильными питательными средами вносили 1 % инокулята дрожжей. Образцы помещали в термостаты и культивировали 24 часа при температуре 25; 35; 45 °С. После в исследуемых образцах определяли содержание трегалозы.

Направленное увеличение содержания трегалозы в пробиотических дрожжах в простой периодической культуре с притоком питательных веществ. При производстве ксерорезистентной биомассы, необходимо поддерживать строгие параметры культивирования для того, чтобы повысить экономический коэффициент процесса. Из полученных данных и литературных источников известно, что повышение температуры до 37–45 °С способствует накоплению трегалозы дрожжами. Такая температура может

быть не только термическим стрессом для штаммов, но и причиной смерти клеток. Для того, чтобы снизить негативный эффект от воздействия параметров температуры, необходимо изменить режим производства биомассы на этапе выхода культуры на стационарную стадию роста, с учетом того, что именно на данной стадии достигается оптимум прироста дрожжей.

Моделирование системы производственного культивирования производилось на био-реакторе Biostat A MO UniVessel Glass benchtop bioreactor (2 liter volume). В качестве питательной среды использовалась свекловичная меласса. Технология параметров культивирования, состав среды и приток питательных веществ были смоделированы относительно потенциальных данных на пивоваренные дрожжи [28]. Культивирование длилось 24 часа, каждый час производили

отбор проб, определяли содержание абсолютно сухой биомассы дрожжей. При переходе культуры на стационарную стадию роста отключали приток питательных веществ и поднимали температуру культивирования до 37 °С. Определяли содержание трегалозы до и после изменения параметров.

Результаты и обсуждения

Стоит отметить, что морфология *Saccharomyces cerevisiae boulardii* ВКПМ Y-3925 и *Saccharomyces cerevisiae boulardii* препарат Энтерол, идентична. Форма дрожжей и размер клеток штаммов схожи в отличие от культуры *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-1037 хлебопекарные дрожжи, которые имеют более округлую форму и больший размер клетки.

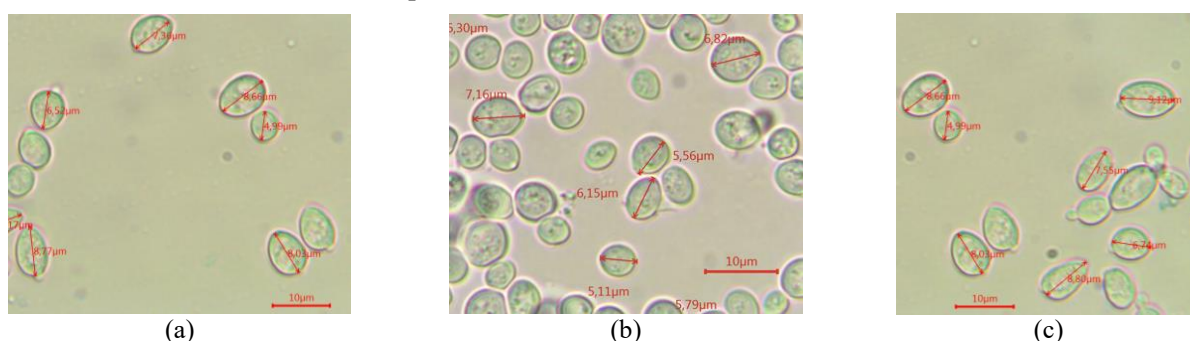


Рисунок 2. Морфология дрожжей: А – *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-103, В – *Saccharomyces boulardii* ВКПМ Y-3925, С – *Saccharomyces boulardii* Энтерол

Figure 2. Morphology of yeast: A - *Saccharomyces cerevisiae* VKPM Y 103, B - *Saccharomyces boulardii* VKPM Y 3925, C - *Saccharomyces boulardii* Enterol

Термоустойчивость микроорганизмов.

Исследуемые штаммы оценивали на термоустойчивость в жидкой питательной среде на планшетном ридере Microplate Reader SPECTROstar Nano 12 часов с постоянным перемешиванием. Каждые 10 минут инкубирования в лунках планшетного ридера замерялась

оптическая плотность образцов. Изменение оптической плотности может характеризовать увеличение биомассы, а не концентрации клеток дрожжей. В качестве температурного диапазона исследования, выбраны 30–45 °С с шагом 5 °С. Результаты исследований приведены на рисунке 3, ниже в виде кривых.

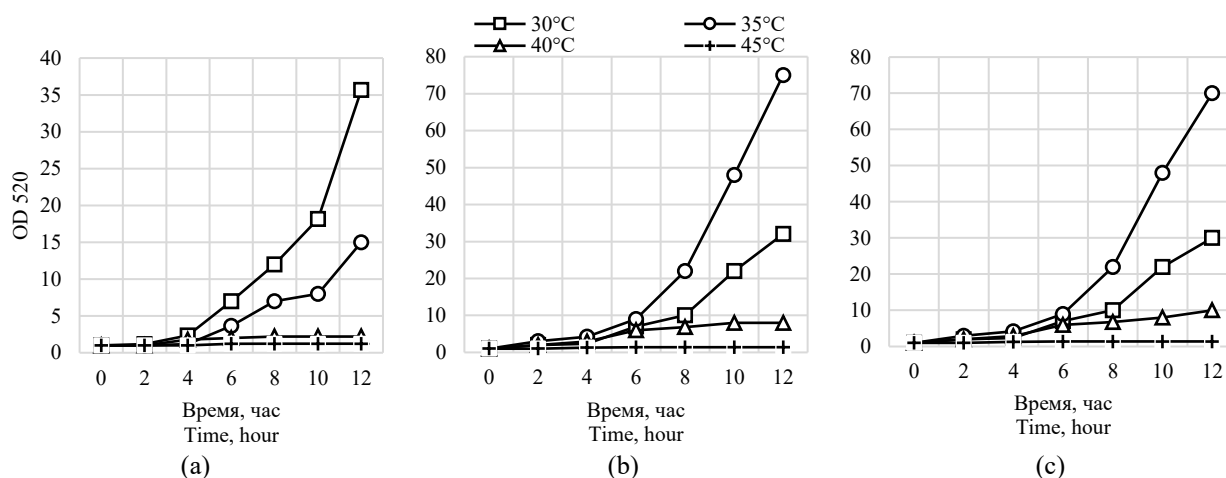


Рисунок 3. Кривые роста штаммов: А – *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-103, В – *Saccharomyces boulardii* ВКПМ Y-3925, С – *Saccharomyces boulardii* Энтерол в зависимости от температуры культивирования

Figure 3. Growth curves of the following strains: A - *Saccharomyces cerevisiae* VKPM Y 103, B - *Saccharomyces boulardii* VKPM Y 3925, C - *Saccharomyces boulardii* Enterol depending on the cultivation temperature

Наблюдается снижение жизнеспособности всех штаммов при повышении температуры выше 40 °С. У пробиотических дрожжей в сравнении с хлебопекарным штаммом, наблюдается устойчивость к повышенным температурам. Прирост биомассы, то есть

повышение оптической плотности у пробиотических штаммов выше при 35 °С в сравнении с хлебопекарным штаммом 30 °С.

Влияние температуры культивирования и питательной углеводного компонента среды на содержание трегалозы в дрожжах.

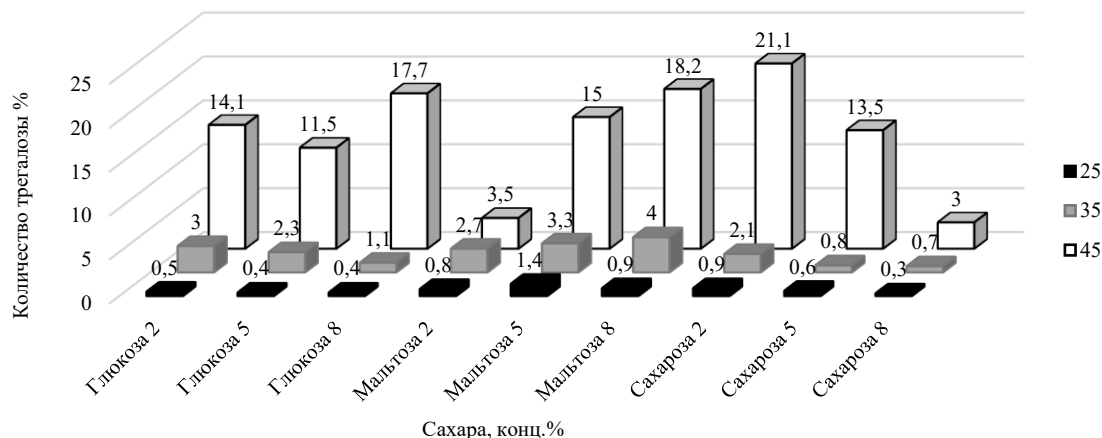


Рисунок 4. Концентрация трегалозы, штамм *Saccharomyces boulardii* ВКПМ Y-3925

Figure 4. Trehalose concentration, *Saccharomyces boulardii* strain VKPM Y 3925

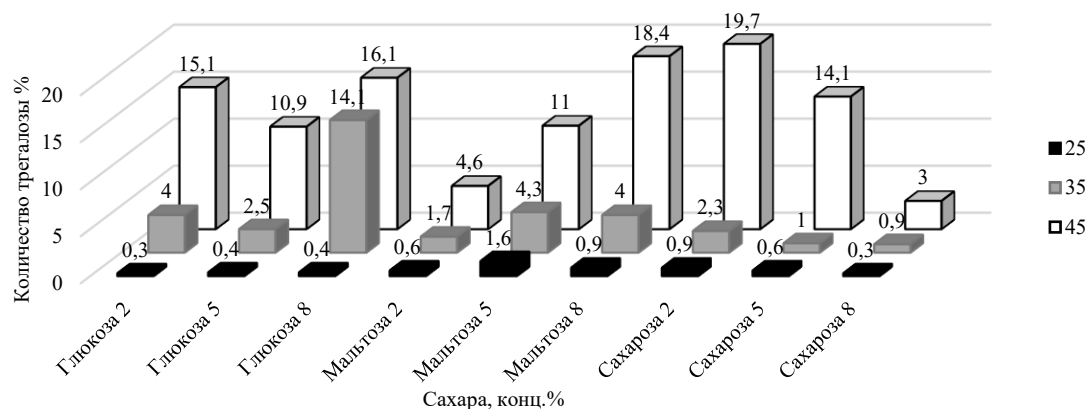


Рисунок 5. Концентрация трегалозы, штамм *Saccharomyces boulardii* Энтерол

Figure 5. Trehalose concentration, *Saccharomyces boulardii* Enterol strain

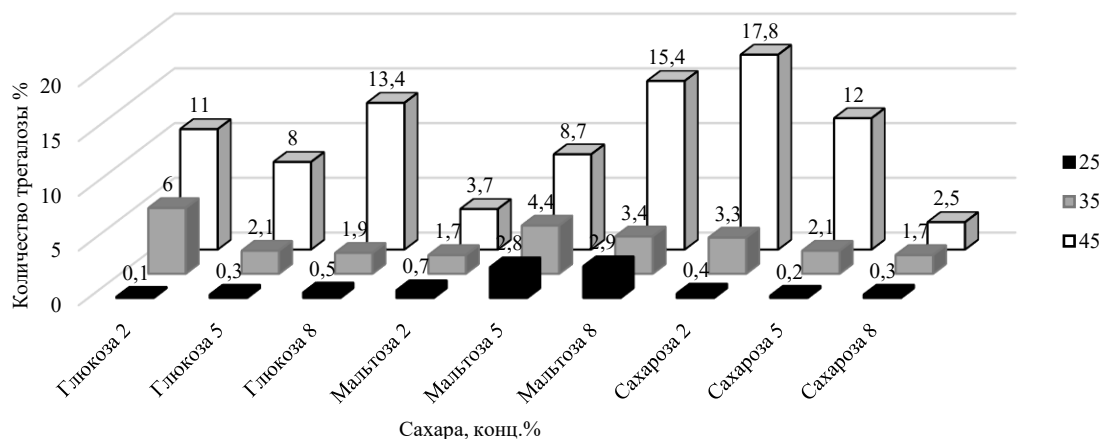


Рисунок 6. Концентрация трегалозы, штамм *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-103

Figure 6. Trehalose concentration, *Saccharomyces cerevisiae* strain VKPM Y 103

Полученные данные подтверждают литературные сведения научного сообщества, о том, что при повышении температуры, значительно вырастает процент трегалозы в клетке. Также стоит отметить, что синтез трегалозы во всех исследуемых штаммах интенсифицируется, со снижением концентрации сбраживаемых сахаров в среде. С использованием сахарозы как питательного компонента синтетической среды, наблюдается максимальное содержание внутриклеточного протектора.

Стоит отметить, что потенциал накопления трегалозы дрожжами *Saccharomyces cerevisiae boulardii* ВКПМ Y-3925 больше, чем в клетках хлебопекарных *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-1037. Анализ данных по количеству живых клеток исследуемых штаммов при разных температурах, свидетельствует о том, что при 40–45 °С культуры снижают свою жизнедеятельность.

При промышленном культивировании использование таких температур, может пагубно сказаться на качестве инокулята.

Для дальнейших исследований, с целью направленного синтеза трегалозы в клетке, в качестве источника сахарозы – используется подготовленная питательная среда меласса. Для сохранения физиологической активности принято, не повышать температуру культивирования выше 37–38 °С.

Основываясь на полученных результатах, помимо увеличения температуры и подбора пит среды, необходимо определить время изменения температурных параметров, с целью увеличения экономического коэффициента производства, чтобы стрессовая для клетки температура не являлась подавляющим фактором на всех стадиях культивирования.

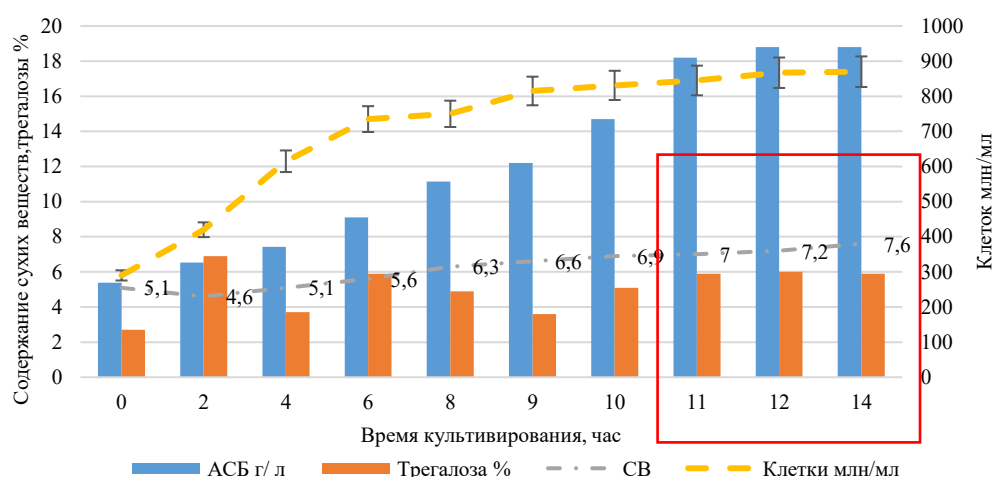


Рисунок 7. Содержание трегалозы при культивировании в ферментере *Saccharomyces cerevisiae boulardii* ВКПМ Y-3925
Figure 7. Trehalose content when cultured in *Saccharomyces cerevisiae boulardii* VKPM Y 3925 fermenter

Модельная ферментация с притоком питательной среды на ферментере, отражает кинетические параметры роста культуры, засев инокулята 0,025 % АСБ, температура культивирования 30–32 °С. На рисунке отражено содержание трегалозы в клетке на час культивирования, количество клеток выражено в абсолютно сухой биомассе и концентрации млн/мл, дополнительно отслеживалось содержание растворенной сахарозы в среде. Из рисунка следует, что минимальное содержание трегалозы в культуре приходится на стадию адаптации штамма, стационарная стадия наступает на 12–14 час культивирования, это отражает количественное содержание клеток и рост содержания растворенной сахарозы в среде, на момент культивирования. Стоит отметить, что содержание трегалозы также не изменяется на 12–14 час.

Для направленного накопления трегалозы в клетке, последующие запуски ферментера проводили в аналогичном режиме, но по наступлению 12-го часа культивирования отключали приток питательных веществ и поднимали температуру до 37–39 °С. На рисунке 8 представлено содержание трегалозы после изменения параметров культивирования.

Для оценки ростовой способности культур и анализа накопления трегалозы, производили культивирование штаммов *Saccharomyces cerevisiae boulardii* ВКПМ Y-3925, *Saccharomyces cerevisiae boulardii* Энтерол и *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ Y-1037, при аналогичном режиме. Содержание трегалозы %, с изменением параметров трех штаммов представлено на рисунке 9.

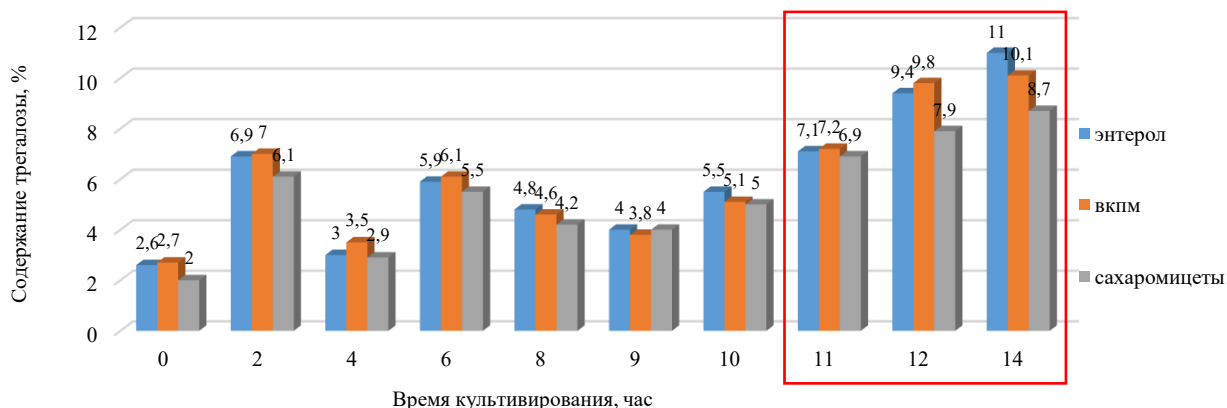


Рисунок 8. Накопление трегалозы с изменением параметров

Figure 8. Trehalose accumulation with changing parameters

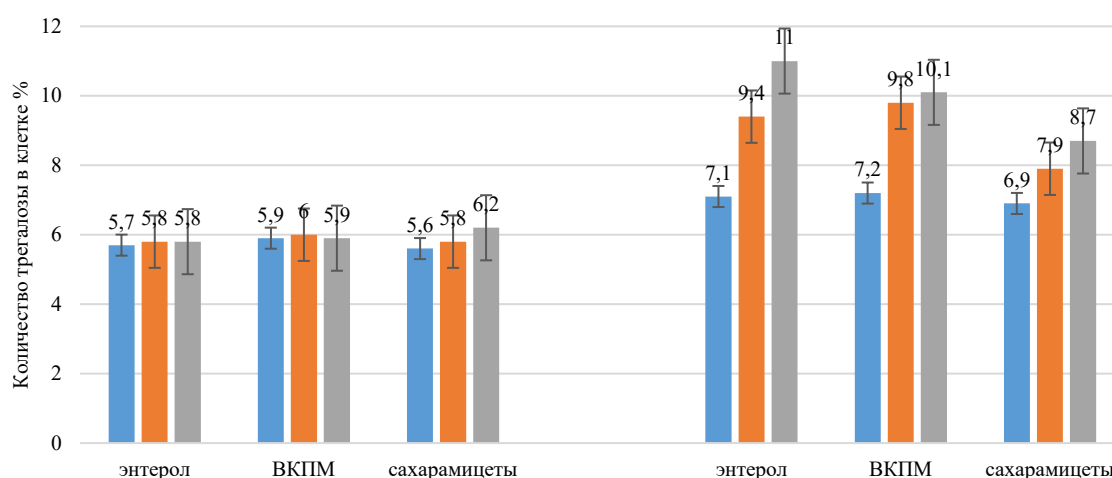


Рисунок 9. Накопление трегалозы с изменением параметров

Figure 9. Trehalose accumulation with changing parameters

Закключение

Температура культивирования и концентрация сахара в среде действительно оказывают значительное влияние на накопление трегалозы в пробиотических дрожжах. Высокие концентрации сахара в питательной среде ингибируют синтез трегалозы из-за катаболитной репрессии (дрожжи предпочитают использовать сахар для роста, а не для накопления запасных веществ). Умеренные концентрации сахара до 2–5 % могут способствовать накоплению трегалозы, особенно в условиях углеводного голодания – когда сахар почти исчерпан. Осмотический стресс, вызванный высокими концентрациями сахара, 15–20 %, по данным научных исследований, может стимулировать синтез трегалозы как совместимого растворенного вещества, защищающего клетки от обезвоживания. Существуют данные, что косвенную роль на накопление трегалозы в пробиотических дрожжах играют дополнительные факторы: ограничение азота в питательной среде, аэрация, pH (слабокислые условия ~5.0–6.0).

Результаты исследования показывают, что повышение температуры и отключение притока питательных веществ во время культивирования в простой периодической культуре на момент выхода в стационарную стадию роста, повышает процент трегалозы. Соответственно вместе с трегалозой вырастает уровень жизнеспособности микроорганизма. Следовательно изменение параметров культивирования на этапе перехода фаз роста клетки позволяет сохранить объём накопленной биомассы и повысить ее выживаемость при последующих технологических этапах производства.

Для максимального накопления трегалозы в пробиотических дрожжах, при производственном культивировании необходимо, повысить температуру культивирования до 39–40 °C на двенадцатый час производства биомассы, а также создать дефицит питательных веществ для клетки. Корректировка параметров культивирования позволит получить биомассу с высокой концентрацией трегалозы, соответственно с большим потенциалом к выживаемости после сушки и замораживания.

Литература

- 1 U.S. Food and Drug Administration: официальный сайт. URL: <https://www.fda.gov> (дата обращения: 20.03.2025)
- 2 Ranjha M.M.A.N., Shafique B., Batool M. et al. Nutritional and health potential of probiotics: a review // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 23. 11204. doi: 10.3390/app112311204
- 3 McFarland L.V., Li T. Efficacy and safety of *Saccharomyces boulardii* CNCM I-745 for the treatment of pediatric acute diarrhea in China: a systematic review and meta-analysis // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2025. Vol. 15. 1587792. doi: 10.3389/fcimb.2025.1587792
- 4 Liao W., Chen C., Wen T. et al. Probiotics for the prevention of antibiotic-associated diarrhea in adults: a meta-analysis of randomized placebo-controlled trials // *Journal of Clinical Gastroenterology*. 2021. Vol. 55. № 6. P. 469-480. doi: 10.1097/MCG.0000000000001464
- 5 Mourey F., Sureja V., Kheni D. et al. A multicenter, randomized, double-blind, placebo-controlled trial of *Saccharomyces boulardii* in infants and children with acute diarrhea // *The Pediatric Infectious Disease Journal*. 2020. Vol. 39. № 11. P. e347-e351. doi: 10.1097/INF.0000000000002849
- 6 Bader M.S., Hawboldt J., Main C. et al. Review of high dose vancomycin in the treatment of *Clostridioides difficile* infection // *Infectious Diseases*. 2020. Vol. 52. № 12. P. 847-857. doi: 10.1080/23744235.2020.1800080
- 7 Tariq R., Tahir M.W., Hayat M. et al. Systematic review and meta-analysis: safety and efficacy of *Saccharomyces boulardii* for prevention of *Clostridioides difficile* infection // *Journal of Gastrointestinal Infections*. 2022. Vol. 12. № 2. P. 94-100. doi: 10.1055/s-0043-1760738
- 8 Sirsat G.M., Saraf R. Beneficial Effect of Probiotic *Saccharomyces Boulardii* in Management of Acute Diarrhoea of Children-A Randomized Controlled Trial // *Research Journal of Medical Sciences*. 2024. Vol. 18. P. 500-504. doi: 10.36478/makrjms.2024.11.500.504
- 9 Ting T.Y., Lee W.J., Goh H.H. Molecular Genetics and Probiotic Mechanisms of *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2025. P. 1-15. doi: 10.1007/s12602-025-10634-y
- 10 Duffey H.E., Watson A.K., McCann S.M. et al. Genomic and phenotypic comparison of *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces boulardii* // *bioRxiv*. 2025. 2025.09.08.674931. doi: 10.1101/2025.09.08.674931
- 11 Samakkarn W., Vandecruys P., Moreno M.R.F. et al. New biomarkers underlying acetic acid tolerance in the probiotic yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2024. Vol. 108. № 1. 153. doi: 10.1007/s00253-023-12946-x
- 12 Gopalan S., Al-Sinawi B., Al-Mogbali Z. et al. Unique properties of yeast probiotic *Saccharomyces boulardii* CNCM I-745: A narrative review // *Cureus*. 2023. Vol. 15. № 10. e46314. doi: 10.7759/cureus.46314
- 13 Hudson L.E., McDermott C.D., Stewart T.P. et al. Characterization of the probiotic yeast *Saccharomyces boulardii* in the healthy mucosal immune system // *PLoS One*. 2016. Vol. 11. № 4. e0153351. doi: 10.1371/journal.pone.0153351
- 14 Rajkowska K., Kunicka-Styczynska A. Probiotic activity of *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* against human pathogens // *Food Technology and Biotechnology*. 2012. Vol. 50. № 2. P. 230-236.
- 15 Rajkowska K., Kunicka-Styczynska A. Probiotic properties of yeasts isolated from chicken feces and kefir // *Polish Journal of Microbiology*. 2010. Vol. 59. № 4. P. 257-263. doi: 10.33073/pjm-2010-039
- 16 Suvarna S., Dsouza J., Ragavan M.L. et al. Potential probiotic characterization and effect of encapsulation of probiotic yeast strains on survival in simulated gastrointestinal tract condition // *Food Science and Biotechnology*. 2018. Vol. 27. № 3. P. 745-753. doi: 10.1007/s10068-018-0310-8
- 17 Gut A.M., Vasiljevic T., Yeager T. et al. Salmonella infection-prevention and treatment by antibiotics and probiotic yeasts: a review // *Microbiology*. 2018. Vol. 164. № 11. P. 1327-1344. doi: 10.1099/mic.0.000709
- 18 Fakrudin M., Hossain M.N., Ahmed M.M. Antimicrobial and antioxidant activities of *Saccharomyces cerevisiae* IFST062013, a potential probiotic // *BMC Complementary and Alternative Medicine*. 2017. Vol. 17. 64. doi: 10.1186/s12906-017-1591-9
- 19 Banik A., Mondal J., Rakshit S. et al. Amelioration of cold-induced gastric injury by a yeast probiotic isolated from traditional fermented foods // *Journal of Functional Foods*. 2019. Vol. 59. P. 164-173. doi: 10.1016/j.jff.2019.05.039
- 20 Hsu S.A., Chou J.Y. Yeasts in fermented food and kefir: in vitro characterization of probiotic traits // *Journal of Animal & Plant Sciences*. 2021. Vol. 31. № 2. P. 461-470. doi: 10.36899/JAPS.2021.2.0245
- 21 Sanders M.E., Merenstein D., Merrifield C.A. et al. Probiotics for human use // *Nutrition Bulletin*. 2018. Vol. 43. № 3. P. 212-225. doi: 10.1111/nbu.12334
- 22 World Health Organization. Evaluation of certain contaminants in food: ninety-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. WHO, 2023. 125 p.
- 23 Aghamohammad S., Hafezi A., Rohani M. Probiotics as functional foods: How probiotics can alleviate the symptoms of neurological disabilities // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2023. Vol. 163. 114816. doi: 10.1016/j.biopha.2023.114816
- 24 Martín R., Olivares M., Marín M.L. et al. Probiotic potential of 3 lactobacilli strains isolated from breast milk // *Journal of Human Lactation*. 2005. Vol. 21. № 1. P. 8-17. doi: 10.1177/0890334404272393
- 25 Trevelyan W.E., Harrison J.S. Studies on yeast metabolism. I. Fractionation and microdetermination of cell carbohydrates // *Biochemical Journal*. 1952. Vol. 50. № 3. P. 298-303. doi: 10.1042/bj0500298
- 26 Ferreira J.C., Neves M.J., Destruhaut A. et al. Comparison of three different methods for trehalose determination in yeast extracts // *Food Chemistry*. 1997. Vol. 60. № 2. P. 251-254. doi: 10.1016/S0308-8146(96)00337-5
- 27 Меледина Т.В., Иванова В.А., Федоров А.В. Аппаратурно-методическая база экспериментов в области пищевой биотехнологии продуктов из растительного сырья. М.: Издательство ВГУИТ, 2022. 156 с.
- 28 Пат. 2528872 Российская Федерация, МПК C12N 1/18, C12N 1/16. Способ культивирования хлебопекарных дрожжей / Чечина О.Н., Мартынов К.А., Сокол О.В. и др.; заявитель ФГБОУ ВО «ВГУИТ». № 2012138881; заявл. 10.09.2012; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12.

References

- 1 U.S. Food and Drug Administration: official website. URL: <https://www.fda.gov> (in Russian)
- 2 Ranjha M.M.A.N., Shafique B., Batool M. et al. Nutritional and health potential of probiotics: a review. *Applied Sciences*. 2021. vol. 11. no. 23. p. 11204. doi:10.3390/app112311204
- 3 McFarland L.V., Li T. Efficacy and safety of *Saccharomyces boulardii* CNCM I-745 for the treatment of pediatric acute diarrhea in China: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2025. vol. 15. p. 1587792. doi:10.3389/fcimb.2025.1587792
- 4 Liao W., Chen C., Wen T. et al. Probiotics for the prevention of antibiotic-associated diarrhea in adults: a meta-analysis of randomized placebo-controlled trials. *Journal of Clinical Gastroenterology*. 2021. vol. 55. no. 6. pp. 469-480. doi:10.1097/MCG.0000000000001464
- 5 Mourey F., Sureja V., Kheni D. et al. A multicenter, randomized, double-blind, placebo-controlled trial of *Saccharomyces boulardii* in infants and children with acute diarrhea. *The Pediatric Infectious Disease Journal*. 2020. vol. 39. no. 11. pp. e347-e351. doi:10.1097/INF.0000000000002849
- 6 Bader M.S., Hawboldt J., Main C. et al. Review of high dose vancomycin in the treatment of *Clostridioides difficile* infection. *Infectious Diseases*. 2020. vol. 52. no. 12. pp. 847-857. doi:10.1080/23744235.2020.1800080
- 7 Tariq R., Tahir M.W., Hayat M. et al. Systematic review and meta-analysis: safety and efficacy of *Saccharomyces boulardii* for prevention of *Clostridioides difficile* infection. *Journal of Gastrointestinal Infections*. 2022. vol. 12. no. 2. pp. 94-100. doi:10.1055/s-0043-1760738
- 8 Sirsat G.M., Saraf R. Beneficial Effect of Probiotic *Saccharomyces Boulardii* in Management of Acute Diarrhoea of Children-A Randomized Controlled Trial. *Research Journal of Medical Sciences*. 2024. vol. 18. pp. 500-504. doi:10.36478/makrjms.2024.11.500.504
- 9 Ting T.Y., Lee W.J., Goh H.H. Molecular Genetics and Probiotic Mechanisms of *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii*. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2025. pp. 1-15. doi:10.1007/s12602-025-10634-y
- 10 Duffey H.E., Watson A.K., McCann S.M. et al. Genomic and phenotypic comparison of *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces boulardii*. *bioRxiv*. 2025. p. 2025.09.08.674931. doi:10.1101/2025.09.08.674931
- 11 Samakkarn W., Vandecruys P., Moreno M.R.F. et al. New biomarkers underlying acetic acid tolerance in the probiotic yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2024. vol. 108. no. 1. p. 153. doi:10.1007/s00253-023-12946-x
- 12 Gopalan S., Al-Sinawi B., Al-Moqbali Z. et al. Unique properties of yeast probiotic *Saccharomyces boulardii* CNCM I-745: A narrative review. *Cureus*. 2023. vol. 15. no. 10. p. e46314. doi:10.7759/cureus.46314
- 13 Hudson L.E., McDermott C.D., Stewart T.P. et al. Characterization of the probiotic yeast *Saccharomyces boulardii* in the healthy mucosal immune system. *PLoS One*. 2016. vol. 11. no. 4. p. e0153351. doi:10.1371/journal.pone.0153351
- 14 Rajkowska K., Kunicka-Styczynska A. Probiotic activity of *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* against human pathogens. *Food Technology and Biotechnology*. 2012. vol. 50. no. 2. pp. 230-236. doi:10.17113/ftb.50.02.12.2693
- 15 Rajkowska K., Kunicka-Styczynska A. Probiotic properties of yeasts isolated from chicken feces and kefir. *Polish Journal of Microbiology*. 2010. vol. 59. no. 4. pp. 257-263. doi:10.33073/pjm-2010-039
- 16 Suvama S., Dsouza J., Ragavan M.L. et al. Potential probiotic characterization and effect of encapsulation of probiotic yeast strains on survival in simulated gastrointestinal tract condition. *Food Science and Biotechnology*. 2018. vol. 27. no. 3. pp. 745-753. doi:10.1007/s10068-018-0310-8
- 17 Gut A.M., Vasiljevic T., Yeager T. et al. *Salmonella* infection-prevention and treatment by antibiotics and probiotic yeasts: a review. *Microbiology*. 2018. vol. 164. no. 11. pp. 1327-1344. doi:10.1099/mic.0.000709
- 18 Fakrudin M., Hossain M.N., Ahmed M.M. Antimicrobial and antioxidant activities of *Saccharomyces cerevisiae* IFST062013, a potential probiotic. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. 2017. vol. 17. p. 64. doi:10.1186/s12906-017-1591-9
- 19 Banik A., Mondal J., Rakshit S. et al. Amelioration of cold-induced gastric injury by a yeast probiotic isolated from traditional fermented foods. *Journal of Functional Foods*. 2019. vol. 59. pp. 164-173. doi:10.1016/j.jff.2019.05.039
- 20 Hsu S.A., Chou J.Y. Yeasts in fermented food and kefir: in vitro characterization of probiotic traits. *Journal of Animal & Plant Sciences*. 2021. vol. 31. no. 2. pp. 461-470. doi:10.36899/JAPS.2021.2.0245
- 21 Sanders M.E., Merenstein D., Merrifield C.A. et al. Probiotics for human use. *Nutrition Bulletin*. 2018. vol. 43. no. 3. pp. 212-225. doi:10.1111/nbu.12334
- 22 World Health Organization. Evaluation of certain contaminants in food: ninety-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. WHO, 2023. 125 p.
- 23 Aghamohammad S., Hafezi A., Rohani M. Probiotics as functional foods: How probiotics can alleviate the symptoms of neurological disabilities. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2023. vol. 163. p. 114816. doi:10.1016/j.biopha.2023.114816
- 24 Martín R., Olivares M., Marín M.L. et al. Probiotic potential of 3 lactobacilli strains isolated from breast milk. *Journal of Human Lactation*. 2005. vol. 21. no. 1. pp. 8-17. doi:10.1177/0890334404272393
- 25 Trevelyan W.E., Harrison J.S. Studies on yeast metabolism. I. Fractionation and microdetermination of cell carbohydrates. *Biochemical Journal*. 1952. vol. 50. no. 3. pp. 298-303. doi:10.1042/bj0500298
- 26 Ferreira J.C., Neves M.J., Destruhaut A. et al. Comparison of three different methods for trehalose determination in yeast extracts. *Food Chemistry*. 1997. vol. 60. no. 2. pp. 251-254. doi:10.1016/S0308-8146(96)00337-5
- 27 Meledina T.V., Ivanova V.A., Fedorov A.V. Apparatus and methodological base of experiments in the field of food biotechnology of products from plant raw materials. Moscow: Publishing House VGUIT, 2022. 156 p. (in Russian)
- 28 Chechina O.N., Martynov K.A., Sokol O.V. et al. Patent RU 2528872. Method for cultivating baker's yeast. 2014. (in Russian)

Сведения об авторах

Анастасия С. Андреева доцент, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, aandreeva@itmo.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6179-2265>

Татьяна В. Меледина д.т.н., профессор, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, meledinata@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7485-2802>

Инна В. Новикова д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии бродильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, noviv@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2360-5892>

Алексей А. Федоров к.т.н., заведующий лабораторией, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, aafedorov@itmo.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3860-7708>

Олеся С. Веселова бакалавр, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, ole-saveselova3308@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-6397-8339>

Виктор О. Фаустов аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, faustoff94@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0009-5998-5565>

Вклад авторов

Анастасия С. Андреева обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты
Татьяна В. Меледина предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

Инна В. Новикова консультация в ходе исследования

Алексей А. Федоров написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Олеся С. Веселова обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Виктор О. Фаустов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Anastasia S. Andreeva associate professor, biotechnology faculty, ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia, aandreeva@itmo.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6179-2265>

Tatiana V. Meledina Dr. Sci. (Engin.), professor, biotechnology faculty, ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia, meledinata@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7485-2802>

Inna V. Novikova Dr. Sci. (Engin.), professor, head of department, technologies for fermentation and sugar production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, noviv@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2360-5892>

Alexey A. Fedorov Cand. Sci. (Engin.), head of the laboratory, biotechnology faculty, ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia, aafedorov@itmo.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3860-7708>

Olesya S. Veselova bachelor, biotechnology faculty, ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia, ole-saveselova3308@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-6397-8339>

Victor O. Faustof graduate student, biotechnology faculty, ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia, faustoff94@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0009-5998-5565>

Contribution

Anastasia S. Andreeva review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Tatiana V. Meledina proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Inna V. Novikova consultation during the study

Alexey A. Fedorov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Olesya S. Veselova review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Victor O. Faustof 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 12/05/2025	После редакции 26/05/2025	Принята в печать 02/06/2025
Received 12/05/2025	Accepted in revised 26/05/2025	Accepted 02/06/2025

Применение дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* и WildBrew Philly Sour™ рода *Lachancea* spp. в технологии ферментированного напитка из овса (*Avena sativa* L)

Владимир А. Иванов	¹	ivanov_vlaa@baltika.com	 0009-0001-3328-0550
Анастасия А. Иванова	¹	skorpyon96@mail.ru	 0000-0002-0214-6308
Анастасия С. Андреева	¹	aandreeva@itmo.ru	 0000-0001-6179-2265
Инна В. Новикова	²	noviv@list.ru	 0000-0002-2360-5892

¹ Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия

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

Аннотация. Настоящее исследование посвящено масштабированию технологии производства функционального ферментированного напитка из овса, обогащенного β-глюканами. Работа была мотивирована растущим потребительским спросом на безалкогольные напитки на растительной основе и необходимостью преодоления технологических сложностей, связанных с высокой вязкостью и низким выходом экстракта при использовании овсяного сырья. Целью являлась адаптация лабораторной методики к производственным условиям с применением новых микробных продуцентов — пробиотических дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* и кислотообразующих дрожжей *Lachancea* spp. штамма WildBrew Philly Sour™. В процессе работы использовалось сусло, полученное из зерносмеси, содержащей 70% несоложеного овса и 30% ячменного солода, с применением комплекса отечественных ферментных препаратов для обеспечения высокой экстрактивности и удовлетворительной фильтруемости. Выход экстрактивных веществ составил 80,9%, что подтвердило эффективность выбранного режима затирания и ферментативной обработки. Контроль процесса фильтрации показал стабильность со средней скоростью 3,5 л/мин и мутностью, не превышающей 100 ед. ЕВС. Ферментация изучаемыми дрожжевыми культурами позволила получить два типа безалкогольных напитков. Напиток на основе *Lachancea* spp. характеризовался объемной долей спирта 0,49%, кислотностью 2,1 к. ед. и степенью сбраживания 6,41%. Напиток, ферментированный *S. cerevisiae* var. *boulardii*, показал более высокую степень сбраживания (12,2%) и объемную долю спирта 0,94%. Оба продукта сохранили высокое содержание β-глюканов (около 600 мг/л) и обладали сбалансированными органолептическими профилями. Таким образом, исследование демонстрирует успешную апробацию технологии и перспективность использования данных дрожжевых культур для создания новых функциональных напитков, отвечающих современным рыночным трендам.

Ключевые слова: масштабирование, овёс, ячменный солод, бета-глюканы, сусло, ферменты, экстрактивность, режим затирания, сухие вещества, фильтруемость, мутность, продуценты, ферментация, физико-химические свойства.

Application of yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* and WildBrew Philly Sour of the genus *Lachancea* spp. in the technology of fermented oat drink (*Avena sativa* L)

Vladimidr A. Ivanov	¹	ivanov_vlaa@baltika.com	 0009-0001-3328-0550
Anastasia A. Ivanova	¹	skorpyon96@mail.ru	 0000-0002-0214-6308
Anastasia S. Andreeva	¹	aandreeva@itmo.ru	 0000-0001-6179-2265
Inna V. Novikova	²	noviv@list.ru	 0000-0002-2360-5892

¹ ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia

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

Abstract. This study focuses on scaling up the technology for producing a functional fermented oat-based beverage enriched with β-glucans. The work was motivated by growing consumer demand for non-alcoholic, plant-based drinks and the need to overcome technological challenges associated with the high viscosity and low extract yield of oat raw materials. The objective was to adapt a laboratory method to industrial conditions using novel microbial starters—the probiotic yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* and the acid-forming yeast *Lachancea* spp. strain WildBrew Philly Sour™. The work utilized a wort obtained from a grain bill containing 70% unmalted oats and 30% barley malt, with the application of a complex of domestic enzyme preparations to ensure high extractability and satisfactory filterability. The yield of extractive substances reached 80.9%, confirming the efficiency of the chosen mashing regime and enzymatic treatment. Monitoring of the filtration process demonstrated its stability, with an average speed of 3.5 l/min and turbidity not exceeding 100 EBC units. Fermentation with the studied yeast cultures yielded two types of non-alcoholic beverages. The beverage based on *Lachancea* spp. was characterized by an alcohol by volume of 0.49%, an acidity of 2.1 c.u., and a real degree of fermentation of 6.41%. The beverage fermented with *S. cerevisiae* var. *boulardii* showed a higher degree of fermentation (12.2%) and an alcohol by volume of 0.94%. Both products retained a high content of β-glucans (approximately 600 mg/l) and possessed balanced organoleptic profiles. Thus, the research demonstrates the successful pilot testing of the technology and the promise of using these yeast cultures to create new functional beverages that meet current market trends.

Keywords: scaling, oats, barley malt, beta-glucans, wort, enzymes, extractivity, mashing mode, dry substances, filterability, turbidity, producers, fermentation, physicochemical properties.

Для цитирования

Иванов В.А., Иванова А.А., Андреева А.С., Новикова И.В. Применение дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* и WildBrew Philly Sour™ рода *Lachancea* spp. в технологии ферментированного напитка из овса (*Avena sativa* L) // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 116–125. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-116-125

For citation

Ivanov V.A., Ivanova A.A., Andreeva A.S., Novikova I.V. Application of yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* and WildBrew Philly Sour of the genus *Lachancea* spp. in the technology of fermented oat drink (*Avena sativa* L). Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 116–125. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-116-125

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

Введение

Согласно оценкам компании BusinesStat [3,4] в период с 2019 по 2023 годы объем продаж прохладительных напитков (таблица 1) в России, включая квас, сладкие безалкогольные напитки, чайные и энергетические напитки, увеличился на 34,2%, что соответствует росту с 7 до 9,4 млрд л. В частности, производство кваса (таблица 2) за тот же период возросло на 28,3%, увеличившись с 610,4 до 783,2 млн л.

Таблица 1.
Продажи прохладительных напитков в России
в 2019–2023 млн/л

Table 1.
Sales of soft drinks in Russia in 2019–2023 mln/l

Параметр Index	2019	2020	2021	2022	2023
Объем продаж, млн л Sales volume, million liters	7 011,17	7 220,08	8 411,39	9 042,19	9 408,4
Динамика (% к предыдущему году) Dynamics (% of previous year)	-	3,0	16,5	7,5	4,1

Анализ данных, представленных в таблице 2, показывает динамику производства кваса в России в период с 2019 по 2023 годы. Следует отметить, что в 2022 и 2023 годах фиксируется снижение объемов производства, составившее -1,8% и -0,2% соответственно (таблица 2). Эти данные могут отражать различные факторы, оказывающие влияние на спрос и предложение кваса, включая изменения в потребительских предпочтениях, конкуренцию с другими безалкогольными напитками и экономические условия.

Таблица 2.
Производство кваса в России в 2019–2023 млн/л

Table 2.
Kvass production in Russia in 2019–2023 mln/l

Параметр Index	2019	2020	2021	2022	2023
Объем производства, млн л Production volume, million l	610,4	638,1	799,6	784,9	783,2
Динамика (% к предыдущему году) Dynamics (% of previous year)	-	4,5	25,3	-1,8	-0,2

В последние годы все более популярными становятся ферментированные безалкогольные напитки на растительной основе, в частности из овса, которые соответствуют ГОСТ Р 70650–2023, ГОСТ 28188–2014, ГОСТ 31494–2012 и ГОСТ 34792–2021. Данные документы определяют требования к производству напитков из растительного сырья, в том числе из зерновых культур, что позволяет обеспечить высокое качество и безопасность конечной продукции. ГОСТ 34792–2021 устанавливает максимальную объемную долю этилового спирта в безалкогольных напитках.

Важно отметить, что напитки, произведенные из овса, содержат значительно более высокие уровни растворимых пищевых волокон (β -глюканов, арабиноксиланов, камедей и пектинов) по сравнению с напитками, полученными из других зерновых культур. В связи с этим напитки из овса имеют целый ряд положительных свойств [5, 6]: замедляют усвоение углеводов (снижает гликемический индекс) и жиров, снижают количество в крови общего холестерина и липопротеинов низкой плотности (ЛПНП), положительно влияют на микрофлору кишечника; обладают противовоспалительными и иммуностимулирующими свойствами и целый ряд других свойств.

Перечисленное выше свидетельствует о перспективности использования овса в производстве безалкогольных напитков на растительной основе. Однако, применение овса в производстве безалкогольных напитков осложняется рядом технологических трудностей [7, 8], наиболее существенными из которых являются высокие показатели вязкости и низкий выход экстракта. Эти показатели снижают эффективность процесса фильтрации затора, увеличивая потери в варочном цехе. В связи с этим возникает необходимость применения экзогенных ферментных препаратов. Так же для улучшения фильтруемости затора необходимо соблюдать баланс в купаже овса и ячменного солода, чтобы минимизировать негативные эффекты на процесс фильтрации затора. Особенно это сложно осуществлять в промышленных масштабах. Ранее в лабораторных условиях были разработаны режимы затирания, содержащие до 70% овса [1,2].

Интерес представляет также использование новых культур дрожжей для увеличения функциональных свойств напитков, в частности, использование пробиотических дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae* var. *bouardii* и кислотообразующих дрожжей рода *Lachancea* spp. штамма WildBrew Philly Sour™.

Цель исследования – получение ферментированного напитка из овса с пробиотическими и кислотообразующими дрожжами, а также с высоким содержанием β -глюканов на предприятии малой мощности. В соответствии с поставленной целью решали следующие задачи:

Масштабировать процесс получения овсяного суслу из 70% несоложенного овса и 30% ячменного солода с использованием экзогенных ферментных препаратов отечественного производства (Глюколюкс МАКС, Амилолюкс АТС Комплекс, и Агроксил Плюс);

Исследовать физико-химические показатели суслу (экстрактивность, фильтруемость, мутность);

Изучить физико-химические и органолептические свойства напитков, ферментированных дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* и дрожжи рода *Lachancea* spp.

Материалы и методы

Материалами исследования являлись: ячменный солод (солод пивоваренный светлый ячменный 1 класса высшего сорта 2022 год выпуска), который соответствует требованиям по качеству и пищевой безопасности ГОСТ 29294–2021. Несоложённый материал – овёс

плёчатый *Avena sativa* L. (2023 год урожая) – соответствует требованиям по качеству и пищевой безопасности ТР ТС 015/2011, ТР ТС 022/2011, ГОСТ 28673–2019.

Для получения овсяно-ячменного суслу использовали экзогенные ферментные препараты (ФП) российских биоконпаний. Характеристика ферментных препаратов, физико-химические условия проявления оптимальной активности и рекомендуемые дозировки для получения овсяно-ячменного суслу приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Характеристика ферментных препаратов

Table 3.

Characteristics of enzyme preparations

Ферментный препарат Enzyme preparation	Активность Activity	Активность основного фермента Activity of the main enzyme	Оптимальные условия для проявления 80–100% активности Optimum conditions for 80–100% activity		Рекомендуемая дозировка, г ФП/кг запыли Recommended dosage, g EP/kg of feed
			t, °C	pH	
Глюколюкс МАКС	Глюкоамилазная Glucosylase	13 000 ед./мл	50–60	3,5–6,5	0,23–0,35
	Альфа-амилазная Alpha-amylase	1 500 ед./мл			
Амилонлюкс АТС Комплекс	Альфа-амилазная, термостабильная Alpha-amylase, heat-stable	27 600 ед./мл	80–90	4,7–6,5	1–1,3
Агроксил Плюс	ксилазная xylanase	4 000 ед./г	45–55	4,0–4,5	Нет данных n.d.
	целлюлолитическая cellulolytic	500 ед./г			
	β-глюканазная β-glucanase	500 ед./г			

Стартовыми культурами являлись пробиотические дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* Y-3925 (БРЦ ВКПМ, Россия). Данный штамм предназначен для создания функциональных напитков [9]. Оптимальная температура для ферментации составляет 25–30 °C. Также использовали дрожжи штамма WildBrew Philly Sour™ (Lallemand, Канада) рода *Lachancea* spp., продуцирующие умеренное количество молочной кислоты в интервале температур 15–25 °C.

Влажность овса и солода определяли автоматическим анализатором влажности Halogen Moisture Analyzer HR73 (Mettler Toledo). Измерения проводились при температуре 105 °C методом высушивания до достижения постоянной массы (Analytica-EBC. Method 4.2).

Оценка качества ячменного солода осуществлялась по методу Analytica-EBC. Method 4.5.1. Массовую долю сухих веществ в конгрессном сусле (Analytica-EBC. Method 4.5.1; ГОСТ 29294–2021) измеряли автоматическим анализатором суслу и пива (Alcolyzer, Anton Paar DMA 4500). Диастатическую силу определяли по методу Виндиша–Кольбаха (ВК; Analytica-EBC. Method 4.12.1).

Проведение оценки экстрактивности несоложённного овса осуществляли методом растворения экстрактивных веществ овса под действием ферментов ячменного солода (Analytica-EBC. Method 6.3).

Количественное содержание β-глюкана определяли спектрофотометрически (Analytica-EBC. Method 4.16.3) с использованием тест-системы Enzytec™ Color GlucaTest® на спектрофотометре UV-2501 PC (Shimadzu), с длиной волны 550 нм.

Мутность суслу определяли нефелометрическим методом на мутномере LabScat 2 (Sigrist-Photometer AG). Измерение мутности производили при угле преломления 90° и 25°.

Определение массовой доли этилового спирта, действительного экстракта, действительной степени сбраживания (RDF) и массовой доли сухих веществ в начальном сусле (Analytica-EBC. Method 8.3; ГОСТ 12787–2021) измеряли автоматическим анализатором суслу и пива (Alcolyzer, Anton Paar DMA 4500). Образцы продуктов ферментации дополнительно дегазировали в течение 20 минут (универсальный перемешиватель, 150 об/мин), затем все образцы фильтровали через бумажный фильтр (ФС-3 средней фильтрации), чтобы получить примерно 50 мл фильтрата и приводили к температуре 20 °C.

Кислотность определяли путем титрования титрованием пробы с фенолфталеином (ГОСТ 12788–87).

Определение концентрации дрожжевых клеток в посевном материале и бродящем пиве проводили с помощью камеры Горяева [10].

Промышленный эксперимент проводили на мини-пивзаводе. Вместимость суслотарочного котла составляла 530 л. Процесс затирания соответствовал ранее установленным в лабораторных условиях параметрам (рис. 1).

Получение сусла. 70 кг пленчатого несоложенного овса и 30 кг ячменного солода тип А подвергали дроблению на четырёх вальцовый дробилке для солода. Далее в заторный чан добавляли воду, нагретую до 65 °С объемом 120 л и производили дробление. Дробленый солод поступал в заторный чан по автоматической линии подачи с постоянным увлажнением помола (140 литров воды, температурой 65 °С). Время дробления составляло 20 мин, а скорость мешалки заторного чана составляла 60%. По прошествии 10 мин дробления зернопродуктов добавлялись ферментные препараты. Норма задачи ферментных препаратов составила: Глюколюкс МАКС (Сиббиофарм) – 240 г/гЛ; Амилолюкс АТС Комплекс (Сиббиофарм) – 240 г/гЛ; Агроксил Плюс (Агрофермент) – 180г/гЛ.

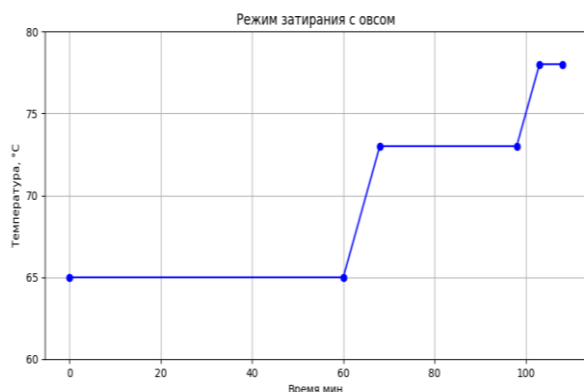


Рисунок 1. Режим затирания 70% несоложенного овса и 30% ячменного солода [1, 2]

Figure 1. Mashing mode of 70% unmalted oats and 30% barley malt [1, 2]

По окончании дробления линия промывалась 40 литрами воды (температура воды 65 °С) и приводилась первая пауза при 65 °С в течение 30 минут. Далее производили нагрев затора до 73 °С со скоростью 1 °С /мин. По достижении 73 °С проводили паузу в течение 30 минут. Далее затор нагревали до 78 °С со скоростью 1 °С /мин. По достижении заданной температуры проводили паузу в течение 5 минут. Затем затор перекачивали в фильтр чан и фильтровали, после чего отфильтрованное сусло поступало суслотарочный котёл.

По завершении фильтрации сусло подвергали кипячению в течение 60 минут, разделив процесс на три стадии:

1) Атмосферное кипячение (5 мин при 100 °С). Цель – удаление растворённого кислорода из системы.

2) Кипячение под избыточным давлением (30 мин при 0,15–0,25 бар, 101–103 °С). В начале этапа за 3 мин создают давление 0,20–0,25 бар, затем сбрасывают его до 0,10 бар. При понижении давления температура кипения падает, и в сусле образуются пузырьки пара (вторичный выпар), увеличивающие контактную площадь между газом и жидкостью. Это эффективно удаляет летучие ароматические соединения, оказывающие негативное влияние на ароматику (включая свободный ДМС), снижает термическую нагрузку на сусло и улучшает стабильность вкуса и аромата.

3) Атмосферное кипячение (25 мин при 100 °С). Цель – обеспечение достижения требуемого процента испарения сусла.

После окончания кипячения сусло перекачивали в вирпул и выдерживали его там в течение 20 мин, затем сусло охлаждали до 13 °С перекачивали в два танка. В момент перекачки в поток добавляли дрожжи. Основное брожение проводили при температуре 15 °С.

Фильтрация напитка. После окончания брожения напиток охлаждали до температуры 0 °С, перекачивали в буферный танк и фильтровали. Процесс фильтрации происходил в три этапа:

На первом этапе: в фильтр устанавливали 4 листа фильтровального картона PERMAdur S 400x400 ME UF/K для намывки кизельгурового слоя и для ультрафильтрации 9 листов фильтровального картона Nobra ST 7 № 400 x 400 с диаметром пор 0,4 мкм. Фильтр обрабатывали горячей водой 40 минут при температуре 75 °С и после охлаждали.

На втором этапе для намывки кизельгурового слоя использовали сначала грубую фракцию, а затем среднюю фракцию кизельгура. Намывка проводилась при давлении 3–4 бар и скоростью потока 20 л/мин.

На третьем этапе производилась фильтрация при давлении 2 бара, со скоростью потока 4 л/мин и подачей в поток средней фракции кизельгура. После прохождения ультрафильтрации напиток в потоке карбонизировался и собирался в ЦКТ.

Результаты представлены как среднее значение из трех или более независимых экспериментов. Данные были проанализированы с помощью однофакторного анализа дисперсии (ANOVA) [11]. Расчеты проводились на уровне значимости $p = 0.05$.

Результаты и их обсуждение

До начала затирания был проведен анализ основных физико-химических характеристик ячменного солода, включая содержание влаги, экстрактивность в пересчете на абсолютно сухое вещество (АСВ), вязкость, содержание β -глюканов и диастатическую силу. Полученные данные о физико-химических параметрах солода представлены в таблице 4.

Таблица 4.
Физико-химические характеристики
ячменного солода

Table 4.
Physical and chemical characteristics of barley malt

Показатель Index	Результаты испытаний Value	
	Ячменный солод Malt	Требования Norm
Массовая доля влаги, % Moisture content, %	4,1±0,2	<5,5
Экстрактивность (АСВ), % Extractivity (ASV), %	81,9±0,3	>81
Содержание β-глюкана, мг/л β-glucan content, mg/L	148±7,7	0–150
Диастатическая сила, ед./г Diastatic power, U/g	282±1,2	>250

На основании данных, представленных в таблице 4, можно сделать выводы относительно физико-химических характеристик ячменного солода: уровень влаги в образце ячменного солода в пределах допустимого значения, что свидетельствует о высоком качестве солода и его готовности к дальнейшей переработке, что является критически важным для обеспечения стабильности технологического процесса. Экстрактивность солода, содержание в конгрессном заторе β-глюкана, значение диастатической силы соответствуют необходимым требованиям. Таким образом, ячменный солод соответствуют допустимым показателям физико-химических характеристик, что подтверждает его целесообразность для использования в производстве безалкогольного напитка с высоким содержанием бета-глюканов.

В таблице 5 даны основные характеристики несоложѐнного овса, такие как уровень влаги в образце несоложѐнного овса, экстрактивность и содержание β-глюканав лабораторном сусле. Несоложѐнный овѣс демонстрирует оптимальные физико-химические характеристики, что подтверждает его целесообразность для использования в производстве напитков как источника питательных веществ и функциональных ингредиентов.

Таблица 5.
Физико-химическая характеристика
несоложѐнного овса

Table 5.
Physical and chemical characteristics of unmalted oats

Показатель Index	Результаты испытаний Value
Массовая доля влаги, % Moisture content, %	8,9±0,1
Экстрактивность на АСВ, % Extractivity on ASV, %	49,0±0,3
Содержание β-глюкана, мг/л β-glucan content, mg/L	810±6,5

Оптимальный процесс фильтрации затора.

На основании рисунка 2, можно сделать следующие заключения: процесс фильтрации начнется эффективно, о чем свидетельствует быстрое снижение мутности в начале фильтрации. Сусло фильтруется стабильно, без значительных скачков давления и повышения мутности с постепенным возрастанием скорости фильтрации, средняя скорость фильтрации составила 3,5 литра в минуту. Наблюдается высокое начальное значение мутности, которое быстро снижается. Фильтрация останавливается при значении мутности около 100 ед. ЕВС. Первое сусло фильтруется без резких скачков скорости потока и мутности (экстрактивность первого сусла составила 11,5%). После того как 220 л первого сусла было отфильтровано, в фильр-чан добавляется промывная вода в объеме 120 л. Мутность отфильтрованного сусла постепенно возрастает с течением фильтрации (до 145 ед. ЕВС), повышение разности давления подситового и надситового пространства составляет до 250 мм рт. ст. Такой характер изменений параметров указывает на типичный процесс фильтрации затора, где начальная фаза характеризуется формированием стабильного фильтрационного слоя и низкой мутностью отфильтрованного сусла, а последующее добавление промывной воды приводит к постепенному разрушению фильтрационного слоя, увеличению скорости фильтрации за счет снижения вязкости жидкости, но с сопутствующим увеличением мутности сусла. Это показывает, что оптимальный режим фильтрации был достигнут в середине процесса, когда скорость фильтрации была достаточно высокой, а мутность оставалась низкой. Последующая промывка, хотя и позволила извлечь больше экстракта, но привела к снижению качества фильтрации.

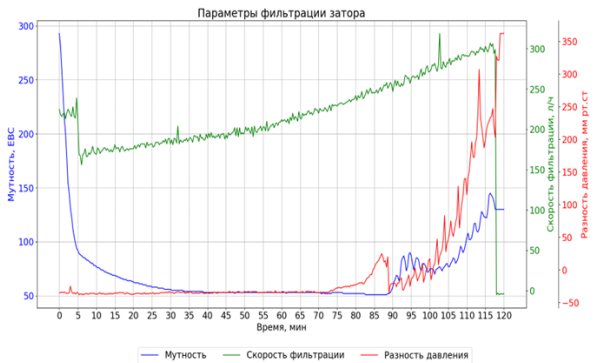


Рисунок 2. График фильтрации
Figure 2. Filtering graph

Фильтрация заканчивается, когда объем фильтрата составляет 420 л (экстрактивность 11%), экстрактивность промывной воды составляет 7%. Время фильтрации соответствует 117–120 мин.

Выход экстрактивных веществ от общего содержания экстрактивных веществ в смеси 70% несоложенного овса и 30% ячменного солода составляет 80,9%, что говорит о достаточно высокой эффективности процесса затирания и фильтрации.

Завершив фильтрацию сусло кипятили 60 минут и по окончании кипячения объем сусла составил 380 л, а массовая доля сухих веществ – 12,1%. Затем горячее сусло перекачали в вирпул и осветляли в течение 20 мин.

Ферментация овсяно-солодового сусла.

После осветления в вирпуле сусло охлаждали до 13 °С и инокулировали дрожжами *Lachancea spp.* (ЦКТ № 1) и дрожжей *Saccharomyces cerevisiae var. boulardii* (ЦКТ № 2) из расчета 3 млн клеток/мл. Основное брожение проводили при температуре 15 °С. Изменения физико-химических показателей ферментации показаны в таблице 6 и 7.

Таблица 6.

Физико-химические и микробиологические показатели при ферментации овсяно-ячменного сусла дрожжами рода *Lachancea spp.*

Table 6.

Physicochemical and microbiological parameters during fermentation of oat-barley wort by yeast of the genus *Lachancea spp.*

Параметры	Продолжительность ферментации (ЦКТ № 1) Brew duration					
	0	18	42	45	48	65
Объемная доля спирта, % Alcohol by volume, %	0	0,02	0,2	0,26	0,40	0,57
Экстрактивность начального сусла, % Original wort extract, %	12,15	12,13	12,12	12,09	12,10	12,04
Действительная степень сбраживания, % Actual fermentation rate, %	0,02	0,24	2,60	3,36	5,11	7,31
pH	5,70	5,75	5,44	5,17	5,10	5,05
Кислотность, к.ед. Acidity, kJ	1,1	1,1	1,5	2,0	2,1	2,2
Концентрация дрожжей, млн клеток / мл Yeast concentration, million cells/ml	3,0	3,0	11,4	13,5	12,2	5,1
Нежизнеспособных клеток, % Non-viable cells, %	7,0	8,0	2,8	2,6	2,7	2,1
Температура в ЦКТ, °С Temperature in the fermenter, °C	13	15	15	15	7	1
Давление, бар Pressure, bar	0	0	0	0,7	0,7	0,7

Таблица 7.

Физико-химические и микробиологические показатели при ферментации овсяно-ячменного сусла дрожжами *Saccharomyces cerevisiae var. boulardii*

Table 7.

Physicochemical and microbiological parameters during fermentation of oat-barley wort by *Saccharomyces cerevisiae var. boulardii*

Показатели	Продолжительность ферментации (ЦКТ № 2) Brew duration					
	0	18	42	45	48	65
Объемная доля спирта, % Alcohol by volume, %	0,01	0,05	0,31	0,51	0,71	0,95
Экстрактивность начального сусла, % Original wort extract, %	12,18	12,17	12,12	12,06	12,02	12,02
Действительная степень сбраживания, % Actual fermentation rate, %	0,03	0,68	4,02	6,65	9,12	12,2
pH	5,61	5,65	5,28	5,12	4,94	4,87
Кислотность, к.ед. Acidity, kJ	1,1	1,1	1,7	1,9	2,2	2,3
Концентрация дрожжей, млн клеток / мл Yeast concentration, million cells/ml	3,0	3,5	28,2	31,1	29,9	20,1
Нежизнеспособных клеток, % Non-viable cells, %	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2
Температура в ЦКТ, °С Temperature in the fermenter, °C	13	15	15	11	9	1
Давление, бар Pressure, bar	0,0	0,0	0,7	0,7	0,7	0,7

По прошествии 45 часов брожения в ЦКТ № 1 содержание объемной доли спирта составило 0,26% при этом концентрация дрожжевых клеток составляла 13,5 млн/мл. Основываясь на этих данных ЦКТ № 1, был поставлен на охлаждение до 0 °С. По прошествии 65 часов от начала брожения температура танка опустилась до 1 °С, объемная доля спирта достигла 0,57%, а концентрация дрожжевых клеток упала до 5,1 млн/мл. На основании данных, представленных в таблице 6, можно сделать выводы о том, что при использовании дрожжей рода *Lachancea spp.*: объемная доля спирта

увеличивается с течением времени, начиная с 0% и достигая 0,57% к 65-му часу брожения, что свидетельствует о медленном процессе ферментации, в ходе которого дрожжи медленно превращают сахара в спирт. Действительная степень сбраживания увеличивается на 7,3% по мере продолжения брожения, таким образом, подтверждает активность дрожжей в преобразовании сахаров в спирт. Значения pH снижаются с 5,70 до 5,05, при этом кислотность возрастает с 1,1 до 2,2 к.ед., что связано с образованием органических кислот в ходе метаболизма дрожжей. Происходит значительное

увеличение концентрации дрожжевых клеток с начального показателя 3,0 млн/мл в 4,5 раза в течение первых 48 часов, после чего при охлаждении танка происходит резкое снижение в 2,6 раза к 65-му часу, это может свидетельствовать о завершении активной фазы брожения и осаждении дрожжей. Процент нежизнеспособных клеток остается относительно низким, колеблясь в пределах 2–8%. Таким образом, на основании данных заметно, что процесс брожения с использованием дрожжей рода *Lachancea spp.* проходит с определенными изменениями в характеристиках сусла и активности клеток, с низкой степенью сбраживания и с низкой объемной долей спирта позволяющая получить ферментированный безалкогольный напиток с содержанием спирта менее 0,5%

По прошествии 42 часов с начала брожения в ЦКТ № 2 содержание объемной доли спирта составило 0,31% при этом концентрация дрожжевых клеток составляла 28,2 млн/мл. Основываясь на этих данных ЦКТ № 2, был поставлен на охлаждение до 0 °С. По прошествии 65 часов от начала брожения температура танка опустилась до 1 °С, объемная доля спирта достигла 0,95%, а концентрация дрожжевых клеток упала до 20,1 млн/мл. На основании данных, представленных в таблице 7, с использованием дрожжей *S. cerevisiae var. boulardii*, можно сделать выводы: объемная доля спирта увеличивается с 0,01% до 0,95% к 65-му часу, что указывает на умеренный процесс ферментации; Действительная степень сбраживания возрастает с 0,03% до 12%. Уровень pH снижается с 5,6 до 4,9, в то время как кислотность повышается с 1,1 до 2,3 к. ед. Концентрация клеток увеличивается до 31 млн/мл к 48-му часу. Процент нежизнеспособных клеток остается очень низким (в пределах 0,5%), что свидетельствует о хорошей жизнеспособности дрожжей на протяжении всего процесса ферментации.

Процесс брожения с использованием *S. cerevisiae var. boulardii* демонстрирует более высокую активность по сравнению с *Lachancea spp.*, однако использование этих дрожжей также позволяет получить ферментированный безалкогольный напиток с содержанием спирта менее 1,2%.

Физико-химические показатели ферментированных напитков. По окончании фильтрации напиток проверялся на содержание кислорода (требуемое значение <100 ppm) и углекислоты (требуемое значение 4,8–5,3 г/л) и разливался на автоматической линии розлива. Готовая продукция пастеризовалась в погружном пастеризаторе с температурой пастеризации 61–64 °С в течение 40 мин (130 ед. пастеризации). Показатели готового напитка показаны в таблице 8.

Таблица 8.

Физико-химические показатели
ферментированных напитков

Table 8.

Physical and chemical parameters
of fermented beverages

Показатели Index	Стартовые культуры Yeasts	
	<i>Lachancea spp.</i>	<i>S. cerevisiae var. boulardii</i>
Объемная доля спирта, % Alcohol by volume, %	0,49	0,94
Экстрактивность начального сусла, % Original wort extract, %	11,90	12,06
Действительная степень сбраживания, % Actual fermentation rate, %	6,41	12,20
pH	5,02	4,89
Кислотность, к.ед. Acidity, c.u.	2,1	2,3
β-глюкан, мг/л β-glucan, mg/l	600	588
Цвет, ед. EBC Color, EBC units	9,0	9,6
Мутность 90°, ед. EBC Turbidity at 90°, EBC units	0,21	0,22

На основании данных, представленных в таблице 8, можно отметить, что объемная доля спирта в готовом напитке, произведенном с использованием *S. cerevisiae var. boulardii*, составляет 0,94%, что почти в 2 раза выше, чем в напитке на основе *Lachancea spp.* 0,49%. Действительная степень сбраживания превышает почти в 2 раза данный показатель, в связи с более высокой активностью дрожжей *S. boulardii*. Содержание β-глюкана в напитках находятся примерно на одинаковом уровне. Цвет готового напитка в на основе *S. cerevisiae var. boulardii* (9,6 ед. EBC) немного выше, чем на основе *Lachancea spp.* (9,0 ед. EBC), мутность также незначительно отличается.

Каждый образец напитка дегустировали профессиональные дегустаторы, которые оценивали его вкусовые и ароматические показатели по пятибалльной шкале. Все образцы были одинаковой температуры – 10 градусов. Профили готовых напитков показаны на рисунках 3 и 4.

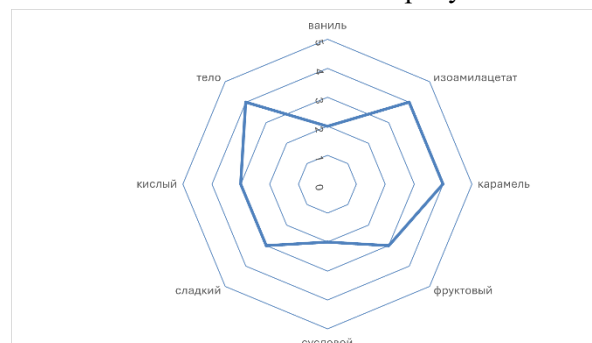


Рисунок 3. Профиль готового напитка со штаммом *Lachancea spp.*

Figure 3. Profile of the finished drink with the *Lachancea spp* strain.

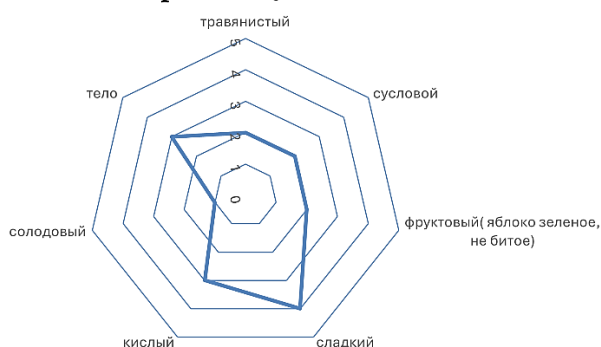


Рисунок 4. Профиль готового напитка со штаммом *S. cerevisiae var. bouldarii*

Figure 4. Profile of the finished drink with the *S. cerevisiae var. bouldarii* strain

Заключение

В производственных условиях с помощью ферментных препаратов Глюколюкс МАКС, Амилолюкс АТС Комплекс, Агроксил Плюс было получено сусло из 70% овса и 30% ячменного

солода с высоким выходом экстракта 80,90% с содержанием β -глюканов $810 \pm 6,5$ мг/л. Обычно этот показатель составляет 250–350 мг/л. Была достигнута стабильность фильтрации затора. Средняя скорость фильтрации составила 3,5 л/мин, мутность не превышала 100 ед. ЕВС.

Ферментированные с применением *Lachancea spp.* и *S. cerevisiae var. bouldarii* напитки содержали в среднем около 600 мг/л β -глюканов, что указывает на их функциональные свойства. Оба напитка относятся к безалкогольным продуктам, имеют разный уровень этанола, титруемых кислот и характеризуются оригинальными органолептическими свойствами.

Продемонстрировано, что применение пробиотических и кислотообразующих дрожжей открывает перспективы для создания новых продуктов с улучшенными функциональными свойствами, что особенно актуально в условиях роста спроса на безалкогольные напитки.

Литература

- 1 Ivanov V., Meledina T., Ivanova A. Development of technology for the oat wort's production using over 50% husked oat malt with the application of enzymatic preparations // BIO Web of Conferences. 2025. Vol. 172. 03002. doi: 10.1051/bioconf/202517203002
- 2 Меледина Т.В., Иванова В.А., Федоров А.В. и др. Исследование влияния ферментных препаратов на физико-химические свойства ферментализованного овса // Вестник международной академии холода. 2020. № 2. С. 45–51.
- 3 Анализ рынка прохладительных напитков в России в 2020–2024 гг., прогноз на 2025–2029 гг. // Businessstat. URL: <https://businessstat.ru> (дата обращения: 04.05.2025).
- 4 Анализ рынка кваса в России в 2020–2024 гг., прогноз на 2025–2029 гг. // Businessstat. URL: <https://businessstat.ru> (дата обращения: 04.05.2025).
- 5 Federal Register. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-1997-01-23/pdf/97-880.pdf> (дата обращения: 05.05.2025).
- 6 Bai J., Li Y., Zhang Y. et al. Physiological functionalities and mechanisms of β -glucans // Trends in Food Science & Technology. 2019. Vol. 88. P. 57–66. doi: 10.1016/j.tifs.2019.03.010
- 7 Zdaniewicz M., Pater A., Hrabia O. et al. The effect of different oat (*Avena sativa* L.) malt contents in a top-fermented beer recipe on the brewing process performance and product quality // Journal of Cereal Science. 2021. Vol. 101. 103301. doi: 10.1016/j.jcs.2021.103301
- 8 Ciocan M.E., Salamon R.V., Ambrus Á. et al. Use of unmalted and malted buckwheat in brewing // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 4. 2199. doi: 10.3390/app13042199
- 9 Manshin D., Meledina T.V., Britvina T. et al. Comparison of the yeast *Saccharomyces cerevisiae var. bouldarii* and top-fermenting brewing yeast strains during the fermentation of model nutrient media and beer wort // Agronomy Research. 2022. Vol. 20. № 3. P. 625–636. doi: 10.15159/AR.22.031
- 10 Захаров И.А., Инге-Вечтомов С.Г., Королев В.Г. Сборник методик по генетике дрожжей-сахаромицетов. Л.: Наука, 1984. 215 с.
- 11 Bertinetto C., Engel J., Jansen J. ANOVA simultaneous component analysis: A tutorial review // Analytica Chimica Acta: X. 2020. Vol. 6. 100061. doi: 10.1016/j.acax.2020.100061
- 12 Leo V.V., Viswanath V., Deka P. et al. *Saccharomyces* and Their Potential Applications in Food and Food Processing Industries // Industrially Important Fungi for Sustainable Development: Volume 1: Biodiversity and Ecological Perspectives. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 393–427. doi: 10.1007/978-3-030-67561-5_11
- 13 Schwab C., Bambace M.F. Traditional and Novel Applications of Sourdough Microbes in Northern Europe and the Baltic Countries // Sourdough Microbiota and Starter Cultures for Industry. Cham: Springer International Publishing, 2024. P. 93–129. doi: 10.1007/978-3-031-48604-3_5
- 14 Ansari F., Alian Samakkhah S., Bahadori A. et al. Health-promoting properties of *Saccharomyces cerevisiae var. bouldarii* as a probiotic; characteristics, isolation, and applications in dairy products // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. Vol. 63. № 4. P. 457–485. doi: 10.1080/10408398.2021.1951655
- 15 Попова Н.В., Потороко И.Ю., Калинина И.В. и др. Возможность использования ультразвукового воздействия для регулирования функциональных свойств пророщенного зерна *Avena sativa* L. // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 4. С. 196–201. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-196-201

- 16 Маслов А.В., Мингалева З.Ш., Старовойтова О.В. и др. Перспективы применения комплексной добавки для улучшения биотехнологических характеристик дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 96–101. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-96-101
- 17 Reid J.E.S.J., Yakubov G.E., Lawrence S.J. Non-starch polysaccharides in beer and brewing: A review of their occurrence and significance // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. Vol. 64. № 3. P. 837–851. doi: 10.1080/10408398.2022.2109585
- 18 Krstanović V., Habschied K., Mastanjević K. et al. The Influence of Milling Granulation on The Proportion of Fermentable and Non-Fermentable Ingredients in Mash Obtained from Mixed Endosperm Wheat // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. № 14. 5985. doi: 10.3390/app14145985
- 19 Степанова А.А., Асякина Л.К., Ларичев Т.А. и др. Ферментированные напитки: источники их получения и видовой состав микробных сообществ (обзор) // АПК России. 2023. Т. 30. № 5. С. 703–711. doi: 10.55934/2587-8824-2023-30-5-703-711
- 20 Yu Q., Qian J., Guo Y. et al. Applicable strains, processing techniques and health benefits of fermented oat beverages: A review // *Foods*. 2023. Vol. 12. № 8. 1708. doi: 10.3390/foods12081708
- 21 Díaz A.B., Durán-Guerrero E., Valiente S. et al. Development and characterization of probiotic beers with *Saccharomyces boulardii* as an alternative to conventional brewer's yeast // *Foods*. 2023. Vol. 12. № 15. 2912. doi: 10.3390/foods12152912

References

- 1 Ivanov V., Meledina T., Ivanova A. Development of technology for the oat wort's production using over 50% husked oat malt with the application of enzymatic preparations. *BIO Web of Conferences*. 2025. vol. 172. p. 03002. doi: 10.1051/bioconf/202517203002
- 2 Meledina T.V., Ivanova V.A., Fedorov A.V. et al. Investigation of the influence of enzyme preparations on the physicochemical properties of oat enzymolysates. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2020. no. 2. pp. 45–51. (in Russian)
- 3 Analysis of the soft drink market in Russia in 2020–2024, forecast for 2025–2029. *Businessstat*. URL: <https://businessstat.ru> (in Russian)
- 4 Analysis of the kvass market in Russia in 2020–2024, forecast for 2025–2029. *Businessstat*. URL: <https://businessstat.ru> (in Russian)
- 5 Federal Register. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-1997-01-23/pdf/97-880.pdf>
- 6 Bai J., Li Y., Zhang Y. et al. Physiological functionalities and mechanisms of β -glucans. *Trends in Food Science & Technology*. 2019. vol. 88. pp. 57–66. doi:10.1016/j.tifs.2019.03.010
- 7 Zdaniewicz M., Pater A., Hrabia O. et al. The effect of different oat (*Avena sativa* L) malt contents in a top-fermented beer recipe on the brewing process performance and product quality. *Journal of Cereal Science*. 2021. vol. 101. p. 103301. doi: 10.1016/j.jcs.2021.103301
- 8 Ciocan M.E., Salamon R.V., Ambrus Á. et al. Use of unmalted and malted buckwheat in brewing. *Applied Sciences*. 2023. vol. 13. no. 4. p. 2199. doi:10.3390/app13042199
- 9 Manshin D., Meledina T.V., Britvina T. et al. Comparison of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* and top-fermenting brewing yeast strains during the fermentation of model nutrient media and beer wort. *Agronomy Research*. 2022. vol. 20. no. 3. pp. 625–636. doi:10.1515/AR.22.031
- 10 Zakharov I.A., Inge-Vechtomov S.G., Korolev V.G. Collection of methods for the genetics of *Saccharomyces* yeasts. Leningrad: Nauka, 1984. 215 p. (in Russian)
- 11 Bertinetto C., Engel J., Jansen J. ANOVA simultaneous component analysis: A tutorial review. *Analytica Chimica Acta*. 2020. vol. 6. p. 100061. doi:10.1016/j.acax.2020.100061
- 12 Leo V.V., Viswanath V., Deka P. et al. *Saccharomyces* and Their Potential Applications in Food and Food Processing Industries. Industrially Important Fungi for Sustainable Development: Volume 1: Biodiversity and Ecological Perspectives. Cham: Springer International Publishing, 2021. pp. 393–427. doi:10.1007/978-3-030-67561-5_11
- 13 Schwab C., Bambace M.F. Traditional and Novel Applications of Sourdough Microbes in Northern Europe and the Baltic Countries. *Sourdough Microbiota and Starter Cultures for Industry*. Cham: Springer International Publishing, 2024. pp. 93–129. doi: 10.1007/978-3-031-48604-3_5
- 14 Ansari F., Alian Samakkhah S., Bahadori A. et al. Health-promoting properties of *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* as a probiotic; characteristics, isolation, and applications in dairy products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. vol. 63. no. 4. pp. 457–485. doi: 10.1080/10408398.2021.1951655
- 15 Popova N.V., Potoroko I.Y., Kalinina I.V. et al. Possibility of using ultrasonic treatment to regulate the functional properties of sprouted *Avena sativa* L. grain. *Bulletin of VSUET*. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 196–201. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-196-201 (in Russian)
- 16 Maslov A.V., Mingaleeva Z.Sh., Starovoitova O.V. et al. Prospects for the use of a complex additive to improve the biotechnological characteristics of *Saccharomyces cerevisiae* yeast. *Bulletin of VSUET*. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 96–101. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-96-101 (in Russian)
- 17 Reid J.E.S.J., Yakubov G.E., Lawrence S.J. Non-starch polysaccharides in beer and brewing: A review of their occurrence and significance. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. vol. 64. no. 3. pp. 837–851. doi: 10.1080/10408398.2022.2109585
- 18 Krstanović V., Habschied K., Mastanjević K. et al. The Influence of Milling Granulation on The Proportion of Fermentable and Non-Fermentable Ingredients in Mash Obtained from Mixed Endosperm Wheat. *Applied Sciences*. 2024. vol. 14. no. 14. p. 5985. doi: 10.3390/app14145985

19 Stepanova A.A., Asyakina L.K., Larichev T.A. et al. Fermented beverages: sources of their production and species composition of microbial communities (review). *APK Russia*. 2023. vol. 30. no. 5. pp. 703–711. doi: 10.55934/2587-8824-2023-30-5-703-711 (in Russian)

20 Yu Q., Qian J., Guo Y. et al. Applicable strains, processing techniques and health benefits of fermented oat beverages: A review. *Foods*. 2023. vol. 12. no. 8. p. 1708. doi:10.3390/foods12081708

21 Díaz A.B., Durán-Guerrero E., Valiente S. et al. Development and characterization of probiotic beers with *Saccharomyces boulardii* as an alternative to conventional brewer's yeast. *Foods*. 2023. vol. 12. no. 15. p. 2912. doi: 10.3390/foods12152912

Сведения об авторах

Владимир А. Иванов аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, ivanov_vlaa@baltika.com

 <https://orcid.org/0009-0001-3328-0550>

Анастасия А. Иванова аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, skorpyon96@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0214-6308>

Анастасия С. Андреева доцент, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, ул. Ломоносова 9, г. Санкт-Петербург, 191002, Россия, aandreeva@itmo.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6179-2265>

Инна В. Новикова д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии бродильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, noviv@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2360-5892>

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

Vladimirdr A. Ivanov graduate student, biotechnology faculty, ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia, ivanov_vlaa@baltika.com

 <https://orcid.org/0009-0001-3328-0550>

Anastasia A. Ivanova graduate student, biotechnology faculty, ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia, skorpyon96@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0214-6308>

Anastasia S. Andreeva associate professor, biotechnology faculty, ITMO University, 9 Lomonosova str., Saint Petersburg, 191002, Russia, aandreeva@itmo.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6179-2265>

Inna V. Novikova Dr. Sci. (Engin.), professor, head of department, technologies for fermentation and sugar production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, noviv@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2360-5892>

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 29/04/2024	После редакции 20/05/2024	Принята в печать 03/06/2024
Received 29/04/2024	Accepted in revised 20/05/2024	Accepted 03/06/2024

Кинетика сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое

Анатолий Н. Поперечный ¹	oborud@kaf.donnuet.ru	 0009-0007-5931-3545
Борис Ю. Байда ¹	bayda.boris@mail.ru	 0009-0007-4157-3269
Игорь А. Плетминцев ¹	GatBaida@ya.ru	 0009-0003-5527-4252

¹ ФГБОУ ВО ДОННУЭТ, пр-кт Театральный 28, Донецк, 283001, Россия

Аннотация. Цель исследования – обоснование режимов сушки гранулированных яблочных выжимок в псевдооживленном слое и оценка кинетики процесса. Эксперимент выполнен на лабораторной установке с прозрачной сушильной камерой, диафрагмой для измерения расхода воздуха, U-образным микроманометром, хромель-копелевыми термопарами и потенциометром. Контролировались температуры на входе и выходе, в толще слоя и в частицах; скорость потока измерялась анемометром. Исходные образцы имели влагосодержание около 250%, конечная влажность доводилась до 8–10%. Съём кривых выполнялся по результатам периодического взвешивания с шагом 2 мин. Получены кривые влагосодержания и скорости сушки при температурах 70–100 °С и при разных тепловых нагрузках. Процесс протекает в два периода: постоянной и падающей скорости. Переходная «критическая точка» фиксируется при влагосодержании около 100%. Продолжительность периода постоянной скорости составляет около 70% общей длительности. Установлены гидродинамические параметры псевдооживления: устойчивый режим слоя наблюдается при скорости воздуха более 2,5 м/с; характерные скорости для гранул диаметром 5 мм составляют: начало кипения 2,0 м/с, витание 3,5 м/с, вынос из слоя 3,7 м/с. При влагосодержании выше 260% устойчивое псевдооживление не формируется. Сушка в псевдооживленном слое обеспечивает существенную интенсификацию: максимальная скорость в первом периоде выше в 3–10 раз по сравнению с неподвижным слоем; длительность процесса меньше в 4–8 раз; удельный расход воздуха ниже примерно в 1,5 раза. Применение виброкипящего слоя повышает однородность псевдооживления и допускает работу при повышенных скоростях воздуха. Рекомендованы режимы: температура сушильного агента 70–100 °С; скорость воздуха свыше 2,5 м/с; доведение конечной влажности до 8–10%; хранение готового продукта при относительной влажности воздуха не выше 75%.

Ключевые слова: яблочные выжимки, псевдооживленный слой, кинетика сушки, кривые сушки, скорость сушки, критическая точка сушки, гидродинамическое сопротивление, скорость псевдооживления, тепловая нагрузка, влагосодержание.

Kinetics of apple pomace drying in fluidised bed

Anatoly N. Poperechny ¹	oborud@kaf.donnuet.ru	 0009-0007-5931-3545
Boris Y. Baida ¹	bayda.boris@mail.ru	 0009-0007-4157-3269
Igor A. Pletmintsev ¹	GatBaida@ya.ru	 0009-0003-5527-4252

¹ FGBOU VO DONNUET, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia

Abstract. The aim of the study is the substantiation of drying regimes for granulated apple pomace in a fluidized bed and the assessment of the kinetics of the process. The experiment was performed on a laboratory setup with a transparent drying chamber, a diaphragm for measuring air flow rate, a U-tube micro-manometer, chromel–copel thermocouples, and a potentiometer. Temperatures at the inlet and outlet, within the bed and in the particles, were monitored; the flow velocity was measured by an anemometer. The initial samples had a moisture content of about 250%, the final moisture was reduced to 8–10%. The recording of the curves was carried out based on periodic weighing at 2-min intervals. Curves of moisture content and drying rate were obtained at temperatures 70–100 °C and at different heat loads. The process proceeds in two periods: a constant-rate period and a falling-rate period. The transitional “critical point” is fixed at a moisture content of about 100%. The duration of the constant-rate period is about 70% of the total duration. Hydrodynamic parameters of fluidization were established: a stable bed regime is observed at an air velocity greater than 2.5 m/s; the characteristic velocities for granules with a diameter of 5 mm are: onset of bubbling 2.0 m/s, free floating 3.5 m/s, carryover from the bed 3.7 m/s. At a moisture content above 260% stable fluidization is not formed. Drying in a fluidized bed provides substantial intensification: the maximum rate in the first period is 3–10 times higher compared with a fixed bed; the process duration is lower by 4–8 times; the specific air consumption is lower by approximately 1.5 times. The use of a vibro-fluidized bed increases the uniformity of fluidization and allows operation at elevated air velocities. The recommended regimes are: drying-agent temperature 70–100 °C; air velocity above 2.5 m/s; achievement of final moisture 8–10%; storage of the finished product at a relative air humidity not higher than 75%.

Keywords: apple pomace, fluidized bed, drying kinetics, drying curves, drying rate, critical point of drying, hydrodynamic resistance, fluidization velocity, heat load, moisture content.

Для цитирования

Поперечный А.Н., Байда Б.Ю., Плетминцев И.А. Кинетика сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87 № 2. С. 126–133. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-126-133

For citation

Poperechny A.N., Baida B.Y., Pletmintsev I.A. Kinetics of apple pomace drying in fluidised bed. Vestnik VGUI [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 126–136. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-126-133

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

Введение

При отжиме сока из яблок образуются отходы в виде яблочных выжимок. Яблочные выжимки относятся к капиллярно-пористой коллоидной системе, в которую входят корки яблок, семенные гнезда, семена и мякоть. Количество выжимок составляет (в % к массе сырья): при переработке культурных сортов яблок – 29%, при переработке дичка – 40%. Норма образования яблочных выжимок в среднем составляет 34% от расходуемого сырья. Выжимки содержат 21-23% сухих веществ. Влажность сырых выжимок должна быть не более 70%, сухих – 8-10%.

Наиболее эффективным способом использования яблочных выжимок является производство из них сухого пектина, которое организовано как в России, так и в ряде зарубежных стран. Из яблочных выжимок вырабатывают также желирующий концентрат, в состав которого помимо пектина входят сахара, органические кислоты и другие растворимые вещества.

Пектин используется при изготовлении мармелада, конфитюра, джема, пастилы, жележных начинок, а также как стабилизатор при производстве соков с мякотью, майонеза, мороженого и т.д. Выжимки, получаемые при переработке плодов и ягод, быстро закисают, поэтому для производства пектина их консервируют путем высушивания. Наиболее прогрессивным способом сушки яблочных выжимок является сушка их в псевдооживленном слое, обеспечивающая требуемое качество продукта.

Цель исследования – экспериментально обосновать режимы сушки гранулированных яблочных выжимок в псевдооживленном слое и оценить кинетику процесса.

Задачи исследования:

1. разработать и описать лабораторную установку для сушки и гидродинамических измерений;
2. зарегистрировать кривые влагосодержания и скорости сушки при различных режимах;
3. определить характерные этапы сушки и критическую точку перехода от постоянной к падающей скорости;
4. оценить условия устойчивого псевдооживления слоя и параметры расхода воздуха

Материалы и методы

Объект исследования - гранулированные яблочные выжимки (капиллярно-пористая коллоидная система; компоненты: корки, семенные гнезда, семена, мякоть). Исходное влагосодержание – как у сырья после отжима сока; целевая остаточная влажность сухого продукта – 8-10%.

Экспериментальная установка

Проведены экспериментальные исследования по сушке яблочных выжимок на установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.

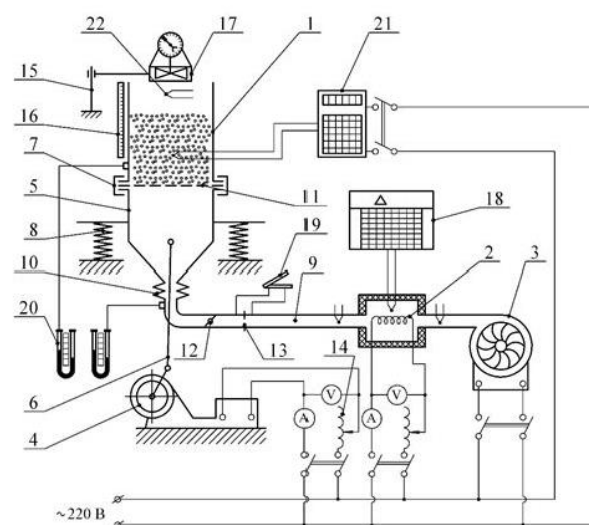


Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для сушки сыпучих материалов в АКС и АВКС: 1 – сушильная камера; 2 – электрический калорифер; 3 – вентилятор; 4 – вибратор; 5 – цилиндрический патрубок; 6 – тяга; 7 – захват; 8 – направляющая с пружинными амортизаторами; 9 – воздуховод; 10 – мягкий рукав; 11 – газораспределительная решетка; 12 – регулирующая заслонка; 13 – диафрагма; 14 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); 15 – стойка; 16 – линейка; 17 – анемометр; 18 – потенциометр ЭПП-0,9; 19 – микроманометр; 20 – дифференциальный микроманометр; 21 – потенциометр КСП-4, 22 – термопара

Figure 1. Schematic diagram of the experimental unit for drying bulk materials in an aerated fluidized bed (AFB) and an aero-vibro-fluidized bed (AVFB): 1 – drying chamber; 2 – electric heater (calorifier); 3 – fan; 4 – vibrator; 5 – cylindrical duct; 6 – linkage (rod); 7 – clamp (gripper); 8 – guide with spring dampers; 9 – air duct; 10 – flexible hose; 11 – air-distribution (gas-distribution) grate; 12 – control damper; 13 – orifice plate; 14 – laboratory autotransformer (LATR/variator); 15 – stand; 16 – ruler; 17 – anemometer; 18 – EPP-0.9 potentiometer; 19 – micromanometer; 20 – differential micromanometer; 21 – KSP-4 potentiometer; 22 – thermocouple

Установка состоит со следующих основных узлов: сушильной рабочей камеры, выполненной с прозрачного материала, что дает возможность осуществлять визуальные наблюдения и фотографирование процесса. Расходы воздуха на устройство регулировали заслонкой и измеряли по перепаду его давления на диафрагме.

Гидравлическое сопротивление слоя выжимок и перфорированного воздухораспределительного днища рабочей камеры измеряли U-образным микроманометром. Температуры воздуха на входе в камеру и выходе с нее, в середине отдельных частиц и слоя материала измерялись хромель-копелевыми термопарами в комплекте с шеститочечным автоматическим потенциометром КСП-4.

Термомпары проверены на идентичность показаний сертификационным центром. Калорифер и воздуховоды теплоизолированы.

Скорость потока сушильного агента контролировалась с помощью анемометра типа АСО-3, закрепленного на стойке. Исследовали кинетику сушки путем снятия кривых, построенных по изменению массы продукта, определяемой периодическим взвешиванием рабочего цилиндра с продуктом (интервал – 2 мин.). Влажность определялась методом высушивания до постоянной массы.

Средства измерений

Давление (гидравлическое сопротивление): U-образный микроманометр и дифференциальный микроманометр (тип не конкретизирован).

Температура: хромель-копелевые термопары в комплекте с шеститочечным автоматическим потенциометром КСП-4; проведена проверка идентичности показаний в сертификационном центре.

Скорость воздуха: анемометр АСО-3, установленный на стойке.

Производители/страны приборов в исходной статье не указаны; использовались обозначенные авторами типы и модели.

Снятие кривых кинетики сушки выполнялось по изменению массы рабочего цилиндра с продуктом методом периодического взвешивания с интервалом 2 мин; влажность определялась высушиванием до постоянной массы. Температуры контролировались на входе и выходе из камеры, в частицах и в слое. Для оценки гидродинамики фиксировали перепады давления и характер движения гранул при различных скоростях воздуха.

Расход сушильного агента (воздуха) на сушку в кг/с определялся по формуле:

$$Q_M = \alpha \varepsilon \sqrt{2\rho \Delta P}, \quad (1)$$

где коэффициент расхода $\alpha = 0,695$ – поправочный коэффициент для сжатой среды, $\varepsilon = 0,992$; ρ – плотность воздуха; кг/м³; ΔP – перепад давлений воздуха.

Обработка данных

Визуальные наблюдения и результаты гидродинамических исследований позволяют сделать следующие выводы. До момента перехода слоя выжимок с плотного слоя в псевдоожиженный при увеличении скорости воздуха возрастает гидравлическое сопротивление, его величина прямопропорциональна удельной нагрузке. Критическая скорость воздуха, отвечающая моменту начала интенсивного псевдоожижения на решетке почти, не зависит от величины влагосодержания материала и его порозности.

При каждой фиксированной скорости воздушного потока определяли гидравлическое сопротивление слоя и характер движения гранул выжимок. За экспериментальными данными

построены кривые псевдоожижения и найдены критические скорости псевдоожижения. На рисунке 2 показаны кривые псевдоожижения гранулированных яблочных выжимок диаметром 5 мм. Определено, что устойчивый режим псевдоожижения слоя наблюдается при скорости воздуха более 2,5 м/с.

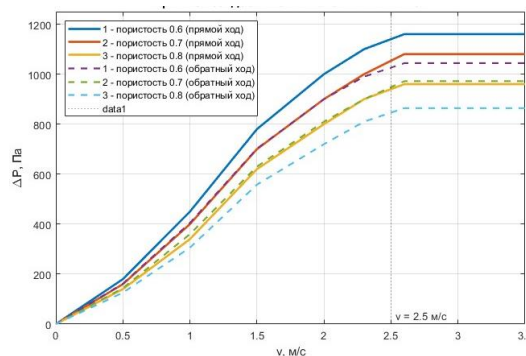


Рисунок 2. Кривые псевдоожижения яблочных выжимок в зависимости от удельной нагрузки и порозности

Figure 2. Fluidisation curves of apple pomace as a function of specific load and porosity

Найдены значения скоростей воздуха, при которых выжимки находятся в состоянии псевдоожиженного слоя v_{K2} и скорость его витания $v_{Вит}$:

$$v_{K2} = 2,0 \text{ м/с}; \quad (2)$$

$$v_{Вит} = 3,5 \text{ м/с} \quad (3)$$

Результаты

Исследуя кинетику сушки яблочных выжимок с целью выбора рационального режима их сушки нами проведена серия исследований при температуре теплоносителя от 70 до 100 °С. Результаты экспериментов по сушке яблочных выжимок представлены в виде кривых сушки и скорости сушки на рисунках 3,4.

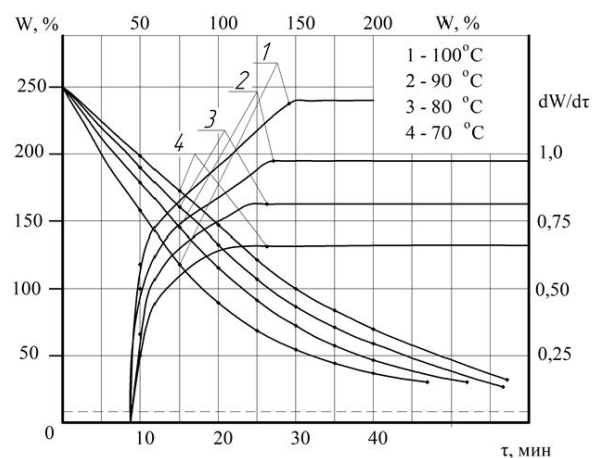


Рисунок 3. Кривые влагосодержания и скорости сушки гранулированных яблочных выжимок, в зависимости от температуры теплоносителя

Figure 3. Moisture content and drying rate curves of granulated apple pomace as a function of heat transfer temperature

Анализируя кривые скорости сушки необходимо отметить, что в исследованиях наблюдается определенный характер их изменения. Независимо от температуры теплоносителя на кривых четко выделяется ряд критических точек влагосодержания.

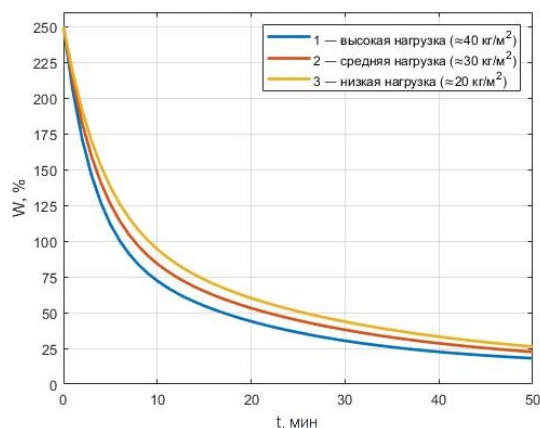


Рисунок 4. Кривые сушки при различных нагрузках на газораспределительную решетку

Figure 4. Drying curves at different loads on the gas distribution grid

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что сушка гранулированных яблочных выжимок в псевдооживленном слое протекает в два четко выраженных периода – период постоянной скорости и последующий период падающей скорости. На кривых сушки и скоростей сушки наблюдается «критическая точка» (перелом кривой), которая соответствует влагосодержанию около 100% (в расчёте на абсолютно сухое вещество) и практически не зависит от температуры сушильного агента. Эта критическая точка разделяет два режима испарения влаги: интенсивное испарение поверхностной влаги в первом периоде и более медкое удаление связанной влаги во втором периоде. Продолжительность первого, постояннокоростного периода составила порядка 70% общей длительности процесса. Подобное поведение характерно для высушивания материалов с высоким исходным влагосодержанием, когда в начале сушки поверхность частиц остаётся полностью смоченной и испарение идёт с максимально возможной скоростью. Напротив, для материалов с низким исходным увлажнением постоянный период может отсутствовать вовсе – так, при конвективной сушке зерна тритикале наблюдался только период падающей скорости [1]. В нашем случае высокая начальная влажность (~250%) обеспечила наличие длительного периода постоянной скорости вплоть до достижения критического влагосодержания ~100%. Следует отметить, что

методика ускоренного высушивания с регистрацией «ускорения сушки» (второй производной влагосодержания) позволяет точно определять критические точки на кривых сушки [2]. В нашем исследовании значение критической влажности (точка перегиба кривой скорости сушки) было определено именно таким образом, что повышает точность выделения границы между двумя периодами.

Сравнение сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое и в неподвижном слое показало явные преимущества первого метода. Псевдооживление дисперсного материала существенно интенсифицирует тепло- и массообмен [3]. В наших опытах коэффициенты сушки (скорости испарения влаги с единицы поверхности) в псевдокипящем слое превышали аналогичные показатели для неподвижного слоя примерно в 3–10 раз (для первого периода сушки – ближе к верхней границе, для второго – к нижней). Это согласуется с современными представлениями: например, по данным обзора Majumder и соавт., псевдооживленные слои позволяют значительно увеличить скорость сушки и снизить энергоёмкость процесса за счёт более эффективной передачи тепла и влаги [3][4]. Кроме того, продолжительность сушки во флюидизированном слое сокращается многократно. Экспериментально показано, что при сушке выжимок в псевдооживленном слое общее время процесса в 4–8 раз меньше, чем при сушке того же материала в фиксированном слое. Это означает более высокую производительность и меньший нагрев продукта, что важно для сохранения качества сушёного сырья. Также установлено, что удельный расход сушильного агента (воздуха) при псевдооживлении ниже примерно в 1,5 раза по сравнению с неподвижным слоем, благодаря более полному использованию тепла на испарение влаги. Таким образом, наши результаты количественно подтвердили, что переход дисперсного материала в псевдооживленное состояние приводит к существенной интенсификации сушки, что ранее отмечалось и другими исследователями [3][4].

Анализ гидродинамических параметров показал, что для гранул выжимок диаметром ~5 мм требуется относительно высокая скорость воздуха для инициирования псевдооживления. Так, начало кипения слоя фиксируется при скорости потока ~2,0 м/с, устойчивая псевдооживленность достигается при скорости >2,5 м/с, а при дальнейшем увеличении скорости наблюдается интенсивный вынос частиц из слоя (начало уноса заметно около 3,7 м/с). Эти характерные скорости согласуются с ожиданиями для частиц указанного размера и плотности.

В частности, Shishatskii и др. указывают, že режим псевдооживления и равномерность слоя сильно зависят от физических свойств материала и конструкции аппарата [5]. Наше важное наблюдение состоит в том, что при слишком высокой влажности сырья псевдооживленный режим может не формироваться вовсе. Эксперименты показали, что при влагосодержании гранул выше ~260% слой вел себя как плотный и неподвижный – частицы слипались, и поток воздуха пробивал локальные каналы, минуя большую часть материала. Таким образом, избыточная влага препятствует псевдооживлению из-за увеличения массы и липкости частиц. Для восстановления кипящего слоя в таких условиях требуются специальные меры (например, предварительное удаление части влаги или интенсификация внешнего воздействия на слой). В целом, для каждого вида высушиваемого материала необходимо подбирать оптимальные условия псевдооживления [6]. В нашем случае условием устойчивого кипящего слоя было ограничение влажности частиц ниже ~260% и обеспечение скорости газового потока не менее 2,5–3 м/с.

Отдельного внимания заслуживает влияние вибрации слоя. Наблюдалось, что при наложении высокочастотных колебаний на псевдооживленный слой (вибрационный режим) уменьшается склонность частиц к агломерации и выносу. Вибрация способствует разрушению пузырей воздуха и более равномерному распределению частиц по объёму аппарата. В наших опытах использование виброкипящего слоя позволило сохранить псевдооживление даже при скоростях воздуха, немного превышающих порог выноса для невибрируемого слоя, а также несколько выровнять температуру и влажность по высоте слоя. Литературные данные подтверждают эффективность вибрационного псевдооживления: так, зарубежные исследователи зафиксировали значительное увеличение скорости сушки при введении вибрации по сравнению с обычным псевдооживленным слоем [7][8]. В частности, в виброкипящем слое наблюдается улучшенное перемешивание частиц и устранение застойных зон, что ускоряет отдачу влаги. Таким образом, вибрационный режим можно рекомендовать для сушки трудносушимых и склонных к слипанию материалов – в нашем случае это позволило расширить диапазон рабочих скоростей воздушного потока и получить более однородный высушенный продукт.

Высушенные яблочные выжимки представляют собой гигроскопичный порошок, способный повторно поглощать влагу из окружающего воздуха. Наши опыты показали, что при влажности воздуха выше ~75% высушенный продукт

быстро набирает влагу. Поэтому для сохранения качества рекомендуется хранение порошка выжимок при относительной влажности не более 75%. Это соответствует отраслевым стандартам: согласно техническим условиям, конечная влажность сухих яблочных выжимок должна быть не более 8%, а содержание пектиновых веществ – не менее 7% (именно таких показателей мы достигли при сушке). Практическая ценность высушенных яблочных выжимок подтверждается их успешным применением в пищевой промышленности. Порошок из выжимок богат пищевыми волокнами, пектинами и антиоксидантами, что делает его востребованной добавкой. Зарубежные исследования систематически отмечают эффективность использования яблочного жома в качестве обогащающего ингредиента в самых разных продуктах – от хлебобулочных до мясных изделий [9][10]. Наши результаты открывают возможность применения высушенного порошка яблочных выжимок в рецептурах хлеба, кондитерских изделиях, сухих завтраков и др. Например, добавление 3–5% яблочного порошка в пшеничное тесто позволяет повысить содержание пищевых волокон в хлебе и улучшить его антиоксидантные свойства [11]. Отечественные разработки также демонстрируют перспективность такого обогащения: введение порошка яблочных выжимок в рецептуру хлеба повышает его биологическую ценность без существенного ухудшения органолептических показателей [12]. Таким образом, результаты нашего исследования не только дают количественную оценку кинетики сушки яблочных выжимок, но и подтверждают целесообразность переработки этого агропищевого отхода в стойкий порошкообразный продукт с широкими возможностями использования.

Подводя итог обсуждению, подчеркнём ключевые практические рекомендации. Для эффективной сушки гранулированных яблочных выжимок целесообразно поддерживать температуру сушильного агента в диапазоне 70–100 °C и скорость воздушного потока не ниже 2,5–3 м/с, завершая сушку при достижении конечной влажности продукта порядка 8–10%. Соблюдение этих режимов, по нашим данным, обеспечивает оптимальное сочетание скорости процесса и качества продукта: за время около 30–40 минут удаётся удалить ~90% влаги, при этом энергетические затраты снижены, а питательные вещества выжимок в значительной степени сохраняются. Полученный высокопористый сухой гранулят рекомендуется охладить и хранить в герметичной таре. При соблюдении указанных условий хранения порошок из яблочных выжимок сохраняет свои свойства

в течение длительного времени и может служить ценным ингредиентом для производства функциональных пищевых продуктов.

Заключение

В ходе проведенного исследования комплексно изучена кинетика конвективной сушки яблочных выжимок в псевдооживленном слое и обоснованы оптимальные режимные параметры процесса. Получены кривые сушки (влажность от времени) и кривые скорости сушки в диапазоне температур теплоносителя 70–100 °С при различных расходах воздуха. Показано, что сушка гранул выжимок протекает в два периода – постоянной и падающей скорости. Впервые для яблочных выжимок экспериментально зафиксирована критическая точка сушки при влагосодержании около 1 кг/кг сухого вещества ($\approx 100\%$ влажности) и установлено, что она слабо зависит от температуры воздуха. Длительность периода постоянной скорости достигает $\sim 70\%$ от общей продолжительности процесса, что заметно больше, чем у менее влажных материалов. Максимальная скорость сушки в начальном периоде составляет 0,8–1,2% влажности в минуту (при 100 °С), после чего скорость резко падает. Доказано, что применение псевдооживленного слоя позволяет резко интенсифицировать сушку яблочных выжимок по сравнению с традиционным методом в неподвижном слое: процесс ускоряется в несколько раз, а энергопотребление снижается. В частности, нами показано увеличение коэффициента сушки в 3–10 раз, сокращение времени удаления влаги в 4–8 раз и снижение удельного расхода тепла и воздуха примерно в 1,5 раза при переводе слоя выжимок в кипящее состояние. Эти количественные показатели являются научно-практической новизной работы, поскольку ранее для яблочных выжимок подобные данные не приводились в литературе. Получены также новые данные о гидродинамике псевдооживленного слоя: определены минимальная скорость псевдооживления ($\sim 2,0$ м/с для гранул 5 мм), граница устойчивого кипения ($\sim 2,5$ м/с) и скорость начала уноса частиц ($\sim 3,5$ – $3,7$ м/с). Выявлено важное ограничение процесса: при сверхвысоком влагосодержании сырья ($>260\%$) псевдооживление не реализуется из-за слипания частиц и каналирования потока. Это указывает на границы применимости технологии – например, целесообразно предварительное обезвоживание крайне мокрых выжимок (отжатие соков до влажности $\sim 250\%$) перед сушкой в кипящем слое.

Практические выводы нашего исследования состоят в следующем. Для эффективной конвективной сушки яблочных выжимок рекомендуется использовать псевдооживленный (кипящий) слой, поддерживая температуру сушильного агента 70–100 °С и скорость воздуха не ниже 2,5 м/с. Конечную влажность продукта следует доводить до 8–10%, что соответствует требованиям к пищевым порошкам из выжимок. Выполнение этих условий обеспечивает стабильное псевдооживление гранул и высокую интенсивность сушки без перегрева продукта. Получаемый сухой порошок выжимок обладает высокой гигроскопичностью, поэтому его нужно охлаждать и герметично упаковывать; хранение допустимо при относительной влажности воздуха $\leq 75\%$. Научная и практическая значимость работы заключается в том, что впервые обоснован режим псевдооживленной сушки для отходов фруктопереработки (яблочного жома) и показана возможность его использования для получения качественного пектинсодержащего порошка. Установленные кинетические закономерности (значения критической влажности, скорость сушки по периодам, динамика температуры и др.) и гидродинамические характеристики могут быть использованы при проектировании промышленных сушилок кипящего слоя для переработки фруктовых выжимок и сходных по свойствам материалов. Ограничением исследования является лабораторный масштаб и использование модельного сырья (высушивались искусственно гранулированные выжимки фиксированного размера ~ 5 мм). В дальнейшем целесообразно провести испытания на сырье разного гранулометрического состава, а также отработать процесс в непрерывном вибрационном псевдооживленном слое. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией процесса по энергоэффективности и сохранению биологически активных веществ: планируется изучить комбинированные способы сушки (например, предварительный подогрев СВЧ-энергией) и исследовать качество получаемых порошков (содержание пектинов, антиоксидантная активность). Полученные в работе результаты и выявленные закономерности могут стать основой для масштабирования процесса и промышленной реализации технологии сушки яблочных выжимок, что будет способствовать более полному использованию агропищевых отходов в экономике замкнутого цикла.

Литература

- 1 Шишацкий Ю.И., Толстов С.А., Дерканосова А.А. и др. О равновесии и устойчивости псевдооживленного слоя, как термодинамической системы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 2. С. 56–60. doi: 10.20914/2310-1202-2021-2-56-60
- 2 Косачев В.С., Остриков А.Н., Яшонков А.А. Математическое моделирование процесса сушки снеков из фарша бычка азовского в псевдооживленном слое // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 2. С. 68–77. doi: 10.20914/2310-1202-2022-2-68-77
- 3 Ковалева А.Е., Наumenko Н.В., Потороко И.Ю. и др. Совершенствование рецептуры и технологии хлеба пшеничного с использованием яблочных выжимок // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 2. С. 61–66. doi: 10.20914/2310-1202-2020-2-61-66
- 4 Наumenko Н.В., Потороко И.Ю., Калинина И.В. и др. Оценка показателей качества хлеба пшеничного, обогащенного вторичным яблочным сырьем // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3. С. 200–207. doi: 10.20914/2310-1202-2020-3-200-207
- 5 Тертычная Т.Н., Шевцов А.А., Дранников А.В. Экспериментально-статистическое исследование процесса сушки зерна тритикале в барабанной сушилке при противоточно-прямоточном режиме // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 4. С. 256–264. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-256-264
- 6 Желтоухова Е.Ю., Колесник М.С., Терёхина А.В. Применение ускоренной сушки для изучения форм связи влаги в плодах смородины черной // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85. № 1. С. 17–23. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-17-23
- 7 Majumder P., Deb B., Gupta R. et al. A comprehensive review of fluidized bed drying: Sustainable design approaches, hydrodynamic and thermodynamic performance characteristics, and product quality // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. 102643. doi: 10.1016/j.seta.2022.102643
- 8 Antonic B., Jancikova S., Dordevic D. et al. Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis // Journal of Food Science. 2020. Vol. 85. № 10. P. 2977–2985. doi: 10.1111/1750-3841.15449
- 9 Tulej W., Głowacki S. Modeling of the Drying Process of Apple Pomace // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. № 3. 1434. doi: 10.3390/app12031434
- 10 de Munck M.J.A., Peters E.A.J.F., Kuipers J.A.M. Experimental study on vibrating fluidized bed solids drying // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 472. 144809. doi: 10.1016/j.cej.2023.144809
- 11 Поперечный А.Н., Корнийчук В.Г., Парамонова В.А. Интенсификация процессов сушки пищевых продуктов: монография / под ред. А.Н. Поперечного. Донецк: ДОННУЭТ, 2023. 244 с.
- 12 Galvão A.M.M.T., Rodrigues S., Fernandes F.A.N. Kinetics of ultrasound pretreated apple cubes dried in fluidized bed dryer // Drying Technology. 2020. Vol. 38. № 10. P. 1367–1377. doi: 10.1080/07373937.2019.1641511
- 13 Araujo B.Z., Martins V.F., Pintado M.E. et al. A comparative study of drying technologies for apple and ginger pomace: kinetic modeling and antioxidant properties // Processes. 2024. Vol. 12. № 10. 2096. doi: 10.3390/pr12102096
- 14 Shirsat V.R., Vaidya P.D., Dalvi V.H. et al. Kinetics of cashew apple drying through mechanistic models and analysis of the effects of drying conditions on the retention of bioactive compounds // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2024. Vol. 102. № 11. P. 3817–3831. doi: 10.1002/cjce.25395
- 15 Shekar B.L., Zakka R., Tsokwa T. et al. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of cashew apple pomace in hot air oven dryer // Acta Periodica Technologica. 2020. № 51. P. 119–136. doi: 10.2298/APT051119S
- 16 Chakraborty R., Kashyap P., Gadhave R.K. et al. Fluidized bed drying of wheatgrass: effect of temperature on drying kinetics, proximate composition, functional properties, and antioxidant activity // Foods. 2023. Vol. 12. № 8. 1576. doi: 10.3390/foods12081576
- 17 Frikha S., Baccar M. Investigations into the drying kinetics of alumina particles in a fluidised bed dryer // Indian Chemical Engineer. 2025. P. 1–14. doi: 10.1080/00194506.2025.2480141
- 18 de Cassia Santos Y., Freitas M.D.M., Freire F.B. et al. Heat and mass transfer in fluidized bed drying of acai agricultural biomass waste // Fuel. 2025. Vol. 399. 135547. doi: 10.1016/j.fuel.2025.135547
- 19 Milanovic M., Komatina M., Scherzinger M. et al. Influence of heat supply method on drying kinetics of apple and nectarine pomace // Biomass Conversion and Biorefinery. 2025. Vol. 15. № 1. P. 1155–1167. doi: 10.1007/s13399-024-05633-y
- 20 Alibas I., Yilmaz A., Asik B.B. et al. Drying kinetics and quality characteristics of green apple peel (*Mallus communis* L. var. "Granny Smith") used in herbal tea production // Journal of Food Processing and Preservation. 2020. Vol. 44. № 2. e14332. doi: 10.1111/jfpp.14332

References

- 1 Shishatsky Yu.I., Tolstov S.A., Derkanosova A.A. et al. On the equilibrium and stability of a fluidized bed as a thermodynamic system. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021. vol. 83. no. 2. pp. 56–60. doi:10.20914/2310-1202-2021-2-56-60 (in Russian)
- 2 Kosachev V.S., Ostrikov A.N., Yashonkov A.A. Mathematical modeling of the drying process of snacks from Azov bullhead mince in a fluidized bed. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 68–77. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-68-77 (in Russian)
- 3 Kovaleva A.E., Naumenko N.V., Potoroiko I.Yu. et al. Improvement of the formulation and technology of wheat bread using apple pomace. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. vol. 82. no. 2. pp. 61–66. doi:10.20914/2310-1202-2020-2-61-66 (in Russian)
- 4 Naumenko N.V., Potoroiko I.Yu., Kalinina I.V. et al. Evaluation of quality indicators of wheat bread enriched with secondary apple raw materials. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 200–207. doi:10.20914/2310-1202-2020-3-200-207 (in Russian)

- 5 Tertychnaya T.N., Shevtsov A.A., Drannikov A.V. Experimental-statistical study of the process of drying triticale grain in a drum dryer under counter-current co-current mode. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 256–264. doi:10.20914/2310-1202-2020-4-256-264 (in Russian)
- 6 Zheltoukhova E.Yu., Kolesnik M.S., Teryokhina A.V. Application of accelerated drying to study the forms of moisture binding in blackcurrant fruits. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 17–23. doi:10.20914/2310-1202-2023-1-17-23 (in Russian)
- 7 Majumder P., Deb B., Gupta R. et al. A comprehensive review of fluidized bed drying: Sustainable design approaches, hydrodynamic and thermodynamic performance characteristics, and product quality. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. vol. 52. p. 102643. doi:10.1016/j.seta.2022.102643
- 8 Antonic B., Jancikova S., Dordevic D. et al. Apple pomace as food fortification ingredient: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Food Science*. 2020. vol. 85. no. 10. pp. 2977–2985. doi:10.1111/1750-3841.15449
- 9 Tulej W., Glowacki S. Modeling of the Drying Process of Apple Pomace. *Applied Sciences*. 2022. vol. 12. no. 3. p. 1434. doi:10.3390/app12031434
- 10 de Munck M.J.A., Peters E.A.J.F., Kuipers J.A.M. Experimental study on vibrating fluidized bed solids drying. *Chemical Engineering Journal*. 2023. vol. 472. p. 144809. doi:10.1016/j.cej.2023.144809
- 11 Poperechny A.N., Korniyuk V.G., Paramonova V.A. Intensification of food drying processes: monograph. Ed. by A.N. Poperechny. Donetsk: DONNUET, 2023. 244 p. (in Russian)
- 12 Galvão A.M.M.T., Rodrigues S., Fernandes F.A.N. Kinetics of ultrasound pretreated apple cubes dried in fluidized bed dryer. *Drying Technology*. 2020. vol. 38. no. 10. pp. 1367–1377. doi:10.1080/07373937.2019.1641511
- 13 Araujo B.Z., Martins V.F., Pintado M.E. et al. A comparative study of drying technologies for apple and ginger pomace: kinetic modeling and antioxidant properties. *Processes*. 2024. vol. 12. no. 10. p. 2096. doi:10.3390/pr12102096
- 14 Shirsat V.R., Vaidya P.D., Dalvi V.H. et al. Kinetics of cashew apple drying through mechanistic models and analysis of the effects of drying conditions on the retention of bioactive compounds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2024. vol. 102. no. 11. pp. 3817–3831. doi:10.1002/cjce.25395
- 15 Shekarau B.L., Zakka R., Tsokwa T. et al. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of cashew apple pomace in hot air oven dryer. *Acta Periodica Technologica*. 2020. no. 51. pp. 119–136. doi:10.2298/APT2051119S
- 16 Chakraborty R., Kashyap P., Gadhave R.K. et al. Fluidized bed drying of wheatgrass: effect of temperature on drying kinetics, proximate composition, functional properties, and antioxidant activity. *Foods*. 2023. vol. 12. no. 8. p. 1576. doi: 10.3390/foods12081576
- 17 Frikha S., Baccar M. Investigations into the drying kinetics of alumina particles in a fluidised bed dryer. *Indian Chemical Engineer*. 2025. pp. 1–14. doi: 10.1080/00194506.2025.2480141
- 18 de Cassia Santos Y., Freitas M.D.M., Freire F.B. et al. Heat and mass transfer in fluidized bed drying of acai agricultural biomass waste. *Fuel*. 2025. vol. 399. p. 135547. doi: 10.1016/j.fuel.2025.135547
- 19 Milanovic M., Komatina M., Scherzinger M. et al. Influence of heat supply method on drying kinetics of apple and nectarine pomace. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. vol. 15. no. 1. pp. 1155–1167. doi: 10.1007/s13399-024-05633-y
- 20 Alibas I., Yilmaz A., Asik B.B. et al. Drying kinetics and quality characteristics of green apple peel (*Mallus communis* L. var. "Granny Smith") used in herbal tea production. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. vol. 44. no. 2. p. e14332. doi:10.1111/jfpp.14332

Сведения об авторах

Анатолий Н. Поперечный д.т.н., профессор, кафедра оборудования пищевых производств, Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского, пр-т Театральный, 28, г. Донецк, 283001, Россия, oborud@kaf.donnuet.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-5931-3545>

Борис Ю. Байда старший преподаватель, кафедра холодильной и торговой техники имени Осокина В.В., Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского, пр-т Театральный, 28, г. Донецк, 283001, Россия, bayda.boris@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-4157-3269>

Игорь А. Плетминцев магистрант, кафедра оборудования пищевых производств, Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского, пр-т Театральный, 28, г. Донецк, 283001, Россия, GatBaida@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0003-5527-4252>

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

Anatoly N. Poperechny Dr. Sci. (Engin.), professor, food production equipment department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia, oborud@kaf.donnuet.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-5931-3545>

Boris Y. Baida Senior Lecturer, Osokin V.V. refrigeration and trade technolog department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia, bayda.boris@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0007-4157-3269>

Igor A. Pletmintsev graduate student, food production equipment department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 28, Teatralny Ave, Donetsk, 283001, Russia, GatBaida@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0003-5527-4252>

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 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2026
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2026

Анализ эффективности электромембранной очистки промышленных растворов от ионов никеля

Валерия А. Семилетова¹ semiletovatstu@gmail.ru

Константин В. Шестаков¹ kostyanshestakov@mail.ru

Сергей И. Лазарев¹ sergey.lazarev.1962@mail.ru

Константин К. Полянский^{2,3} kaf-kit@vfreu.ru  0000-0002-8817-1466

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. Электродиализ (ЭД) представляет собой перспективный метод очистки сточных вод гальванических производств от ионов тяжелых металлов, в частности никеля (Ni^{2+}). В данной работе исследована кинетика процесса электродиализа с использованием анионо- и катионообменных мембран (МА-41П и МК-40Л) для удаления Ni^{2+} из растворов с начальными концентрациями от 40 до 160 мг/л. Установлено, что эффективность очистки достигает 99,3%, что подтверждает высокую селективность метода. Ключевым фактором, влияющим на скорость и эффективность процесса, является плотность тока. Оптимальное значение 20 А/м² обеспечивает баланс между высокой степенью очистки и энергозатратами. Увеличение плотности тока выше этого значения не приводит к значительному росту эффективности, но существенно повышает расход электроэнергии. Кроме того, показано, что при высокой начальной концентрации никеля (160 мг/л) процесс замедляется из-за насыщения мембран и возможного образования осадков. Важным аспектом исследования стал анализ электродиффузионной проницаемости мембран. Установлено, что с ростом плотности тока коэффициент проницаемости снижается на 55%, что связано с увеличением градиента концентрации и изменением свойств мембраны под воздействием электрического поля. На основе экспериментальных данных предложена технологическая схема очистки промышленных стоков, включающая этапы нейтрализации, электродиализа и утилизации концентрата. Очищенная вода может быть возвращена в производственный цикл, а никельсодержащий концентрат — переработан для повторного использования. Результаты работы демонстрируют высокую эффективность электродиализа для очистки сточных вод от никеля и могут быть использованы для оптимизации промышленных процессов с учетом экономических и экологических требований.

Ключевые слова: электродиализ, электродиффузия, никель, технологическая схема, ионообменная мембрана, кинетические характеристики.

Analysis of the efficiency of electromembrane purification of industrial solutions from nickel ions

Valeria A. Semiletova¹ semiletovatstu@gmail.ru

Konstantin V. Shestakov¹ kostyanshestakov@mail.ru

Sergey I. Lazarev¹ sergey.lazarev.1962@mail.ru

Konstantin K. Polyansky^{2,3} kaf-kit@vfreu.ru  0000-0002-8817-1466

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

Abstract. Electrodialysis (ED) is a promising method for purifying wastewater from galvanic industries from heavy metal ions, in particular nickel (Ni^{2+}). In this paper, we study the kinetics of the electrodialysis process using anion- and cation-exchange membranes (MA-41P and MK-40L) to remove Ni^{2+} from solutions with initial concentrations from 40 to 160 mg/l. It was found that the purification efficiency reaches 99.3%, which confirms the high selectivity of the method. The key factor affecting the speed and efficiency of the process is the current density. The optimal value of 20 A/m² ensures a balance between a high degree of purification and energy consumption. Increasing the current density above this value does not lead to a significant increase in efficiency, but significantly increases energy consumption. In addition, it is shown that at a high initial concentration of nickel (160 mg/l), the process slows down due to membrane saturation and possible sedimentation. An important aspect of the study was the analysis of the electrodiffusion permeability of membranes. It was found that with increasing current density, the permeability coefficient decreases by 55%, which is due to an increase in the concentration gradient and a change in the membrane properties under the influence of an electric field. Based on the experimental data, a process flow chart for cleaning industrial wastewater was proposed, including the stages of neutralization, electrodialysis, and concentrate utilization. Purified water can be returned to the production cycle, and nickel-containing concentrate can be recycled. The results of the work demonstrate the high efficiency of electrodialysis for cleaning wastewater from nickel and can be used to optimize industrial processes taking into account economic and environmental requirements.

Keywords: electrodialysis, electrodiffusion, nickel, process flow chart, ion exchange membrane, kinetic characteristics.

Введение

В современном мире проблема загрязнения окружающей среды становится все более актуальной. Одной из ключевых угроз для экосистем являются тяжелые металлы, которые попадают в воду и почву через промышленные выбросы,

сельскохозяйственные сточные воды и другие источники антропогенного воздействия. В связи с этим важно постоянно проводить разработку и внедрение эффективных технологий для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов.

Для цитирования

Семилетова В.А., Шестаков К.В., Лазарев С.И., Полянский К.К. Анализ эффективности электромембранной очистки промышленных растворов от ионов никеля // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 134–142. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-134-142

For citation

Semiletova V.A., Shestakov K.V., Lazarev S.I., Polyansky K.K. Analysis of the efficiency of electromembrane purification of industrial solutions from nickel ions. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 134–142. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-134-142

Среди таких технологий особое место занимают мембранные методы разделения, которые благодаря своей высокой эффективности, простоте эксплуатации и компактному размеру становятся все более востребованными [1, 2]. К ним относят ультрафильтрацию, нанофильтрацию, обратный осмос, электродиализ (ЭД) и другие менее распространенные методы [3, 4]. ЭД использует электрическое поле для перемещения ионов через ионообменные мембраны, что позволяет избирательно удалять необходимые компоненты из жидкостей. Данный метод обладает существенными преимуществами и превосходит альтернативные технологии мембранной фильтрации:

Высокая селективность, позволяющая избирательно удалять ионы тяжелых металлов и других загрязнителей. Данное качество делает ЭД особенно эффективным для очистки сточных вод, содержащих специфические загрязнители.

Минимизация образования шлама. В ЭД-процессе электродиализа не происходит накопления твердых частиц на мембранах, что снижает риск засорения и упрощает обслуживание системы.

Эффективность при низких концентрациях делает ЭД подходящим для обработки сточных вод с малым содержанием загрязнителей.

Данная технология находит широкое применение в таких областях, как очистка сточных вод, опреснение воды, пищевая и химическая промышленность, очистка сточных вод гальвано-производств. В очистке сточных вод ЭД эффективно удаляет тяжелые металлы, соли и органические загрязнители, что делает его привлекательным для использования на промышленных предприятиях. В пищевой отрасли ЭД применяется для устранения излишков солей и повышения качества продукции. В химической индустрии этот метод используют для выделения чистых химических веществ. [5–7].

В гальванической промышленности ЭД часто используют для извлечения ценных веществ из сильно концентрированных стоков, которые образуются при химической и электрохимической обработке стали и цветных металлов [8, 9]. Одним из наиболее часто применяющихся металлов является никель. Он находит широкое применение в гальваническом производстве благодаря своей исключительной коррозионной стойкости. Процесс никелирования обычно приводит к образованию значительных объемов сточных вод, часто содержащих концентрации катионов Ni^{2+} от 20 до 200 мг/л [10, 11]. Эти сточные воды чаще всего очищают с помощью химического осаждения, что приводит к образованию значительного количества шлама с массовой долей никеля в нем около 31,6% [12].

В исследованиях [13, 14] авторы с помощью ЭД-разделения смогли достичь удаления до 95% никеля из сточных вод, образованных после процесса никелирования. В работе [15] с помощью двухкамерного аппарата для электроосаждения и электродиализа одновременно восстанавливали никель, содержащийся в отработанных ваннах химического никелирования, и без вторичного загрязнения удаляли соединения фосфора. Результаты показали, что количество восстановленного никеля составило 82,34%. Авторы в работе [16] добились снижения концентрации Ni^{2+} в анолите и католите до 0,015 и 0,085 мг/л соответственно при изначально низкой начальной концентрации, равной 1 мг/л, за счет сочетания электродиализа и электроосаждения. В работе [17] исследовался процесс извлечения никеля из твердых шламов с использованием 0,1 М серной кислоты. Процесс включал в себя обработку шлама кислотой, электродиализное концентрирование и электровосстановление для извлечения никеля из полученного раствора на электроде. Выход никеля по току на катоде достигал 96%. Результаты ряда экспериментов [18] показывают, что максимальная степень извлечения ионов никеля достигается при напряжении 12 В, а оптимальная скорость подачи раствора для лабораторного аппарата составляет 0,13 м/с. Также было проведено концентрирование раствора, полученного обессоливанием промывной воды, с целью его повторного использования в технологическом цикле. В результате был получен раствор с концентрацией 34,1 г/л.

На основе проведенного литературного анализа работ [1–18], оценена важность проблемы очистки образующихся в процессе никелирования сточных вод и сформулирована цель работы.

Цель работы – исследование эффективности электромембранной очистки промышленных растворов гальванических производств от ионов никеля и технологическое оформление процесса. Для достижения поставленной цели был решен ряд задач, включая исследование кинетики ЭД-разделения и коэффициента электродиффузионной проницаемости.

Материалы и методы

Для проведения экспериментов и исследования кинетики ЭД-разделения использовалась специальная установка (рисунок 1), включающая ЭД-ячейку, а также три независимые линии циркуляции растворов, подключенные к ней. Каждая из этих линий предназначена для циркуляции обессоленного, концентрированного и приэлектродного (смешанных анолита и католита) растворов.

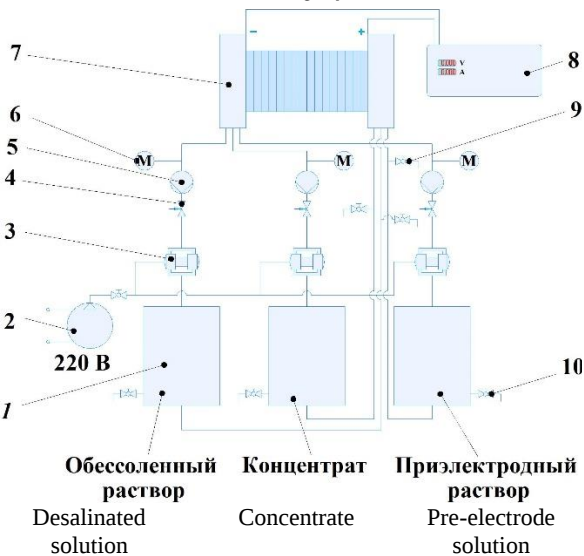


Рисунок 1. Экспериментальная электродезаппаратура: 1 – емкости для обессоленного, концентрированного и приэлектродного растворов; 2 – пневматический насос; 3 – масляный компрессор; 4 – контрольный клапан; 5 – расходомер; 6 – манометр; 7 – электродезаппаратура; 8 – лабораторный источник питания; 9 – выпускной кран для сбора; 10 – выпускной кран для слива

Figure 1. Experimental electrodesorption setup: 1 – tanks for demineralized, concentrated and near-electrode solutions; 2 – pneumatic pump; 3 – oil compressor; 4 – control valve; 5 – flow meter; 6 – pressure gauge; 7 – electrodesorption cell; 8 – laboratory power source; 9 – collection outlet valve; 10 – drainage outlet valve

В электродезаппаратуре, общая схема которой показана на рисунке 2, под воздействием электрического поля ионы перемещаются через ионообменные мембраны, установленные в чередующемся порядке и образующие камеры разделения. Ширина межмембранного канала составляла 0,001 м, а активная площадь мембран – 0,0306 м².

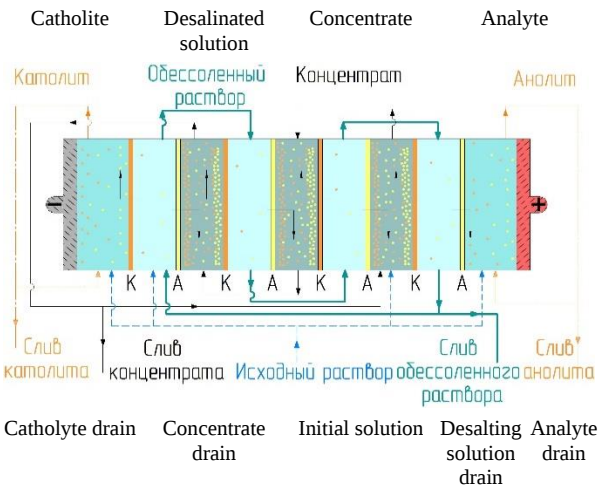


Рисунок 2. Схема электродезаппаратуры

Figure 2. Scheme of electrodesorption apparatus

Исследование коэффициента электродезаппаратурной проницаемости было проведено на установке, представленной на рисунке 3. Установка состояла из разделительной ячейки, лабораторного источника питания и двух магнитных мешалок. Конструкция разделительной ячейки включала две квадратные камеры из оргстекла, прижатых друг к другу. Между камерами размещалась исследуемая мембрана, зафиксированная пластиковыми решетками. Внутри каждой камеры находился монополярный электрод, к которому подводился постоянный ток от источника питания. Рабочий раствор помещали в обе камеры, где для перемешивания использовались магнитные мешалки с якорями. Герметичность конструкции обеспечивалась силиконовым герметиком

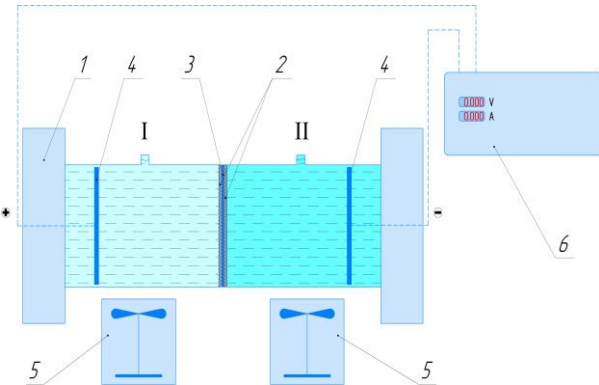


Рисунок 3. Экспериментальная электродезаппаратура: 1 – прижимная плита; 2 – зажимная решетка; 3 – мембрана; 4 – электрод; 5 – магнитная мешалка; 6 – лабораторный источник питания

Figure 3. Experimental electrodiffusion setup: 1 – pressure plate; 2 – clamping grid; 3 – membrane; 4 – electrode; 5 – magnetic stirrer; 6 – laboratory power source

Для исследований использовались анионо- и катионообменные мембраны МА-41П и МК-40Л. Характеристики мембран представлены в таблице 1. Модельные водные растворы содержали нитрат никеля ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с различными начальными концентрациями, имитирующими реальные промышленные стоки. Более подробно компонентный состав растворов представлен в таблице 2.

Таблица 1. Характеристики анионо- и катионообменных мембран

Характеристика Characteristics	Марка Mark	
	МК-40Л	МА-41П
Толщина, мм Thickness, mm	0,3–0,5	0,3–0,5
Ионная группа Ion group	($\text{SO}_3 \text{H}$)	$\text{N}(\text{CH}_3)$
Ионная форма – противоион Ionic form - counter ion	Na^+	Cl^-
Инертное связующее Inert binder	полиэтилен polyethylene	полиэтилен polyethylene
Армирующая ткань Reinforcing fabric	полиэфирная polyester	полиамидная polyamide

Таблица 2.
Характеристики исходных модельных растворов

Table 2.

Characteristics of the initial model solutions

Раствор Solution	Исходная концентрация C_0 , мг/л Initial C_0 concentration, mg/L	
	Ni^{2+}	NO_3^-
H1	40,0	84,5
H2	80,0	169,0
H3	120,0	253,5
H4	160,0	338,0

Перед началом серии экспериментальных исследований был проведен тщательный анализ литературных данных, в результате которого были выбраны оптимальные значения рабочих параметров экспериментов. Плотность тока варьировалась в диапазоне от 10 А/м² до 40 А/м². Средний расход разделяемого раствора в каждой секции был равен 300 л/ч, а исходный объем растворов – 5 л. Каждый отдельный эксперимент

проводился в течение 60 минут с обязательным отбором образцов растворов каждые 15 минут.

Результаты и обсуждение

Одним из важных этапов исследования было наблюдение за влиянием исходной концентрации никеля и плотности электрического тока на процесс очистки. Эта часть исследования позволила нам глубже понять, как повышение концентрации никеля в растворе и изменение плотности тока воздействуют на эффективность данного процесса.

На рисунке 4 представлены результаты серии экспериментальных исследований, полученных при электродиализном разделении модельных растворов H1, H2, H3 и H4. Получены кинетические зависимости концентрации C ионов Ni^{2+} , нормированной к исходной величине C_0 , в процессе ЭД-разделения при плотности тока 10, 20, 30 и 40 А/м².

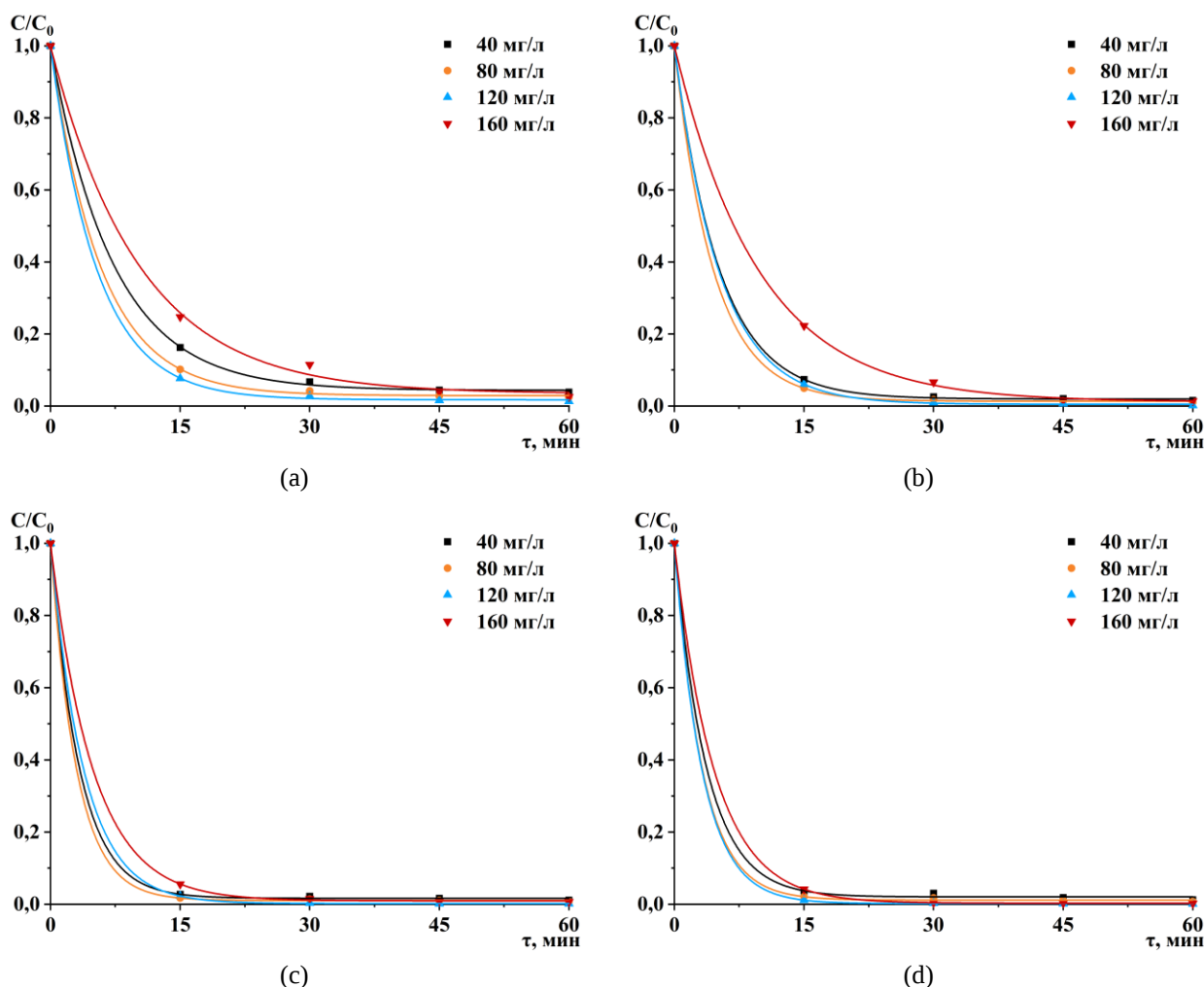


Рисунок 4. Кинетические зависимости концентрации C ионов Ni^{2+} , нормированной к исходной величине C_0 , от времени: (a) – 10 А/м²; (b) – 20; (c) – 30 А/м²; (d) – 40 А/м²

Figure 4. Kinetic dependences of the concentration C of Ni^{2+} ions, normalized to the initial value C_0 , on time: (a) – 10 А/м²; (b) – 20; (c) – 30 А/м²; (d) – 40 А/м²

Эксперименты по электродиализному разделению модельных водных растворов, содержащих $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, показали высокую эффективность метода. Степень очистки растворов в ряде случаев от катионов Ni^{2+} составила 98,5–99,3%, что демонстрирует потенциал электродиализа для применения в промышленных условиях. Было установлено, что при увеличении начальной концентрации никеля в растворе процесс очистки замедлялся. Так, в процессе разделения растворов Н1, Н2 и Н3 в большинстве экспериментов при всех плотностях тока кинетические зависимости от времени имели схожую форму и демонстрировали быстрое снижение концентрации ионов никеля. Однако при разделении растворов Н4 с увеличенной исходной концентрацией ионов Ni^{2+} процесс очистки проходил значительно медленнее [19–22]. Это может быть связано определенными факторами, которые влияют на эффективность технологии. Например, высокая концентрация ионов никеля в растворе может привести к перенасыщению и замедлению диффузии ионов к мембранам. Также на мембранах могут образовываться осадки, что приводит к их загрязнению, затрудняет движение ионов и в конечном итоге может потребовать более частой замены или очистки мембран. Эти данные подчеркивают важность оптимизации параметров процесса для обеспечения максимальной эффективности очистки при высоких концентрациях никеля.

Исследована эффективность разделения методом ЭД в течение одного часа при различных плотностях тока – от 10 А/м² до 40 А/м². На рисунке 4 представлены зависимости концентрации C ионов Ni^{2+} , нормированной к исходной величине C_0 , от плотности тока.

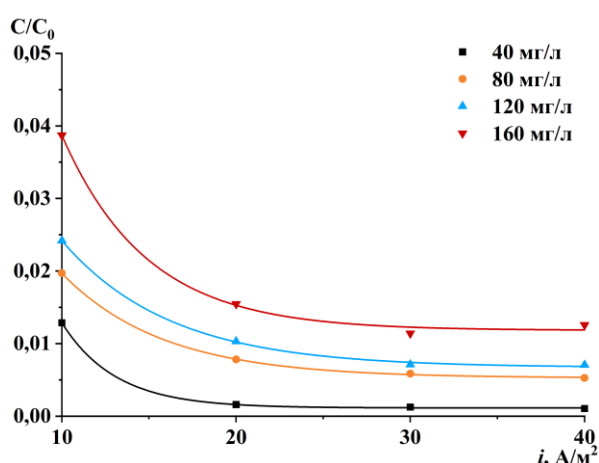


Рисунок 5. Зависимости концентрации C ионов Ni^{2+} , нормированной к исходной величине C_0 , от плотности тока после часового ЭД-процесса

Figure 5. Dependences of the concentration of Ni^{2+} ions C , normalized to the initial value C_0 , on the current density after an hour-long ED process

С увеличением плотности тока нормированные концентрации уменьшаются, что указывает на эффективное удаление ионов из раствора. Чем выше плотность тока, тем быстрее происходит этот процесс. Это связано с тем, что более высокая плотность тока приводит к усилению электролитических процессов, что, в свою очередь, позволяет более эффективно извлекать загрязняющие вещества. Более высокие начальные концентрации в большинстве экспериментов приводят к меньшему относительному снижению концентрации при той же плотности тока. Это может объясняться насыщением ионообменных мембран либо ограниченностью возможностей переноса ионов при повышенных концентрациях. Как видно на рисунке 4, после достижения плотности тока в 20 А/м² дальнейший прирост эффективности очистки оказывается несущественным по сравнению с увеличением энергозатрат на процесс при большей плотности тока. С последующим увеличением плотности тока затраты на электроэнергию растут пропорционально, однако при этом прирост очистки остаётся минимальным и становится экономически невыгодным. На основании упомянутых наблюдений можно сделать вывод, что оптимальным значением плотности тока для рассматриваемой системы является именно 20 А/м². Такая плотность тока обеспечивает баланс между высокой эффективностью удаления целевых веществ и приемлемыми затратами на электроэнергию, что делает его наиболее целесообразным для использования на практике.

На рисунке 6 рассмотрено влияние плотности тока и исходной концентрации раствора на электродиффузионную проницаемость мембраны МК-40Л для катионов Ni^{2+} .

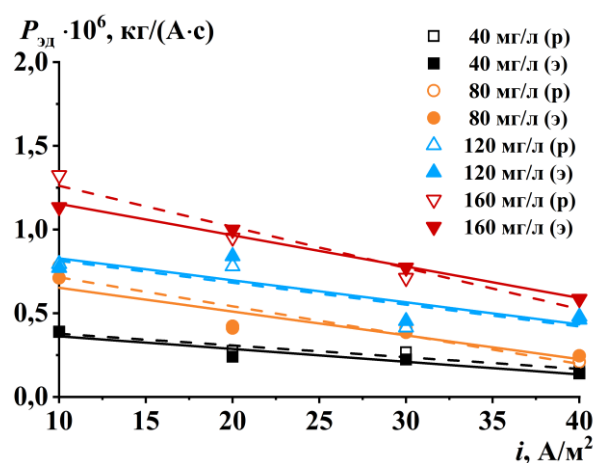


Рисунок 6. Зависимости электродиффузионной проницаемости мембраны МК-40Л для катионов Ni^{2+} от плотности тока при разной исходной концентрации C_0

Figure 6. Dependences of the electrodiffusion permeability of the MK-40L membrane for Ni^{2+} cations on the current density at different initial concentrations of C_0

Из данных видно, что электродиффузионная проницаемость мембраны МК-40Л для катионов Ni^{2+} уменьшается с увеличением плотности тока для всех концентраций раствора, что свидетельствует о снижении эффективности электродиффузионного переноса. Значения коэффициента электродиффузионной проницаемости $P_{\text{эд}}$ колеблются в диапазоне от $0,140 \times 10^{-6}$ до $1,324 \times 10^{-6}$ $\text{кг}/(\text{А} \times \text{с})$. Снижение его значений при увеличении плотности тока наблюдается для всех начальных концентраций растворов и составляет в среднем 55%. Это явление можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, увеличение плотности тока ведет к усилению градиента концентрации по обеим сторонам мембраны, что усложняет процесс массопереноса. Из-за возрастающего сопротивления переносу вещества электродиффузия постепенно замедляется. Во-вторых, высокая плотность тока может вызывать увеличение температуры раствора в области мембраны, что, в свою очередь, может приводить к изменению физико-химических свойств самой мембраны. Кроме того, снижение электродиффузионной проницаемости может быть связано с более интенсивным взаимодействием катионов с матрицей мембраны, что ограничивает свободное движение ионов.

Для подтверждения полученных экспериментальных данных был проведен теоретический расчет значений коэффициента электродиффузионной проницаемости $P_{\text{эд}}$. Его проводили на основе уравнения [23]:

$$P_{\text{эд}} = k C_0^n i^m \exp(C_0 g) \exp(A/T),$$

где k – эмпирический коэффициент, $\text{м}^5/(\text{А}^2 \cdot \text{с})$; C_0 – концентрация вещества в исходном растворе, $\text{кг}/\text{м}^3$; i – плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$; n, m – безразмерные эмпирические коэффициенты; g – эмпирический коэффициент, $\text{м}^3/\text{кг}$; A – эмпирический коэффициент, К; T – абсолютная температура раствора, К.

Экспериментальные и расчетные значения производительности близки друг к другу, что свидетельствует о хорошей корреляции между теоретическими предположениями и реальными результатами измерений. Тем не менее наблюдаются незначительные отклонения, особенно выраженные при высоких концентрациях и низких напряжениях, которые могут быть вызваны ошибками измерений и расчетов. В целом разница между экспериментальными и теоретически рассчитанными значениями не превышала 10%.

Практическое применение

Разработка и внедрение эффективных технологических схем – залог успешной работы мембранных систем очистки, способствующий как экономии ресурсов, так и охране окружающей среды. Эффективные схемы позволяют достигать более высокого уровня удаления

загрязняющих веществ, что обеспечивает безопасность и пригодность воды для различных нужд, а правильное проектирование уменьшает потребление энергии и ресурсов, что снижает общие расходы на эксплуатацию системы.

Технологическая схема процесса электродиализной очистки сточных вод, предлагаемая для гальванического производства, изображена на рисунке 7. Схема предназначена для электродиализной очистки кислых промышленных растворов, содержащих ионы никеля. Кислые промышленные растворы сначала собираются в накопительной емкости 1, после чего насосом 2 они подаются в аппарат для нейтрализации растворов 3. Затем, нейтрализованный раствор поступает в электродиализатор 4 для очистки от ионов никеля. Очищенный раствор (дилюат) направляется в резервуар 5 для хранения очищенной воды, который предполагается повторно использовать в процессе гальванического производства. Концентрат, содержащий большое количество никеля, отправляется в емкость 6 для последующего концентрирования или использования в строительном производстве.

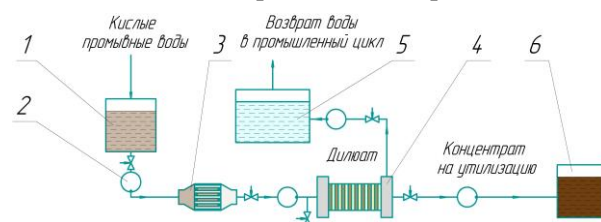


Рисунок 7. Технологическая схема разделения промышленных растворов с применением электродиализной очистки: 1 – емкость сбора кислых промывных вод; 2 – насос; 3 – аппарат нейтрализации растворов; 4 – электродиализатор; 5 – емкость сбора очищенной воды; 6 – емкость сбора растворов, подлежащих утилизации

Figure 7. Technological scheme of separation of industrial solutions using electrodiagnosis purification: 1 – tank for collecting acidic wash water; 2 – pump; 3 – solution neutralization apparatus; 4 – electrodiagnosis; 5 – tank for collecting purified water; 6 – tank for collecting solutions subject to disposal

Технологическая схема обладает высокой степенью адаптивности, позволяя оперативно реагировать на изменяющиеся производственные условия или прогнозируемый рост объемов обработки. Это достигается за счет модульной структуры, гибкой конфигурации параметров и возможности интеграции новых компонентов. Такая гибкость позволяет существенно увеличивать производительность системы, избегая при этом значительных капитальных вложений в новое оборудование или кардинальную перестройку всего процесса. Оптимизация отдельных узлов, перенастройка алгоритмов и масштабирование вычислительных ресурсов позволяют эффективно справляться с растущими потребностями и поддерживать конкурентоспособность предприятия.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Метод электродиализа является высокоэффективным для очистки водных растворов от ионов никеля, достигая степени очистки более 99%, при этом скорость удаления напрямую зависит от плотности тока. Это подтверждает возможность использования электродиализного метода для промышленной очистки растворов от тяжелых металлов. Было установлено, что скорость и эффективность очистки зависят от начальной концентрации никеля в растворе. При увеличении начальной концентрации процесс электродиализной очистки замедляется.

2. Для достижения максимальной производительности рассматриваемой системы рекомендуется использовать оптимальное значение плотности тока 20 А/м², которое обеспечивает баланс между высокой эффективностью удаления

целевых веществ и приемлемыми затратами на электроэнергию и делает процесс разделения наиболее целесообразным для использования на практике.

3. Предлагается технологическая схема очистки растворов от никеля с применением ЭД, где обессоленный раствор можно повторно использовать в процессе производства, а концентрат использовать для восстановления ценных компонентов или утилизации.

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 электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024-0011).

Литература

- 1 Xiang H., Min X., Tang C., Sillanpää M., Zhao F. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review // *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 49.
- 2 Juve J., Christensen F., Wang Y., Wei Z. Electrodialysis for metal removal and recovery: A review // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 435. No. 2.
- 3 Abdullah N., Rahman M.A., Othman M.H.D. et al. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2019. Vol. 76. Pp. 17–38. doi: 10.1016/j.jiec.2019.03.029
- 4 Шестаков К.В., Лазарев С.И., Полянский К.К., Игнатов Н.Н. Восстановление железа, никеля и меди из сточных вод производства печатных плат методом электродиализа // *Журнал прикладной химии*. 2021. Т. 94. № 5. С. 547–542.
- 5 Benvenuti T., Krapf R.S., Rodrigues M.A.S. et al. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 155. Pp. 130–138.
- 6 Шестаков К.В., Лазарев С.И., Крылов А.В., Лазарев Д.С., Ломакина О.В. Влияние исходной концентрации ионов металлов в многокомпонентных растворах на процесс электродиализной очистки // *Вестник Технологического университета*. 2023. Т. 26. № 3. С. 21–25.
- 7 Benvenuti T., Bernardes A.M., Rodrigues M.A.S. Electrodialysis treatment of nickel wastewater // *Electrodialysis and Water Reuse: Novel Approaches*. 2014. Pp. 133–144.
- 8 Нифталиев С.И., Козадрова О.А., Ким К.Б. Применение биполярного электродиализа с модифицированными мембранами при очистке хромсодержащих сточных вод гальванического производства // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 10. С. 4–9.
- 9 Бывшева О.С., Ильина С.И., Быков И.В. и др. Применение электрохимических методов очистки гальваносток // *Тенденции развития науки и образования*. 2020. № 65–2. С. 84–92.
- 10 dos Santos C.S.L., de Almeida Neto A.F., Vieira M.G.A. Electrodialysis for removal of chromium (VI) from effluent: Analysis of concentrated solution saturation // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019. Vol. 7. No. 5. Pp. 103380. doi: 10.1016/j.jece.2019.103380
- 11 Juve J.M.A., Christensen F., Wang Y., Wei Z. Electrodialysis for metal removal and recovery: A review // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 435. Pp. 134857.
- 12 Nemati M., Hosseini S.M., Shabanian M. Novel electrodialysis cation exchange membrane prepared by 2 acrylamido 2 methylpropane sulfonic acid; heavy metal ions removal // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 337. Pp. 90–104. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.074
- 13 Benalla S., Elazhar F., Zouahri A. et al. Feasibility of electrodialysis in heavy metals removal from brassware wastewaters // *Desalination and Water Treatment*. 2021. Vol. 240. Pp. 106–114.
- 14 Benvenuti T., Krapf R.S., Rodrigues M.A.S. et al. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 155. Pp. 130–138.
- 15 Yan K., Wei Y., Zhao S. et al. An efficient Two-Chamber Electrodeposition-Electrodialysis combination craft for nickel recovery and phosphorus removal from spent electroless nickel plating bath // *Separation and Purification Technology*. 2022. Vol. 295. Pp. 121283. doi: 10.1016/j.seppur.2022.121283
- 16 Wang C., Li Y., Liu X. et al. Removal of low concentrations of nickel ions in electroplating wastewater by combination of electrodialysis and electrodeposition // *Chemosphere*. 2021. Vol. 263. Pp. 128208 doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128208
- 17 Klishchenko R., Chebotarova R. Removal of nickel from electroplating wastewater by a combination of electrodialysis and electrodeposition // *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2023. Vol. 45. No. 4. Pp. 378–382.

- 18 Гонова В.А. Экспериментальное исследование очистки растворов от ионов никеля методом электродиализа // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2023. № 1 (73). С. 37–41.
- 19 Lv M., Zhang Y., Li Y. et al. Recovery of boron and zinc from wastewater via electrodialytic metathesis // Desalination. 2024. Vol. 586. Pp. 117900. doi: 10.1016/j.desal.2024.117900
- 20 Liu Y., Zhang H., Wang X. et al. Recovery of nickel, phosphorus and nitrogen from electroless nickel-plating wastewater using bipolar membrane electrodialysis // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 382. Pp. 135326.
- 21 Li Y., Wang J., Chen X. et al. A novel electrochemical membrane filtration system operated with periodical polarity reversal for efficient resource recovery from nickel nitrate laden industrial wastewater // Water Research. 2024. Vol. 266. Pp. 122424. doi: 10.1016/j.watres.2024.122424.
- 22 Чепеняк П.А., Головашин В.Л., Лазарев С.И. Электродиффузионная проницаемость ультрафильтрационных мембран в водных фосфатсодержащих растворах // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. № 8. С. 52–56.

References

- 1 Xiang H., Min X., Tang C., Sillanpää M., Zhao F. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. vol. 49. Art. 102951.
- 2 Juve J., Christensen F., Wang Y., Wei Z. Electrodialysis for metal removal and recovery: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2022. vol. 435. no. 2. Art. 134857.
- 3 Abdullah N., Yusof N., Lau W.J., Jaafar J., Ismail A.F. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2019. vol. 76. pp. 17-38. doi: 10.1016/j.jiec.2019.03.029
- 4 Shestakov K.V., Lazarev S.I., Polyansky K.K., Ignatov N.N. Recovery of iron, nickel and copper from wastewater from printed circuit board production by electrodialysis. *Journal of Applied Chemistry*. 2021. vol. 94. no. 5. pp. 547-552.
- 5 Benvenuti T., Krapf R.S., Rodrigues M.A.S., Bernardes A.M., Zoppas-Ferreira J. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis. *Journal of Cleaner Production*. 2017. vol. 155. pp. 130-138.
- 6 Shestakov K.V., Lazarev S.I., Krylov A.V., Lazarev D.S., Lomakina O.V. Influence of the initial concentration of metal ions in multicomponent solutions on the process of electrodialysis purification. *Bulletin of the Technological University*. 2023. vol. 26. no. 3. pp. 21-25. (in Russian)
- 7 Benvenuti T., Garcia-Gabaldon M., Perez-Herranz V., Rodrigues M.A.S., Bernardes A.M. Electrodialysis treatment of nickel wastewater. In: *Electrodialysis and Water Reuse: Novel Approaches*. 2014. pp. 133-144.
- 8 Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B. Application of bipolar electrodialysis with modified membranes in the treatment of chromium-containing wastewater from galvanic production. *Ecology and Industry of Russia*. 2021. vol. 25. no. 10. pp. 4-9. (in Russian)
- 9 Byvsheva O.S., Ilyina S.I., Bykov I.V. et al. Application of electrochemical methods for cleaning galvanic effluents. *Trends in the Development of Science and Education*. 2020. no. 65-2. pp. 84-92. (in Russian)
- 10 dos Santos C.S.L., de Almeida Neto A.F., Vieira M.G.A. Electrodialysis for removal of chromium (VI) from effluent: Analysis of concentrated solution saturation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019. vol. 7. no. 5. Art. 103380. doi: 10.1016/j.jece.2019.103380
- 11 Juve J.M.A., Christensen F., Wang Y., Wei Z. Electrodialysis for metal removal and recovery: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2022. vol. 435. Art. 134857.
- 12 Nemati M., Hosseini S.M., Shabanian M. Novel electrodialysis cation exchange membrane prepared by 2 acrylamido 2 methylpropane sulfonic acid; heavy metal ions removal. *Journal of Hazardous Materials*. 2017. vol. 337. pp. 90-104. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.074
- 13 Benalla S., Elazhar F., Tahaikt M., Elmidaoui A. Feasibility of electrodialysis in heavy metals removal from brassware wastewaters. *Desalination and Water Treatment*. 2021. vol. 240. pp. 106-114.
- 14 Benvenuti T., Krapf R.S., Rodrigues M.A.S., Bernardes A.M., Zoppas-Ferreira J. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis. *Journal of Cleaner Production*. 2017. vol. 155. pp. 130-138.
- 15 Yan K., Xue C., Liu Q., Wei L., Guo X., Liu C. An efficient Two-Chamber Electrodeposition-Electrodialysis combination craft for nickel recovery and phosphorus removal from spent electroless nickel plating bath. *Separation and Purification Technology*. 2022. vol. 295. Art. 121283. doi: 10.1016/j.seppur.2022.121283
- 16 Wang C., Wu Y., Bai L., Zhao Y., Yan L., Jiang Q. Removal of low concentrations of nickel ions in electroplating wastewater by combination of electrodialysis and electrodeposition. *Chemosphere*. 2021. vol. 263. Art. 128208. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128208
- 17 Klishchenko R., Chebotarova R. Removal of nickel from electroplating wastewater by a combination of electrodialysis and electrodeposition. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2023. vol. 45. no. 4. pp. 378-382.
- 18 Gonova V.A. Experimental study of cleaning solutions from nickel ions by electrodialysis. *Modern science-intensive technologies. Regional supplement*. 2023. no. 1(73). pp. 37-41. (in Russian)
- 19 Lv M., Chen N., Liu Y., Zhang W., Du X., Yang Y. Recovery of boron and zinc from wastewater via electrodialytic metathesis. *Desalination*. 2024. vol. 586. Art. 117900. doi: 10.1016/j.desal.2024.117900
- 20 Liu Y., Li X., Yan K., Ren Z., Wei L., Guo X. Recovery of nickel, phosphorus and nitrogen from electroless nickel-plating wastewater using bipolar membrane electrodialysis. *Journal of Cleaner Production*. 2023. vol. 382. Art. 135326.
- 21 Li Y., Wang Y., Li J., Wang L., Xu T. A novel electrochemical membrane filtration system operated with periodical polarity reversal for efficient resource recovery from nickel nitrate laden industrial wastewater. *Water Research*. 2024. vol. 266. Art. 122424. doi: 10.1016/j.watres.2024.122424
- 22 Chepenyak P.A., Golovashin V.L., Lazarev S.I. Electrodifusion permeability of ultrafiltration membranes in aqueous phosphate-containing solutions. *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*. 2012. vol. 55. no. 8. pp. 52-56. (in Russian)

Сведения об авторах

Валерия А. Семилетова ассистент, кафедра природопользования и защиты окружающей среды, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, semiletovatstu@gmail.ru

Константин В. Шестаков д.т.н., кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, kostyanshestakov@mail.ru

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

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, kaf-kit@vfreu.ru

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

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Valeria A. Semiletova assistant, nature management and environmental protection department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, semiletovatstu@gmail.ru

Konstantin V. Shestakov Dr. Sci. (Engin.), mechanics and engineering graphics department, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia, kostyanshestakov@mail.ru

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

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, management of socio-economic systems and business processes department, Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia, kaf-kit@vfreu.ru

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

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 02/03/2025	После редакции 09/04/2025	Принята в печать 29/05/2025
Received 02/03/2025	Accepted in revised 09/04/2025	Accepted 29/05/2025

Упаковочное покрытие на основе крахмала

Владислав А. Астахов	¹	astashik27v@mail.ru	 0009-0002-5462-0646
Марина И. Губанова	¹	gubanovami@mgupp.ru	 0000-0003-3547-716X
Али Я. Альхаир	¹	alkheerali@gmail.com	 0000-0002-9518-7781
Вячеслав А. Мерзляков	¹	sebastianvell1999@mail.ru	 0009-0002-9367-8947

¹ Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080 Россия

Аннотация. Антимикробные упаковочные покрытия на основе природных полимеров являются более безопасными по сравнению с традиционной упаковкой для использования в пищевой промышленности. Использование такого вида упаковки способно не только повлиять на улучшение экологии, за счет замены синтетических полимерных упаковок с длительным сроком разложения, но и может увеличивать срок хранения продуктов питания при введении в них антимикробных добавок. В статье представлено научное исследование по разработке упаковочного покрытия на основе крахмала с добавлением экстракта корня аира, обладающего антимикробными свойствами, предназначенного для пролонгации сроков хранения продуктов питания. Проведено исследование биополимерных композиций, в состав которых вводили картофельный крахмал, глицерин, уксусную кислоту, и, в качестве антимикробной добавки экстракт корня аира в количестве 0,5; 1 и 3%. Экстракт был выделен из порошка корня аира в лабораторном аппарате Сокслета. Диско-диффузным методом проведены исследования полученных образцов материалов на антимикробную активность по отношению к различным микроорганизмам. В качестве тест-культур использовались микроорганизмы кандиды альбиканс (*Candida albicans*), сенная палочка (*Bacillus subtilis*), кишечная палочка (*Escherichia coli*) и аспергиллус нигер (*A.Niger*). Антимикробную активность оценивали визуально и считали среднее значение зоны подавления по степени развития тест-культур относительно поверхности контрольных и модифицированных образцов материалов. В результате исследования выявлено, что полученный экстракт корня аира проявляет антимикробную активность, при введении в состав композиции упаковочного материала на основе крахмала экстракта из порошка корня аира происходит подавление контаминации микроорганизмов.

Ключевые слова: активная упаковка, пленка на основе крахмала, экстракт корня аира, антимикробная пленка, антимикробное покрытие.

Starch-based packaging coating with the addition of calamus root extract

Vladislav A. Astakhov	¹	astashik27v@mail.ru	 0009-0002-5462-0646
Marina I. Gubanova	¹	gubanovami@mgupp.ru	 0000-0003-3547-716X
Ali Y. Alkhair	¹	alkheerali@gmail.com	 0000-0002-9518-7781
Vyacheslav A. Merzlyakov	¹	sebastianvell1999@mail.ru	 0009-0002-9367-8947

¹ Russian Biotechnological University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080 Russia

Abstract. Antimicrobial packaging coatings based on natural polymers are safer than traditional packaging for use in the food industry. The use of this type of packaging can not only affect the improvement of the environment by replacing synthetic polymer packages with a long decomposition period, but can also increase the shelf life of food products when antimicrobial additives are introduced into them. The article presents a study on the development of a starch-based packaging coating with the addition of calamus root extract, which has antimicrobial properties and is intended to prolong the shelf life of food. A study was conducted of compounds containing potato starch, glycerin, acetic acid, and calamus root extract in amounts of 0.5%, 1%, and 3% as an antimicrobial additive. The extract was isolated from calamus root powder in a Soxhlet laboratory apparatus. The samples were tested for antimicrobial activity against various microorganisms using the disco-diffuse method. Antimicrobial activity was assessed visually and the average value of the suppression zone was calculated depending on the degree of development of the test cultures relative to the surface of the control and modified material samples. As a result of the study, it was revealed that when the extract from the calamus root is introduced into the packaging material, microbial contamination is suppressed.

Keywords: active packaging, starch-based film, calamus root extract, antimicrobial film, antimicrobial coating.

Введение

При упаковке различных продуктов питания важную роль играет безопасность упаковочных материалов и их свойства, которые в первую очередь влияют на срок годности продуктов при хранении и транспортировке. В современном пищевом производстве используются, в основном, упаковочные моно-либо многослойные материалы

из синтетических полимеров, которые за счет барьерных свойств могут продлевать сроки хранения продуктов питания. Однако из-за длительных сроков разложения синтетических полимерных материалов экологическая обстановка ухудшается в связи с загрязнением основных компонентов природной среды: атмосферы, почвы, поверхностных и подземных вод.

Для цитирования

Астахов В.А., Губанова М.И., Альхаир А.Я., Мерзляков В.А. Упаковочное покрытие на основе крахмала // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 143–149. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-143-149

For citation

Astakhov V.A., Gubanova M.I., Alkhair A.Ya., Merzlyakov V.A. Starch-based packaging coating with the addition of calamus root extract. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 143–149. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-143-149

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

Использование упаковочных материалов из природных полимеров, которые обладают способностью к биоразложению в короткие сроки, является перспективным, так как ведет к значительному улучшению экологии, уменьшив гигантский поток плохо перерабатываемого упаковочного материала [1, 2]. Таким образом, упаковка из природных полимеров, в том числе с антимикробными свойствами, набирает большую популярность и практическую применимость [3, 4]. В большинстве случаев в состав таких материалов и покрытий входит несколько природных полимеров, пластификатор в виде глицерина [5], а также добавки, в виде экстрактов и эфирных масел. В связи с этим разработка покрытий из природных полимеров с антимикробным эффектом является актуальным и перспективным направлением в пищевой отрасли, так как способствует увеличению сроков годности продуктов при хранении и транспортировке.

Для придания упаковочным пленкам и покрытиям на основе природных полимеров антимикробных свойств одним из перспективных способов является введение в состав натуральных антимикробных компонентов, таких как эфирные масла и различные экстракты. Эфирные масла содержат компоненты, которые являются противомикробными [6, 7]. По литературным данным, введение эфирных масел или экстрактов на основе природных полимеров в состав упаковочных пленок и покрытий позволяет улучшить физико-механические свойства [8], а также усовершенствовать упаковочный материал путем придания антимикробного действия [9], в результате увеличивается срок годности упакованных в данный материал продуктов за счет подавления патогенных микроорганизмов.

К достоинствам антимикробных покрытий можно отнести способность к предотвращению роста и размножения микроорганизмов на поверхности пищевых продуктов; обеспечение безопасности и увеличение сроков хранения продуктов; повышение качества продуктов, а к недостаткам – дополнительные затраты на производство и использование специальных добавок; возможное влияние на вкусовые качества продуктов; необходимость соблюдения определенных условий хранения и транспортировки для сохранения структуры упаковки, а также эффективности антимикробных свойств.

Одним из недорогих препаратов, используемых в фармацевтике растений, является корень аира. По литературным данным экстракт из корня аира имеет антимикробную активность по отношению к микроорганизмам *Lactobacillus*

acidophilus, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* [10, 11, 17]. Основными компонентами в экстракте корня аира являются: камфора, камфен, бутират α -терпинеола, акоренон, азарон [12, 13], а также β -кедрен [14, 15].

В фармацевтике корень аира применяется для изготовления лекарственных средств, например такого препарата, как «Стоматофит» (АО «Фитофарм Кленка», Польша) в состав которого входят различные растительные экстракты [16]. Также корень аира применяется для лечения широкого спектра воспалительных заболеваний различной этиологии [18, 19].

В пищевой промышленности эфирное масло аира используют в качестве антимикробной добавки с бактерицидными свойствами в рецептуре хлебобулочных изделий для улучшения пищевой ценности и физико-химических свойств хлеба [20].

Цель работы – разработка упаковочного покрытия на основе крахмала с использованием антимикробной добавки – экстракта корня аира (КА) для пролонгации сроков хранения пищевых продуктов.

Материалы и методы

Для получения образцов упаковочных покрытий были использованы следующие компоненты: картофельный крахмал, производитель ООО «ПЕЦ-ХААС» Россия, ГОСТР 53876–2010; глицерин, производитель ООО «ГЛИЦЕРИН СОЛЮШЕН» Россия, ГОСТ 6824–96; уксус столовый 9%, производитель ООО «БАСТИОН» Россия, ТУ 10.84.11–015–46896390–2005; аир корень (*Acorus calamus*), производитель ООО «Русские Корни» Россия, г. Бийск, ТУ 10.89.19. – 001–49786532–2021.

Определение антимикробных свойств экстракта корня аира и упаковочного покрытия проводили методом дисков (МУК 4.2.1890–04 Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам). В качестве тест-культур использовались микроорганизмы кандида альбиканс (*Candida albicans*), сенная палочка (*Bacillus subtilis*), кишечная палочка (*Escherichia coli*) и аспергиллус нигер (*A. Niger*).

Получение экстракта корня аира. Высушенный корень аира измельчали в порошок, помещали в фильтровальный пакет и проводили экстракцию в лабораторном аппарате Сокслета. Экстракция проводилась в течение 6 ч при температуре кипения растворителя, в качестве растворителя был использован этанол. Полученный экстракт корня аира сушили в сушильном шкафу при 40 °С до постоянной массы.

Изготовление покрытия с антимикробными свойствами. В дистиллированную воду вводили крахмал, глицерин, уксус и полученный экстракт КА с концентрацией 0,5–3%. Механически перемешивали исходные компоненты и нагревали полученный раствор на водяной бане при температуре $98 \pm 2^\circ\text{C}$ 5 минут. После нагревания раствор разливали в стеклянные формы и сушили пленки при комнатной температуре в течение 3 суток.

Результаты

На первом этапе эксперимента проводили исследования по выделению экстракта из корня айры и оценку его антимикробных свойств. Определение антимикробных свойств материалов проводили методом дисков. Антимикробную активность оценивали по зоне подавления тест-культур.

Время инкубирования составляло 24 часа, при температуре 36°C . Полученные результаты представлены на (рисунке 1).

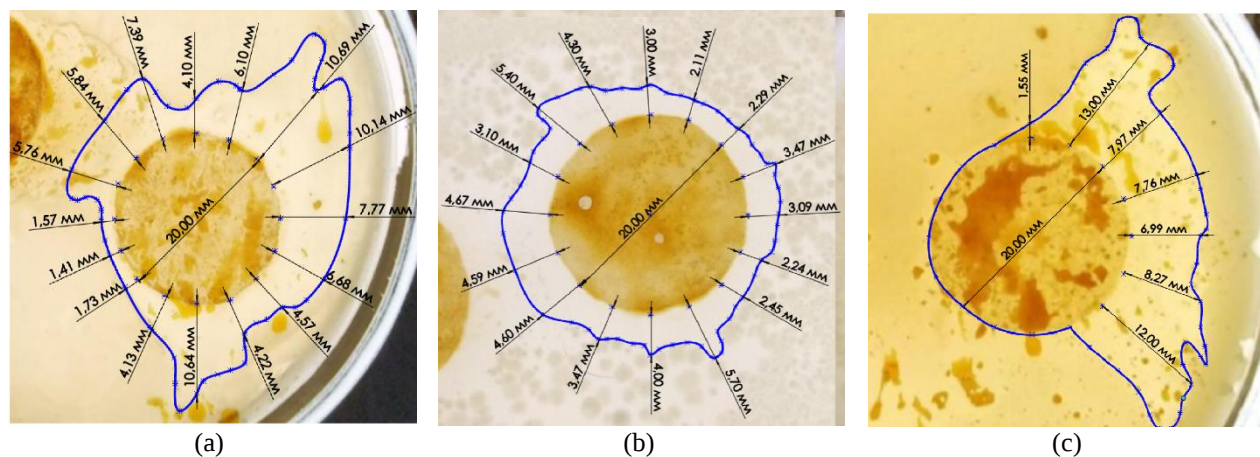


Рисунок 1. Определение антимикробных свойств экстракта корня айры, зона подавления по отношению к микроорганизмам: а) *Candida albicans* – среднее значение зоны подавления 5,8 мм; б) *Escherichia coli* – среднее значение зоны подавления 3,7 мм; в) *Bacillus subtilis* среднее значение зоны подавления 3,6 мм.

Figure 1. Determination of antimicrobial properties of calamus root extract, inhibition zone in relation to microorganisms: a) *Candida albicans* has an average suppression zone of 5.8 mm; b) *Escherichia coli* has an average suppression zone of 3.7 mm; c) *Bacillus subtilis* has an average suppression zone of 3.6 mm

На представленном рисунке 1 видно, что максимальная средняя зона подавления (5,8 мм) у экстракта корня айры по отношению к *Candida albicans*, по отношению к *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis* средняя зона подавления составила 3,7 и 3,6 мм соответственно.

На следующем этапе были получены биополимерные пленки на основе крахмала, контрольные и с экстрактом КА с концентрацией 0,5–3% (рисунк 2).

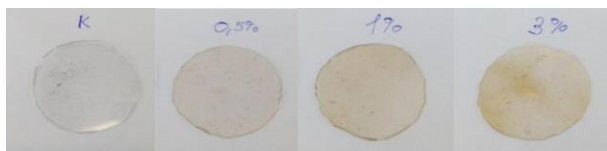


Рисунок 2. Биополимерные пленки на основе крахмала
Figure 2. Starch-based biopolymer films

Антимикробную активность оценивали визуально по степени развития тест-культур относительно поверхности контрольных и модифицированных материалов.

При визуальной оценке полученных пленок установлено, что с увеличением концентрации КА, пленка становится более интенсивного желтого цвета, а также на поверхности контрольных образцов происходит постепенный рост бактерий и грибов. При этом на поверхности образцов с экстрактом КА рост тест-культур незначительный, либо не наблюдается (рисунк 3, 4, 5).



Рисунок 3. Внешний вид пленок инокулированных с *Bacillus subtilis* в течение 24–72 ч: 1 – контроль, 2 – пленка с экстрактом КА 0,5%, 3 – пленка с экстрактом КА 1%, 4 – пленка с экстрактом КА 3%
Figure 3. Appearance of films inoculated with *Bacillus subtilis* for 24–72 hours: 1 – control, 2 – film with 0.5% KA extract, 3 – film with 1% KA extract, 4 – film with 3% KA extract



Рисунок 4. Внешний вид пленок инокулированных с *Candida albicans* в течение 24–72 ч: 1 – контроль, 2 – пленка с экстрактом КА 0,5%, 3 – пленка с экстрактом КА 1%, 4 – пленка с экстрактом КА 3%

Figure 4. Appearance of films inoculated with *Candida albicans* for 24–72 hours: 1 – control, 2 – film with 0.5% KA extract, 3 – film with 1% KA extract, 4 – film with 3% KA extract

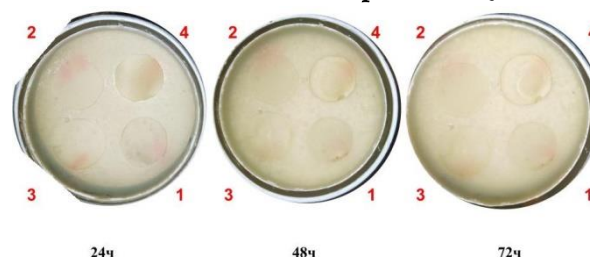


Рисунок 5. Внешний вид пленок инокулированных с *Escherichia coli* в течение 24–72 ч: 1 – контроль, 2 – пленка с экстрактом КА 0,5%, 3 – пленка с экстрактом КА 1%, 4 – пленка с экстрактом КА 3%

Figure 5. Appearance of films inoculated with *Escherichia coli* for 24–72 hours: 1 – control, 2 – film with 0.5% KA extract, 3 – film with 1% KA extract, 4 – film with 3% KA extract%

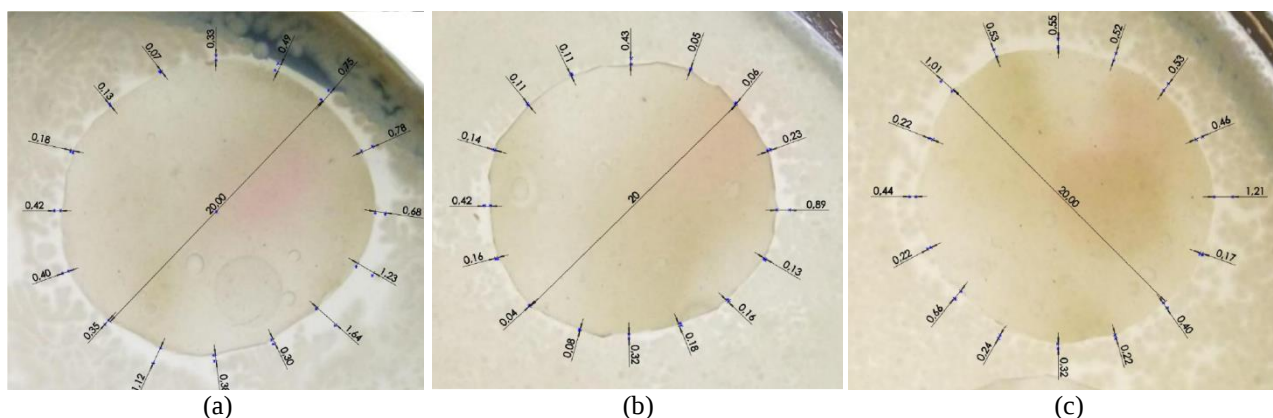


Рисунок 6. Антимикробная активность образцов материала с концентрацией 3% экстракта корня айры в течение 24 ч: а) *Candida albicans* – среднее значение зоны подавления 0,57 мм; б) *Escherichia coli* – среднее значение зоны подавления 0,21 мм; в) *Bacillus subtilis* среднее значение зоны подавления 0,48 мм

Figure 6. Antimicrobial activity of material samples with a concentration of 3% calamus root extract for 24 hours: a) *Candida albicans* – the average value of the suppression zone is 0.57mm; b) *Escherichia coli* – the average value of the suppression zone is 0.21mm; c) *Bacillus subtilis* – the average value of the suppression zone is 0.48mm

Проведенные исследования показали, что контрольные образцы без экстракта КА не обладают антимикробными свойствами; повышение концентрации экстракта КА в материале повышает его антимикробные свойства, образцы материала с концентрацией 3% экстракта КА, показали наилучшую антимикробную активность в течение 24 ч (рисунок 6).

При визуальной оценке установлено, что на поверхности контрольных образцов происходит рост бактерий, на поверхности образцов с экстрактом КА рост тест-культур замедляется, а при повышении концентрации экстракта КА до 3% роста тест-культуры не наблюдается, то есть указанные модифицированные образцы проявляют бактериостатические и фунгистатические свойства.

На (рисунке 7) представлены фото образцов пленок инкубированных *A. Niger* в течение 72 ч и 168 ч.

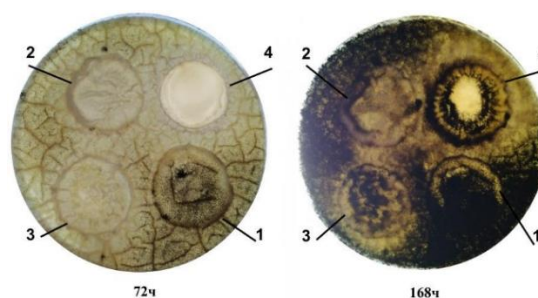


Рисунок 7. Внешний вид пленок инкубированных с *Aspergillus niger* в течение 72 ч и 168 ч: 1 – контрольный образец без антимикробной добавки; 2 – образец с концентрацией экстракта корня айры 0,5%; 3 – образец с концентрацией экстракта корня айры 1%; 4 – образец с концентрацией экстракта корня айры 3%

Figure 7. Appearance of films incubated with *Aspergillus niger* for 72 hours and 168 hours: 1 – control sample without antimicrobial additive; 2 – sample with 0.5% calamus root extract concentration; 3 – sample with 1% calamus root extract concentration; 4 – sample with 3% calamus root extract concentration

На представленном рисунке 7 видно, что на поверхности контрольных образцов материалов наблюдается наиболее интенсивный рост тест-культуры. У образцов с концентрацией экстракта КА 0,5 и 1% интенсивность роста тест-культуры ниже по сравнению с контрольным образцом. У образца с концентрацией экстракта КА 3% рост тест-культуры на поверхности полностью отсутствует через 72 часа. Через 168 часов у контрольного образца и у образцов с концентрацией экстракта КА 0,5 и 1% наблюдается полное зарастание поверхности тест-культурой, а у образца материала с концентрацией экстракта 3% поверхность заросла тест-культурой на 50–60%.

Заключение

Исследование доказало, что полученный экстракт корня аира проявляет антимикробную активность, а также придает образцам на основе крахмала бактериостатические и фунгистатические свойства. Данный экстракт показал

максимальный антимикробный эффект по отношению к *Candida albicans* со средней зоной подавления 5,8 мм. Использование экстракта корня аира в упаковочных покрытиях из природных полимеров с различными концентрациями 0,5%; 1%; 3% обладают антимикробной активностью по отношению к тест-культурам микроорганизмов. Проведенные эксперименты показали способность материала с концентрацией 3% экстракта КА к подавлению тест-культур микроорганизмов *Candida albicans*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*. А также данный образец проявил фунгистатические свойства по отношению к *Aspergillus niger* в течение 72 ч. В результате исследования было доказано, что экстракт корня аира в упаковочных покрытиях на основе крахмала может быть использован в качестве добавки для создания упаковочных покрытий, способных продлить срок годности пищевых продуктов за счет подавления роста микроорганизмов.

Литература

- 1 Ravichandran S., Jasim A., Rahul T. et al. Starch-based edible packaging: rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties - a review // Sustainable Food Technology. 2024. Vol. 2. P. 307-330. doi: 10.1039/D3FB00211J
- 2 Цатуров А.В., Потороко И.Ю., Кади А.М.Я. и др. Биоразлагаемые экопленки на основе органического сырья с активными компонентами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. № 3. С. 40-47.
- 3 Ashish T., Anurag T., Santosh K. et al. Perspectives for polymer-based antimicrobial films in food packaging applications // Nanobiotechnology for Food Processing and Packaging. 2024. P. 323-366. doi: 10.1016/B978-0-323-91749-0.00024-1
- 4 Бурак Л.Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 91-105.
- 5 Zhu Y.B., Hayati S., Mohd F.Y. Glycerol: Its properties, polymer synthesis, and applications in starch based films // European Polymer Journal. 2022. Vol. 175. 111377. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111377
- 6 El-Baky R.M.A., Shawky Z. Eugenol and linalool: Comparison of their antibacterial and antifungal activities // African Journal of Microbiology Research. 2016. Vol. 10. № 44. P. 1860-1872. doi: 10.5897/AJMR2016.8283
- 7 Аверьянова Е.В., Школьников М.Н., Павлова Н.В. и др. Микронизация в технологии минорного компонента консервирующего действия // Техника и технология пищевых производств. 2024. № 3. С. 508-521. doi: 10.21603/2074-9414-2024-3-2515
- 8 Sharma S., Barkauskaite S., Jaiswal A.K. et al. Essential oils as additives in active food packaging // Food Chemistry. 2021. Vol. 343. 128403. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128403
- 9 Альхаир А., Щукина Е.А., Губанова М.И. и др. Разработка и исследование активного упаковочного материала на основе крахмала с использованием в качестве антимикробной добавки натуральное эфирное масло // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 4. С. 16-31. doi: 10.36107/spfp.2023.4.474
- 10 Сибирцев В.С., Нечипоренко У.Ю., Кабанов В.Л. и др. Методика электрохимического микробиологического тестирования в применении к сравнительному анализу свойств различных растительных экстрактов // Журнал СФУ. Биология. 2023. № 1. С. 109-124.
- 11 Каурова З.Г., Умеренкова М.В. Антимикробная активность спиртовых экстрактов растений семейства бобовых // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1-2(115). С. 19-22.
- 12 Зыкова И.Д., Ефремов А.А., Наймушина Л.В. Антирадикальная активность отдельных фракций эфирного масла корней аира болотного // Химия растительного сырья. 2020. № 2. С. 73-78.
- 13 Дадаев Х.А., Акилов Д.Х., Нурмухамедова Р.А. Аир болотный, применение в медицине // Биология и интегративная медицина. 2021. № 1. С. 218-232.
- 14 Рязанова Т.К., Куркин В.А. Актуальные вопросы стандартизации лекарственного растительного сырья и фармацевтических субстанций растительного происхождения, содержащих эфирные масла // Вестник Научного центра экспертизы средств медицинского применения. 2023. Т. 13. № 2. С. 146-153.
- 15 Кароматов И.Д., Тогбоев К.Т., Жамилов Н.А. Аир болотный - перспективное лекарственное растение // Биология и интегративная медицина. 2021. № 1(48). С. 264-295.
- 16 Жердева Г.В., Галкина О.П., Полещук О.Ю. Применение препарата «Стоматофит» при лечении гингивита у детей с экзогенно-конституционным ожирением // Вестник физиотерапии и курортологии. 2019. № 1. С. 64-67.

17 Beata O., Magdalena B. Is it safe to use *Acorus calamus* as a source of promising bioactive compounds in prevention and treatment of cardiovascular diseases // *Chemico-Biological Interactions*. 2018. Vol. 281. P. 32-36. doi:10.1016/j.cbi.2017.12.026

18 Небезина А.В., Фадеева Т.В. Антимикробный потенциал йодсодержащих веществ и материалов // *Acta Biomedica Scientifica*. 2023. Т. 8. № 5. С. 36-49.

19 Иванова Т.Н., Симоненкова А.П., Евдокимов Н.С. Обоснование рецептурного компонента растений при производстве продуктов функционального питания // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2024. № 2. С. 5-11.

20 Зимняков В.М., Гарькина П.К. Использование растительных ингредиентов для повышения потребительских свойств хлебобулочных изделий // *Инновационная техника и технология*. 2023. Т. 10. № 1. С. 24-27.

References

1 Ravichandran S., Jasim A., Rahul T., Preetam S. Starch-based edible packaging: rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties. *Sustainable Food Technology*. 2024. vol. 2. pp. 307–330. doi:10.1039/D3FB00211J

2 Tsaturov A.V., Potoroko I.Y., Kadi A.M.Y., Shemek M., Malinin A.V. Biodegradable eco-films based on organic raw materials with active components. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2023. no. 3. pp. 40–47. (in Russian)

3 Ashish T., Anurag T., Santosh K., Shaline S., PK D. Perspectives for polymer-based antimicrobial films in food packaging applications. *Nanobiotechnology for Food Processing and Packaging*. 2024. pp. 323–366. doi:10.1016/B978-0-323-91749-0.00024-1

4 Burak L.Ch. Review of the development of biodegradable packaging materials for the food industry. *Polzunovsky vestnik*. 2023. no. 1. pp. 91–105. (in Russian)

5 Zhu Y.B., Hayati S., Mohd F.Y. Glycerol: Its properties, polymer synthesis, and applications in starch based films. *European Polymer Journal*. 2022. vol. 175. p. 111377. doi:10.1016/j.eurpolymj.2022.111377

6 El-Baky R.M.A., Shawky Z. Eugenol and linalool: Comparison of their antibacterial and antifungal activities. *African Journal of Microbiology Research*. 2016. vol. 10. no. 44. pp. 1860–1872. doi:10.5897/AJMR2016.8283

7 Averyanova E.V., Shkolnikova M.N., Pavlova N.V., Rozhnov E.D. Micronization in technology of a minor component of preservative action. *Technique and technology of food production*. 2024. no. 3. pp. 508–521. doi:10.21603/2074-9414-2024-3-2515 (in Russian)

8 Sharma S., Barkauskaite S., Jaiswal A.K., Jaiswal S. Essential oils as additives in active food packaging. *Food Chemistry*. 2021. vol. 343. p. 128403. doi:10.1016/j.foodchem.2020.128403

9 Alkhair A., Shchukina E.A., Gubanova M.I., Kirsh I.A., Ermilova A.M. Development and research of an active starch-based packaging material using natural essential oil as an antimicrobial additive. *Storage and processing of agricultural raw materials*. 2023. no. 4. pp. 16–31. doi:10.36107/spfp.2023.4.474 (in Russian)

10 Sibirtsev V.S., Nechiporenko U.Y., Kabanov V.L., Kukin M.Y., Radin M.A. Methodology of electrochemical microbiological testing in application to comparative analysis of properties of various plant extracts. *Journal of SibFU, Biology*. 2023. no. 1. pp. 109–124. (in Russian)

11 Kaurova Z.G., Umerenkova M.V. Antimicrobial activity of alcohol extracts of plants of the legume family. *International scientific research journal*. 2022. no. 1-2(115). pp. 19–22. (in Russian)

12 Zyкова I.D., Efremov A.A., Naimushina L.V. Antiradical activity of individual fractions of essential oil of *calamus* roots of the marsh. *Chemistry of vegetable raw materials*. 2020. no. 2. pp. 73–78. (in Russian)

13 Dadaev H.A., Akilov D.H., Nurmukhamedova R.A. Air bolotny, application in medicine. *Biology and integrative medicine*. 2021. no. 1. pp. 218–232. (in Russian)

14 Ryazanova T.K., Kurkin V.A. Actual issues of standardization of medicinal plant raw materials and pharmaceutical substances of plant origin containing essential oils. *Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertizy sredstv meditsinskogo primeneniya*. 2023. vol. 13. no. 2. pp. 146–153. (in Russian)

15 Karomatov I.D., Togboev K.T., Shamilov N.A. Air bolotny promising medicinal plant (literature review). *Biology and integrative medicine*. 2021. no. 1(48). pp. 264–295. (in Russian)

16 Zherdeva G.V., Galkina O.P., Poleschuk O.Y. The use of the drug "Stomatophyte" in the treatment of gingivitis in children with exogenous constitutional obesity. *Bulletin of Physiotherapy and Balneology*. 2019. no. 1. pp. 64–67. (in Russian)

17 Beata O., Magdalena B. Is it safe to use *Acorus calamus* as a source of promising bioactive compounds in prevention and treatment of cardiovascular diseases? *Chemico-Biological Interactions*. 2018. vol. 281. pp. 32–36. doi:10.1016/j.cbi.2017.12.026

18 Nevezhina A.V., Fadeeva T.V. Antimicrobial potential of iodine-containing substances and materials. *Acta Biomedica Scientifica*. 2023. vol. 8. no. 5. pp. 36–49. (in Russian)

19 Ivanova T.N., Simonenkov A.P., Evdokimov N.S. Substantiation of the prescription component of plants in the production of functional nutrition products. *Bulletin of the South Ural State University Food and Biotechnology*. 2024. no. 2. pp. 5–11. (in Russian)

20 Zimnyakov V.M., Garkina P.K. Use of plant ingredients to improve consumer properties of bakery products. *Innovative technique and technology*. 2023. vol. 10. no. 1. pp. 24–27. (in Russian)

Сведения об авторах

Владислав А. Астахов аспирант, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080 Россия, astashik27v@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-5462-0646>

Марина И. Губанова к.т.н., доцент, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080 Россия, gubanovami@mgupp.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3547-716X>

Али Я. Альхаир ассистент, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080 Россия, alkheerali@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9518-7781>

Вячеслав А. Мерзляков аспирант, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080 Россия, sebastianvell1999@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-9367-8947>

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

Vladislav A. Astakhov graduate student, Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Russian Biotechnological University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080, Russia, astashik27v@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-5462-0646>

Marina I. Gubanova Ph.D. assistant professor, Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Russian Biotechnological University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080, Russia, gubanovami@mgupp.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3547-716X>

Ali Y. Alkhair Ass. Prof., Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Russian Biotechnological University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080, Russia, alkheerali@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9518-7781>

Vyacheslav A. Merzlyakov graduate student, Department of Industrial Design, Packaging Technology and Expertise, Russian Biotechnological University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080, Russia, sebastianvell1999@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-9367-8947>

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 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2025
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2025

Термодинамика скрытой маркировки упаковки из прозрачной термоусадочной пленки

Валерий Ю. Конюхов	¹	volkon_1@mail.ru	 0000-0002-6128-9413
Александр А. Николаев	²	a.a.nikolaev@mospolytech.ru	 0000-0003-3232-6753
Алёна А. Прихожая	²	lekalena03@gmail.com	 0009-0004-3424-6428
Вячеслав К. Долгонос	²	dolgonosov@inbox.ru	 0009-0000-9962-6211
Александр П. Кондратов	²	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

1 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31 г. Москва, 115409, Россия

2 Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия

Аннотация. Описаны оптические свойства, двойное лучепреломление и эффект плеохроизма в многослойных покрытиях и пластиковой упаковке, изготовленной из поливинилхлорида отечественного производства. Плеохроизм плёнок наиболее интенсивно проявляется в потоке света, проходящего сквозь несколько слоёв плёнки, и имеет широкий диапазон цвета при комбинации в материалах для гибкой прозрачной упаковки нескольких слоёв термоусадочной плёнки поливинилхлорида и двуосноориентированной плёнки изотактического полипропилена. Установлено, что цвет нескольких слоёв термоусадочной плёнки поливинилхлорида в проходящем поляризованном свете изменяется при воздействии органических растворителей. Это явление предложено использовать для скрытой маркировки упаковки или этикетки и борьбы с контрафактным производством товаров массового потребления, реализуемого населению в торговой сети магазинов. Экспериментально обосновано оптимальное количество слоёв прозрачной полимерной плёнки для достижения заметности защитной маркировки и возможности идентификации товара по товарному знаку или с использованием штрихового кода. Цветовое различие многослойных плёнок поливинилхлорида до и после обработки летучим растворителем достигает 35 единиц при двух и более слоях, обуславливает яркий цвет товарного знака и/или достаточный контраст кода, применяемого для скрытой маркировки упаковки или этикетки, выявляемых в поляризованном свете. Показано применение критерия Флори-Хаггинса для количественной оценки изменения цвета пакета плёнок поливинилхлорида под действием органических растворителей. Измерены величины модуля упругости, кинетика и степень максимального набухания пленки поливинилхлорида в 10 органических жидкостях различного химического строения. Изменение прозрачности и цвета маркировки пакета плёнок поливинилхлорида тем быстрее, чем меньше значения критерия Флори-Хаггинса.

Ключевые слова: полимерные пленки, растворители, набухание, цвет, маркировка товаров, упаковка, поливинилхлорид, защита от подделки, плеохроизм, двойное лучепреломление, критерий Флори-Хаггинса.

Thermodynamics of hidden labeling of transparent shrink film packaging

Valery Yu. Konyukhov	¹	volkon_1@mail.ru	 0000-0002-6128-9413
Alexander A. Nikolaev	²	a.a.nikolaev@mospolytech.ru	 0000-0003-3232-6753
Alyona A. Prihozhaya	²	lekalena03@gmail.com	 0009-0004-3424-6428
Vyacheslav K. Dolgonosov	²	dolgonosov@inbox.ru	 0009-0000-9962-6211
Alexander P. Kondratov	²	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

1 National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse, 31 Moscow, 115409, Russian Federation

2 Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation

Abstract. Optical properties, birefringence and the effect of pleochroism in multilayer coatings and plastic packaging made of polyvinyl chloride of domestic production are described. Film pleochroism is most intensely manifested in the flux of light passing through several layers of film and has a wide range of colors when several layers of polyvinyl chloride shrink film are combined in materials for flexible transparent packaging and biaxially oriented isotactic polypropylene film. It has been established that the color of several layers of polyvinyl chloride shrink film in transmitted polarized light changes under the influence of organic solvents. This phenomenon is proposed to be used for hidden marking of packaging or labels and combating counterfeit production of consumer goods sold to the public in a retail network of stores. achieving the visibility of security marking and the ability to identify goods by trademark or using a bar code. The color difference between multilayer films of polyvinyl chloride before and after treatment with a volatile solvent reaches 35 units with two or more layers, determines the bright color of the trademark and/or sufficient contrast of the code used for hidden marking of packaging or labels detected in polarized light. The application of the Flory-Huggins criterion for quantitative assessment of color change in a package of polyvinyl chloride films under the influence of organic solvents is shown. The values of the modulus of elasticity, kinetics and the degree of maximum swelling of the polyvinyl chloride film in 10 organic liquids of various chemical structure are measured Flory-Huggins.

Keywords: polymer films, solvents, swelling, color, labeling of goods, packaging, polyvinyl chloride, anti-counterfeiting, pleochroism, double refraction, Flory-Huggins criterion.

Для цитирования

Конюхов В.Ю., Николаев А.А., Прихожая А.А., Долгонос В.К., Кондратов А.П. Термодинамика скрытой маркировки упаковки из прозрачной термоусадочной пленки // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 150–157. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-150-157

For citation

Konyukhov V.Yu., Nikolaev A.A., Prihozhaya A.A., Dolgonosov V.K., Kondratov A.P. Thermodynamics of hidden labeling of transparent shrink film packaging. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 150–157. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-150-157

Введение

Прогнозирование способности жидкости проникать в структуру полимерной пленки при вытяжке в жидкой среде необходимо для успешного целенаправленного выбора компонентов для скрытой оптической маркировки прозрачной упаковки по запатентованной технологии [1]. Эффект поглощения жидкой среды термоусадочной полимерной пленкой составляет часть одновременно протекающих процессов изменения размеров, механических свойств и структуры полимеров при наличии внешнего или внутреннего (усадка) механического напряжения, поэтому для его описания и прогнозирования правомерно использовать основные закономерности физико-химической механики полимеров [2,3]. Центральным вопросом прогнозирования физико-химической стойкости полимерных материалов является связь механических и оптических свойств полимеров с физико-химическими параметрами контактирующей среды.

В физико-химической механике сформировалось два основных подхода к объяснению влияния физически активных жидкостей на процессы деформирования и разрушения полимеров: адсорбционный, локально-пластификационный. Наибольшее распространение получил адсорбционный подход [4,5], согласно которому активность жидкой среды по отношению к деформируемому полимеру определяется способностью молекул жидкости адсорбироваться на вновь образующихся поверхностях растягиваемого полимерного тела в микротрещинах и снижать их поверхностную энергию. Сущность локально-пластификационного подхода заключается в постулировании определяющего влияния локальной пластификации или растворения микрзоны полимера в вершине растущей трещины (дефекта) проникающей жидкой средой на механические свойства всего полимерного тела.

В рамках пластификационного подхода в дополнение к многочисленным данным, описанным в [3], следует остановиться на результатах систематического изучения механических и сорбционных свойств полиэтилентерефталатных пленок, деформируемых с постоянной скоростью, в контакте с органическими жидкостями, приведенных в [6] и [7]. В качестве жидких сред были выбраны производные бензола как жидкости, молекулы которых подобны фрагментам макромолекулы полиэтилентерефталата. Авторы анализировали связь прочности и относительного удлинения пленок, определяемых в режиме вытяжки с постоянной скоростью деформации, с молярным объемом, вязкостью и параметром растворимости жидкой среды,

а также с равновесной степенью набухания полиэтилентерефталата (ПЭТФ) в исследуемой жидкости. По изменению механических свойств полимерных пленок жидкости были условно разделены на три группы.

Первую составляют малополярные жидкости с относительно большим молярным объемом и сравнительно малой вязкостью: толуол; о-, м-, п-ксилолы; п-цимол. При механических испытаниях полиэтилентерефталатных пленок в этих средах в условиях одновременного введения жидкости в контакт с образцом и начала растяжения наблюдается значительное – примерно двукратное – снижение его прочности, а также увеличение удлинения до разрыва более чем в 3 раза по сравнению со значениями, получаемыми при испытании на воздухе. При растяжениях в жидкости на поверхности образца возникает множество крейзов. Фрактограммы разрушения и форма деформационных кривых пленок позволяют утверждать, что жидкости первой группы переводят полимер из стеклообразного состояния в высокодисперсное ориентированное состояние.

Ко второй группе относят жидкости, при испытании в которых не только прочность пленок, но и удлинение до разрыва уменьшаются примерно в $2\div 2,5$ раза по сравнению с их уровнем на воздухе. К этим жидкостям относятся бензол и его галогенпроизводные. Разрушение в этих средах является следствием быстрого развития одной трещины. Очевидно, при использованной авторами скорости растяжения пленок в средах второй группы в полиэтилентерефталате не успевают протекать релаксационные процессы, и разрушение имеет хрупкий характер.

Третью группу составляют среды, при испытании в которых прочность и удлинение ПЭТФ либо незначительно уменьшаются, либо практически не изменяются. К этой группе относятся полярные жидкости, характеризующиеся сравнительно большим дипольным моментом молекул и повышенной вязкостью. В жидких средах третьей группы ПЭТФ сильно и быстро набухает, особенно в тех, которые не вызывают снижения его прочности при испытании с постоянной скоростью растяжения сразу после возникновения контакта жидкости с пленкой.

Для количественного описания сорбции жидкостей и диффузионных процессов в полимерах принято использовать три основных параметра экспериментально определяемых независимыми методами: коэффициент диффузии D , коэффициент проницаемости P и коэффициент растворимости S . Эти параметры связаны между собой известным соотношением [8].

$$P = D \cdot S \quad (1)$$

Для прогнозирования процессов проникания жидкости в полимер по механизму активированной диффузии расчетным путем используют параметр растворимости Гильдебранда (δ) полимера и жидкости [9].

Параметр растворимости (δ) определяется экспериментально по величине энергии когезии равной энтальпии испарения жидкости (ΔE_{ev}) и используется в теории растворов полимеров для прогнозирования совместимости высокомолекулярных и низкомолекулярных органических веществ (2).

$$\delta = \left(\frac{\Delta E_{ev}}{V} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Для количественно оценки термодинамических условий сорбции и скорости диффузионных процессов используют Критерий Флори-Хаггинса (χ), который позволяет оценить термодинамическую совместимость полимера и растворителя, определяя, будет ли образовываться истинный раствор при их совмещении или система останется двухфазной дисперсией [10–12].

Процесс поглощения жидкости полимерами определяемый по критерию Флори-Хаггинса может иметь несколько термодинамических состояний: $\chi < 0,5$ – растворитель термодинамически хороший и полимер способен неограниченно набухать; $\chi > 0,5$ – растворитель плохой, полимер не набухает или сорбируется медленно и в ничтожных количествах.

Критерий Флори-Хаггинса χ можно рассчитать по формуле Флори-Ренера [13]:

$$\ln(1 - \Phi_E) + \Phi_E + \chi \Phi_E^2 + Z^1 \Phi_E^{\frac{1}{3}} = 0 \quad (3)$$

$$\chi = \frac{-\ln(1 - \Phi_E) + \Phi_E + Z^1 \Phi_E^{\frac{1}{3}}}{\Phi_E^2} \quad (4)$$

где Φ_E – объемная доля полимера в его равновесном состоянии:

$$\Phi_E = \frac{W_0}{W_1} \quad (5)$$

где W_0 – исходный объем полимера в мм³, W_1 – конечный его объем в мм³.

$$Z = \frac{V_2}{V_1} \quad (6)$$

где Z – безразмерный параметр, равный отношению молярного объема субцепей полимера V_2 к молярному объему растворителя V_1 .

$$V_2 = RTE^{-1} \Phi_E^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

где R – универсальная газовая постоянная, E – модуль упругости набухшего полимера.

$$V_1 = \frac{M}{\rho} \quad (8)$$

где M – молярная масса растворителя г/моль, ρ – плотность растворителя г/см³.

Объекты исследования

Термоусадочные пленки поливинилхлорида отечественных и зарубежных производителей: АО «Дон-полимер», толщиной 70 ± 10 мкм, «Dongil Chemical», толщиной $50 \pm 3,5$ мкм, «Klockner Pentaplast», толщиной 45 ± 5 мкм. Растворители, входящие в состав печатных полиграфических красок [14–15]: 1,2 дихлорэтан, ацетон; диоксан; о-ксилол; этилацетат; бутилацетат.

Поляризационные пленки NPF F1205DU (Япония), поляризационные стеклянные фильтры [16].

Полиграфические секции машин и принтеров струйной печати марки Epson DX6, Epson i3200 E1 и Seiko SPT510/35 с головками [17].

Результаты и их обсуждение

Многослойные прозрачные и бесцветные термоусадочные пленки поливинилхлорида приобретают в поляризованном свете различную окраску, определяющуюся числом и толщиной слоев [18]. Координаты цвета пакета пленок в цветовом пространстве [19, 20] (окраска в проходящем и отраженном поляризованном свете) значительно изменяются при воздействии растворителей на любой из прозрачных слоев пленки поливинилхлорида.



Рисунок 1. Фотографии стопы Столетова из ТУ пленки поливинилхлорида в поляризованном свете (1). Пленочный поляризатор (2). Стопа Столетова без поляризатора (3). Изменение цвета 5-го и 6-го слоев пленки в стопе Столетова после обработки 1,2 – дихлорэтаном

Figure 1. Photographs of Stoletov's foot made of PVC polyvinyl chloride film in polarized light (1). Film polarizer (2). Stoletov's foot without polarizer (3). Color change of the 5th and 6th film layers in Stoletov's foot after treatment with 1,2 – dichloroethane

На фотографиях, полученных в поляризованном свете видно, что органические жидкости существенно меняют цвет слоистого полимерного материала в проходящем поляризованном свете (рисунок 1). Изменение цвета многослойного материала после контакта с растворителем имеет устойчивую закономерность заметную невооруженным глазом и подтверждаемую спектральным анализом фотографий. Желтый цвет участка многослойного материала из 6 слоев после контакта с растворителем приобретает цвет многослойного материала из 5 слоев. Голубой цвет участка многослойного материала из 5 слоев после контакта с растворителем приобретает синий цвет многослойного материала из 4 слоев. Таким образом правомерно констатировать «невидимость» внешнего слоя пакетов многослойных пленок вследствие обработки растворителем или его прозрачность.

Для исследования влияния органических растворителей (пластификаторов) на цвет многослойных пленок поливинилхлорида в поляризованном свете собирали многослойные пакеты лент (стопа Столетова), на которые наносили слой жидкости с помощью полиграфической техники одним движением ракеля по трафаретной форме.

«Невидимость» внешнего слоя пакетов многослойных пленок вследствие обработки растворителем является результатом реструктурирования полимерных материалов на надмолекулярном уровне и количественно оценивается контрастом и / или цветовым различием ΔE [12].

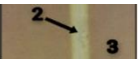
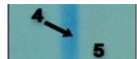
	ΔE		ΔE		ΔE
1 слой	35	3 слой	20	5 слой	20
Фон (0)		2 слой		4 слой	

Рисунок 2. Фотографии в проходящем поляризованном свете пакета из нескольких слоев пленки с «меткой» нанесенной этилацетатом. Цветовое различие [2] между меткой и цветом пакета из 3 слоев пленки $\Delta E = 20$ единиц

Figure 2. Photographs in transmitted polarized light of a package of several layers of film with a "label" applied with ethyl acetate. The color difference [2] between the label and the color of a package of 3 film layers is 20 units

Эффект изменения цвета части упаковки в поляризованном свете как маркировки и «невидимости» внешнего слоя пакетов многослойных пленок после пластификации предложено использовать в защите товаров от подделки и борьбе с контрафактным производством эксклюзивной прозрачной тары и упаковки из полимерной пленки. Эта возможность иллюстрируется результатом фотографирования в поляризованном свете многослойной упаковки из пленки

поливинилхлорида после нанесения слоя летучего растворителя (например, этилацетата) в форме узкой полосы (рисунок 2). Цветовое различие ΔE метки и фона в поляризованном свете на порядок превышает чувствительность глаз человека ($2 \div 3$ ед.), незаметно невооруженным глазом и поэтому вполне пригодно для скрытой оптической маркировки.

Действие растворителей на оптические характеристики прозрачной упаковки из многослойных термоусадочных пленок поливинилхлорида обусловлено их физической активностью по отношению к полимеру в напряженном состоянии. Мерой физической активности растворителей является величина и скорость абсорбции жидкости, и способность снижать уровень внутренних напряжений. Для количественного описания абсорбции жидкостей использовали гравиметрию набухания пленок (рисунок 3), справочные данные по химической стойкости полимеров и термодинамические параметры совместимости твердых и жидких органических веществ.

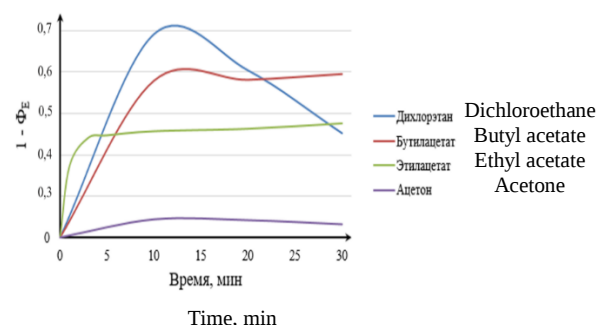


Рисунок 3. Доля растворителя в полимере при набухании пленок поливинилхлорида

Figure 3. The proportion of solvent in the polymer during swelling of polyvinyl chloride films

Для расчёта параметров растворимости жидкости и термоусадочных пленок поливинилхлорида использовали константы Смолла органических веществ и справочные данные экспериментальных исследований растворения или набухания полимеров поливинилхлорида в летучих растворителях. Параметр растворимости поливинилхлорида, использованного для производства термоусадочной пленки, составляет $-9,55 \pm 1,5$ (калл/см³)^{1/2}.

Для расчёта параметров растворимости и критерия совместимости жидкости с ПВХ Флори-Хаггинса (χ) исследовали набухание и механические свойства (модуль Юнга) термоусадочных пленок поливинилхлорида в состоянии максимального содержания в них пластифицирующей жидкости (таблица 1 и 2).

Таблица 1.

Сорбция растворителей пленкой поливинилхлорида и её упругость при набухании

Table 1.

Sorption of solvents by a polyvinyl chloride film and its elasticity during swelling

Растворитель Solvent	Модуль Юнга пленки в жидкости, МПа Young's modulus of film in liquid, MPa	Сорбция жидкостей пленкой Sorption of liquids by film	
		масс. %	Φ_E
1,2-дихлорэтан 1,2-dichloroethane	2,35	246	0,31
Бутилацетат Butyl acetate	5,75	197	0,68
Этилацетат Ethyl acetate	7,69	137	0,69
Ацетон Acetone	5,17	250	0,81
Диоксан Dioxane	3,33	179	0,98
о-Ксилол o-Xylene	19,3	101	0,93

Так, например, для термоусадочных пленок поливинилхлорида производства АО «Дон Полимер» после сорбции 1,2 – дихлорэтана в течение 10 минут установлены Φ_E – объемная доля полимера в его равновесном состоянии

$$\Phi_E = \frac{W_0}{W_1} = 0,31$$

И отношение молярного объема субцепей полимера V_2 к молярному объему растворителя

$$Z = \frac{V_2}{V_1} = 8,96$$

Для термоусадочных пленок поливинилхлорида производства АО «Дон Полимер» после сорбции бутилацетата в течение 10 минут Φ_E – 0,68, и $Z = 2,85$

Для термоусадочных пленок поливинилхлорида производства АО «Дон Полимер» после сорбции этилацетата в течение 5 минут Φ_E – 0,69 и $Z = 2,89$

Подстановка этих и остальных значений в формулу Флори–Ренера (2) позволяет представить результаты оценки экспериментальной оценки в порядке снижения «качества» растворителей по критерию Флори-Хаггинса χ (таблица 2).

Таблица 2.

Свойства растворителей и характеристики их взаимодействия с пленкой поливинилхлорида

Table 2.

Solvent properties and characteristics of their interaction with polyvinyl chloride

Растворитель Solvent	Параметр растворимости, $(\text{кал}/\text{см}^3)^{1/2}$ Solubility parameter, $(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$	Разность параметров растворимости жидкости и ПВХ Difference between solubility parameters of liquid and PVC	Критерий Флори-Хаггинса χ Flory-Huggins criterion	Минимальное время маркировки, с Minimum labeling time, s	$t_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$
1,2-дихлорэтан 1,2-dichloroethane	9,4	0,15	-0,14	5	83,5
Бутилацетат Butyl acetate	8,7	0,85	0,35	15	126,0
Этилацетат Ethyl acetate	9,0	0,45	0,36	20	77,1
Ацетон Acetone	9,7	-0,45	0,67	35	56,0
Диоксан Dioxane	10,8	-1,25	3,25	60	101,0
о-Ксилол o-Xylene	8,7	0,55	1,03	75	144,0

Из таблицы видно, что максимальной термодинамической совместимостью с указанными пленками поливинилхлорида обладает 1,2-дихлорэтан, при его сорбции критерий Флори-Хаггинса принимает наименьшее (даже отрицательное) значение. Это согласуется с теоретическими оценками возможной совместимости хлорированных углеводородов с поливинилхлоридом, являющимся близким аналогом по составу и структуре молекул к структуре повторяющегося звена макромолекул. Некоторые растворители (этилацетат и бутилацетат) имеют критерий Флори-Хаггинса $< 0,5$, что свидетельствует о хорошем термодинамическом качестве их как растворителей. Самым термодинамически несовместимым с пленками поливинилхлорида

оказался диоксан, действие которого на оптические свойства пленок минимально.

Заключение

С помощью цветной фотографии и спектрального анализа прозрачной упаковки в проходящем поляризованном свете показано изменение цвета и прозрачности многослойных полимерных плёнок под действием органических растворителей. Цвет многослойных плёнок в поляризованном свете изменяется по мере набухания в жидкостях и определяется количеством слоев, кинетикой набухания и взаимной ориентацией оптических осей поляризаторов относительно направления усадки пленок.

В ходе экспериментов доказана возможность применения параметра термодинамической

совместимости полимеров и органических растворителей критерия Флори-Хаггинса для количественной оценки скорости изменения цвета пакета плёнок поливинилхлорида в поляризованном свете. Изменение цвета тем значительнее и быстрее чем меньше значения критерия Флори-Хаггинса.

Цветовое различие многослойных плёнок поливинилхлорида до и после

кратковременной (5–20 с) обработки летучим растворителем (1,2-дихлорэтаном, бутил- или этилацетатом) достигает 35 единиц уже при двух слоях пленок и обеспечивает контраст достаточный для скрытой маркировки упаковки или этикетки, выявляемой в поляризованном свете.

Литература

- 1 Пат. № 2791434 С1, RU, G11B 7/24. Способ записи информации на бесцветных прозрачных полимерных пленках / Кондратов А.П., Николаев А.А., Пухова Е.А., Верещагин В.Ю. № 2022111470; Заявл. 27.04.2022; Оpubл. 07.03.2023, Бюл. № 7.
- 2 Volynskii A.L., Bakeev N.F. Solvent Crazing of Polymers. Amsterdam; New York; Tokyo: Elsevier, 1995.
- 3 Манин В.Н., Громов А.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. Л.: Химия, 1980. 254 с.
- 4 Peterlin A., Olf H.G. J. Polymer Sci., Polymer Symp. 1975. Vol. 13. No. 50. P. 243.
- 5 Sinevich E.A., Bykova I.V., Bakeev N.F. Influence of interphase surface energy on the structure of craze polymers // High-molecular compounds. Series B. 1998. Vol. 40. No. 10. P. 1671.
- 6 Pertsov N.V., Traskin V.Y. Influence of the environment on the mechanical properties of dispersed systems and materials. Moscow, 1992. 155 p.
- 7 Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. Высокодисперсное ориентированное состояние полимеров. М.: Химия, 1984. 190 с.
- 8 Reitlinger S.A. Permeability of polymeric materials. Moscow: Khimiya Publ., 1974. 272 p.
- 9 Askadsky A.A., Kondrashchenko V.I. Computer Materials Science of Polymers. Vol. 1. Russian Academy of Sciences. Institute of Elemental Organ Compounds named after A.N. Nesmeyanov. Atomic-Molecular Level. Moscow: Scientific World, 1999. 543 p.
- 10 Denisyuk E.Ya., Volkova E.R. The effect of the thermodynamic quality of solvent on the kinetics of polymer network swelling // Polymer Science, Series A. 2003. Vol. 45. No. 7. P. 686.
- 11 Denisyuk E.Ya. Thermodynamics of deformation and swelling of crosslinked polymers under small deformations // Polymer Science Series A. 2012. Vol. 54. P. 240. doi: 10.1134/S0965545X12030017
- 12 Denisyuk E.Y. Mechanics and Thermodynamics of Deformation for a Liquid-Saturated Elastic Materials in the Approximation of Small Deformations // Mechanics of Solids. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 164. doi: 10.3103/S0025654418020073
- 13 Denisyuk E.Y. Barodiffusion Processes of Solvent Transport in Reticulated Polymers // Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics. 2010. Vol. 9. No. 1. P. 131.
- 14 Konyukhov V.Yu., Shpineva M.A. Thermodynamics of systems: photopolymers low-molecular liquids // J. Chem. Chem. Eng. 2013. Vol. 7. No. 5. P. 462.
- 15 Safronov A.P., Adamova L.V., Kurlyanskaya G.V. Flory–Huggins Parameters of Guar Gum, Xanthan Gum, Agarose, and Gellan Gum in Aqueous Solutions // Polymer Science. 2019. Vol. 61. No. 1. P. 33. doi: 10.1134/S2308112019010152
- 16 Gogoladze I.A., Guseva I.Y. Study of the properties of offset hybrid paints // Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Printing and Publishing. 2011. No. 2. P. 27.
- 17 Savin I.V. Analysis of Features and Basic Properties of UV Paints // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2019. No. 9. P. 248.
- 18 Li L.-H., Kontsevoi O.Y., Rhim S.H., Freeman A.J. Structural, electronic, and linear optical properties of organic photovoltaic PBTTT-C14 crystal // The Journal of Chemical Physics. 2013. Vol. 138. P. 164503.
- 19 Weber M.F., Nevitt T.J., Merrill W.W. CN1293613A Цветоизменяющая пленка. 2001–05–02. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021721628/publication/CN1293613A?q=prn%3DCN1293613A>
- 20 Singh R., Dutt S., Sharma P. et al. Future of nanotechnology in food industry: Challenges in processing, packaging, and food safety // Global Challenges. 2023. Vol. 7. No. 4. P. 2200209. doi: 10.1002/gch2.202200209
- 21 Mnyango J.I., Hlangothi S.P. Polyvinyl chloride applications along with methods for managing its end-of-life items: A review // Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. 2024. doi: 10.1177/14777606241308652
- 22 Hazer B., Karahaliloğlu Z. Biocompatible PVC Derivatives with Some Natural Substances for Potential Active Food Packaging Materials // ACS Food Science & Technology. 2023. Vol. 3. No. 11. P. 1854–1863. doi: 10.1021/acsfoodscitech.3c00241
- 23 Karakuş M.Ş. Structural Properties, Mechanical Behavior, and Food Protecting Ability of Chickpea Protein-Derived Biopolymer Films // Polymers. 2025. Vol. 17. No. 14. P. 1938. doi: 10.3390/polym17141938
- 24 Ranade T., Sati A., Pratap A. et al. Curcumin-integrated biopolymer films for active packaging: current trends and future directions // Chemical Papers. 2025. Vol. 79. No. 3. P. 1303–1334. doi: 10.1007/s11696-025-03892-1

References

- 1 Kondratov A.P., Nikolaev A.A., Pukhova E.A., Vereshchagin V.Yu. et al. Method of recording information on colorless transparent polymer films. Patent RU 2791434, 2023. (in Russian)
- 2 Volynskii A.L., Bakeev N.F. Solvent Crazing of Polymers. Amsterdam; New York; Tokyo: Elsevier, 1995.
- 3 Manin V.N., Gromov A.N. Physical and chemical resistance of polymer in operating conditions. Leningrad: Khimiya Publ., 1980. 254 p. (in Russian)
- 4 Peterlin A., Olf H.G. Relaxation processes in deformed polymers. Journal of Polymer Science: Polymer Symposia. 1975. vol. 50. no. 1. pp. 243–254. doi: 10.1002/polc.5070500122

- 5 Sinevich E.A., Bykova I.V., Bakeev N.F. Influence of interphase surface energy on the structure of crazed polymers. *Polymer Science Series B*. 1998. vol. 40. no. 10. pp. 1671–1674. (in Russian)
- 6 Pertsov N.V., Traskin V.Y. Influence of the environment on the mechanical properties of dispersed systems and materials. Moscow, 1992. 155 p. (in Russian)
- 7 Volynsky A.L., Bakeev N.F. Highly dispersed oriented state of polymers. Moscow: Khimiya Publ., 1984. 190 p. (in Russian)
- 8 Reitlinger S.A. Permeability of polymeric materials. Moscow: Khimiya Publ., 1974. 272 p. (in Russian)
- 9 Askadsky A.A., Kondrashchenko V.I. Computer Materials Science of Polymers. Vol. 1. Atomic-Molecular Level. Moscow: Scientific World, 1999. 543 p. (in Russian)
- 10 Denisjuk E.Ya., Volkova E.R. The effect of the thermodynamic quality of solvent on the kinetics of polymer network swelling. *Polymer Science Series A*. 2003. vol. 45. no. 7. pp. 686–692.
- 11 Denisjuk E.Ya. Thermodynamics of deformation and swelling of crosslinked polymers under small deformations. *Polymer Science Series A*. 2012. vol. 54. no. 3. pp. 240–248. doi: 10.1134/S0965545X12030017
- 12 Denisjuk E.Y. Mechanics and Thermodynamics of Deformation for a Liquid-Saturated Elastic Materials in the Approximation of Small Deformations. *Mechanics of Solids*. 2018. vol. 53. no. 2. pp. 164–173. doi: 10.3103/S0025654418020073
- 13 Denisjuk E.Y. Barodiffusion Processes of Solvent Transport in Reticulated Polymers. *Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics*. 2010. vol. 9. no. 1. pp. 131–142. (in Russian)
- 14 Konyukhov V.Yu., Shpineva M.A. Thermodynamics of systems: photopolymers low-molecular liquids. *Journal of Chemical and Chemical Engineering*. 2013. vol. 7. no. 5. pp. 462–469.
- 15 Safronov A.P., Adamova L.V., Kuryandskaya G.V. et al. Flory–Huggins Parameters of Guar Gum, Xanthan Gum, Agarose, and Gellan Gum in Aqueous Solutions. *Polymer Science, Series A*. 2019. vol. 61. no. 1. pp. 33–41. doi: 10.1134/S2308112019010152
- 16 Gogoladze I.A., Guseva I.Y. Study of the properties of offset hybrid paints. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Printing and Publishing*. 2011. no. 2. pp. 27–32. (in Russian)
- 17 Savin I.V. Analysis of Features and Basic Properties of UV Paints. *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2019. no. 9. pp. 248–254. (in Russian)
- 18 Li L.-H., Kontsevoi O.Y., Rhim S.H., Freeman A.J. et al. Structural, electronic, and linear optical properties of organic photovoltaic PBTTT-C14 crystal. *The Journal of Chemical Physics*. 2013. vol. 138. no. 16. pp. 164503. doi: 10.1063/1.4801997
- 19 Weber M.F., Nevitt T.J., Merrill W.W. Color-changing film. Patent CN1293613A, 2001. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021721628/publication/CN1293613A> (in Russian)
- 20 Singh R., Dutt S., Sharma P. et al. Future of nanotechnology in food industry: Challenges in processing, packaging, and food safety. *Global Challenges*. 2023. vol. 7. no. 4. pp. 2200209. doi: 10.1002/gch2.202200209
- 21 Mnyango J.I., Hlangothi S.P. Polyvinyl chloride applications along with methods for managing its end-of-life items: A review. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2024. doi: 10.1177/14777606241308652
- 22 Hazer B., Karahallıoğlu Z. Biocompatible PVC Derivatives with Some Natural Substances for Potential Active Food Packaging Materials. *ACS Food Science & Technology*. 2023. vol. 3. no. 11. pp. 1854–1863. doi: 10.1021/acsfoodscitech.3c00241
- 23 Karakuş M.Ş. Structural Properties, Mechanical Behavior, and Food Protecting Ability of Chickpea Protein-Derived Biopolymer Films. *Polymers*. 2025. vol. 17. no. 14. pp. 1938. doi: 10.3390/polym17141938
- 24 Ranade T., Sati A., Pratap A. et al. Curcumin-integrated biopolymer films for active packaging: current trends and future directions. *Chemical Papers*. 2025. vol. 79. no. 3. pp. 1303–1334. doi: 10.1007/s11696-025-03892-1

Сведения об авторах

Валерий Ю. Конюхов д.х.н., профессор, кафедра общей химии (№19) института общей профессиональной подготовки, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ, Каширское ш., 31 г. Москва, 115409, Россия, volkon_1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6128-9413>

Александр А. Николаев старший преподаватель, кафедра инновационных материалов printmediainдустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия, a.a.nikolaev@mospolytech.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3232-6753>

Алёна А. Прихожая студент, кафедра инновационных материалов printmediainдустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия, lekalena03@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0004-3424-6428>

Вячеслав К. Долгонос аспирант, кафедра инновационных материалов printmediainдустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия, dolgonosov@inbox.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9962-6211>

Александр П. Кондратов д.т.н., профессор, кафедра инновационных материалов printmediainдустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семёновская, 38 г. Москва, 107023, Россия, apkrezerv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Information about authors

Valery Yu. Konyukhov Dr. Sci. (Chem.), professor, department of General Chemistry (No. 19) of the Institute of General Professional Training, National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse, 31 Moscow, 115409, Russian Federation, volkon_1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6128-9413>

Alexander A. Nikolaev Senior lecturer, department of Innovative materials of printmediainдустрии, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation, a.a.nikolaev@mospolytech.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3232-6753>

Alyona A. Prihozhaya Student, department of Innovative materials of printmediainдустрии, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation, lekalena03@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0004-3424-6428>

Vyacheslav K. Dolgonosov Graduate student, department of Innovative materials of printmediainдустрии, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation, dolgonosov@inbox.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-9962-6211>

Alexander P. Kondratov Dr. Sci. (Tech.), professor, department of Innovative materials of printmediainдустрии, Moscow Polytechnic University, Bolshaya Semyonovskaya str., 38 Moscow, 107023, Russian Federation, apkrezerv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Вклад авторов

Валерий Ю. Конюхов предложил методику проведения эксперимента, выполнение математических расчетов, корректировал рукопись до её подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Александр А. Николаев проводил эксперименты, помогал в математических расчетах, корректировал рукопись до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Алёна А. Прихожая обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Вячеслав К. Долгонос обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Александр П. Кондратов предложил методику проведения эксперимента, написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

Valery Yu. Konyukhov proposed a methodology for conducting the experiment, performing mathematical calculations, corrected the manuscript before submitting it to the editorial office and is responsible for plagiarism

Alexander A. Nikolaev conducted experiments, helped with mathematical calculations, corrected the manuscript before submitting it to the editorial office and is responsible for plagiarism

Alyona A. Prihozhaya review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Vyacheslav K. Dolgonosov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Alexander P. Kondratov proposed a methodology for conducting the experiment, wrote the manuscript, corrected it before submitting it to the editorial office and is responsible for plagiaris

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 07/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2025
Received 07/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2025

Электроформование мембран из ацетата целлюлозы: оптимизация свойств для топливных элементов

Артём И. Мошков	¹	moshkov.ai@yandex.ru	 0009-0002-2491-2787
Анита И. Кецо	¹	anita.ketsko17@mail.ru	 0009-0006-7358-2840
Анна Э. Василевская	¹	avasilevkaya@bk.ru	 0009-0006-7826-7751
Алина А. Пономарева	^{1,2}	aaponomareva@itmo.ru	 0000-0002-1651-8045

¹ Центр химической инженерии, Университет ИТМО, Кронверкский проспект, дом 49, литера А, Санкт-Петербург, 197101, Россия
² Дальневосточный федеральный университет, 690922, Российская Федерация, Владивосток, п. Аякс, д. 10

Аннотация. Исследован процесс электроформования ацетат-целлюлозных мембран для низкотемпературных топливных элементов. Сформированы растворы с концентрацией 1, 3, 5, 7, 10 и 12 % масс. в смесях ацетон/диметилформамид 6:4 и 4:6, после центрифугирования получены однородные системы. Ротационная реометрия зафиксировала линейную зависимость напряжения сдвига от скорости; для 5-% раствора при соотношении 6:4 рост скорости подачи с 0,3 до 1,0 мл·ч⁻¹ увеличил напряжение сдвига с 52,5 до 106,1 кПа. Измеренная динамическая вязкость возросла с 9,6 до 13,8 Па·с при повышении концентрации полимера с 14 до 15 %, отражая усиление межмолекулярных взаимодействий. Электроформование проводилось при 30 кВ и расстоянии 100 мм; полученные волокна исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Средний диаметр волокон для 6-% раствора составил 0,61–0,79 мкм, увеличение концентрации до 8 % сузило распределение диаметров, а переход к 12 % повысил неоднородность из-за роста вязкости. Табличные данные подтвердили, что коэффициент асимметрии минимален при 6–8 % полимерного содержимого и соотношении растворителей 6:4. Снижение скорости подачи до 0,3 мл·ч⁻¹ уменьшало диаметр волокон, повышение до 1,0 мл·ч⁻¹ приводило к утолщению. Выявлена технологическая область оптимума: 6–8 % ацетата целлюлозы, растворители 6:4, скорость подачи 0,3–0,7 мл·ч⁻¹. Полученные мембраны характеризуются равномерной морфологией и пригодны для интеграции в мембранно-электродные узлы. Результаты демонстрируют возможность точного управления структурой путём регулирования реологических и электрогидродинамических параметров, создавая основу для масштабирования процесса к промышленному уровню и дальнейшей оптимизации энергоэффективности топливных систем.

Ключевые слова: низкотемпературные топливные элементы, электроформование, ацетат целлюлозы, ацетон, диметилформамид, мембраны.

Electrospinning of cellulose acetate membranes: optimization of properties for fuel cell applications

Artem I. Moshkov	¹	moshkov.ai@yandex.ru	 0009-0002-2491-2787
Anita I. Ketsko	¹	anita.ketsko17@mail.ru	 0009-0006-7358-2840
Anna E. Vasilevskaya	¹	avasilevkaya@bk.ru	 0009-0006-7826-7751
Alina A. Ponomareva	^{1,2}	aaponomareva@itmo.ru	 0000-0002-1651-8045

¹ Chemical Engineering Center, ITMO University, 49 Kronverksky pr., lit. A, St Petersburg 197101, Russia

² Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Vladivostok 690922, Russia

Abstract. Electrospinning of cellulose acetate membranes for low-temperature fuel cells was investigated. Solutions containing 1, 3, 5, 7, 10 and 12 wt % polymer were prepared in acetone–dimethylformamide mixtures of 6:4 and 4:6 and homogenised by centrifugation. Rotational rheometry revealed a linear shear-stress–rate relation; for the 5 % solution at 6:4, raising the feed rate from 0.3 to 1.0 mL h⁻¹ increased shear stress from 52.5 to 106.1 kPa. Dynamic viscosity rose from 9.6 to 13.8 Pa s when polymer content increased from 14 to 15 %. Electrospinning at 30 kV and a 100 mm gap produced fibres evaluated by optical and scanning electron microscopy. A 6 % solution yielded mean diameters of 0.61–0.79 µm; increasing concentration to 8 % narrowed the distribution, whereas 12 % produced greater heterogeneity owing to higher viscosity. The asymmetry coefficient was lowest for 6–8 % polymer at a 6:4 solvent ratio. Reducing the feed rate to 0.3 mL h⁻¹ decreased fibre diameter, while 1.0 mL h⁻¹ caused thickening. The optimal window comprises 6–8 % cellulose acetate, solvent ratio 6:4 and feed rate 0.3–0.7 mL h⁻¹. Membranes produced under these conditions exhibit uniform morphology and are suitable for incorporation into membrane–electrode assemblies. The study demonstrates precise structural control through tuning of rheological and electrohydrodynamic parameters, providing a basis for industrial scale-up and further optimisation of fuel-cell energy efficiency. Environmental impact is minimised through solvent reuse and low processing temperatures.

Keywords: low-temperature fuel cells, electrospinning, cellulose acetate, acetone, dimethylformamide, membranes.

Для цитирования

Мошков А.И., Кецо А.И., Василевская А.Э., Пономарева А.А. Электроформование мембран из ацетата целлюлозы: оптимизация свойств для топливных элементов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 158–164. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-158-164

For citation

Moshkov A.I., Ketsko A.I., Vasilevskaya A.E., Ponomareva A.A. Electrospinning of cellulose acetate membranes: optimization of properties for fuel cell applications. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 158–164. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-158-164

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

Введение

В современных исследованиях особое внимание уделяется альтернативным источникам энергии, и низкотемпературные топливные элементы (ТЭ) представляют собой перспективное направление [1]. Однако их коммерциализация затруднена из-за высокой стоимости и низкой надежности мембранно-электродного узла (МЭУ) [2]. Проблемы с протонными проводниками, такими как мембраны Nafion и MF-4SK, связаны с ограниченными эксплуатационными характеристиками и стабильностью в различных условиях [3]. Дегградация катализаторов и полимерного электролита также вызывает серьезные опасения [4].

В последние годы интерес к альтернативным источникам энергии значительно вырос, и низкотемпературные топливные элементы (ТЭ) рассматриваются как одно из наиболее перспективных решений. Однако их широкое внедрение сдерживается высокой стоимостью и недостаточной надежностью мембранно-электродного узла (МЭУ). Основные проблемы связаны с протонными проводниками, такими как мембраны Nafion и MF-4SK, которые имеют ограниченные эксплуатационные характеристики и нестабильны в определенных условиях.

Первые прототипы топливных элементов были созданы еще в 1830-х годах, но современные устройства все еще уступают традиционным источникам энергии по экономическим и энергетическим показателям. Одной из ключевых проблем является снижение протонной проводимости при низкой влажности, что приводит к высыханию мембран, и как следствие снижению эффективности [5].

Кроме того, дегградация катализаторов и полимерного электролита в процессе эксплуатации вызывает серьезные опасения. Длительная работа при повышенных температурах может привести к разрушению катализаторов и нарушению целостности мембран, что сокращает срок службы устройств.

Текущие исследования направлены на улучшение гидратационных и проводящих свойств полимерных мембран, а также на повышение их устойчивости к разрушению [6]. Например, ученые изучают методы модификации [7, 8] перфторированных мембран путем введения функциональных групп, наночастиц и полимерных добавок для повышения электропроводности и стабильности.

Материалы и методы

Для приготовления формовочных растворов использовался ацетат целлюлозы производства ООО "Химреактив" (Россия) с различными концентрациями: 1; 3; 5; 7 и 10%. В качестве

растворителей применялись ацетон марки «чда» (ООО «Ленреактив», Россия) и диметилформамид (ДМФА, ООО «Химмедсинтез», Россия) в соотношениях 4:6 и 6:4. После смешивания компонентов растворы очищались центрифугированием при скорости 2000 об/мин в течение 10 минут для удаления возможных примесей [9–11].

Определение молекулярной массы вязкозиметрическим методом. Молекулярная масса ацетата целлюлозы определялась методом капиллярной вискозиметрии с использованием вискозиметра Оствальда (По ГОСТ 33768–2015). На основе измерений времени истечения растворителя и растворов ацетата целлюлозы были рассчитаны относительная, удельная и приведенная вязкости. Молекулярная масса определялась по уравнению Марка–Куна–Хаувинка:

$$[\eta] = K \cdot M^a \quad (1)$$

где $[\eta]$ – характеристическая вязкость; K и a – эмпирические коэффициенты, зависящие от природы полимера и растворителя; M – молекулярная масса полимера.

Ротационная вискозиметрия растворов. Напряжения сдвига измерялись с использованием ротационного реометра Physica MCR 502 (Anton Paar, Австрия). Кривые текучести были получены в диапазоне скоростей сдвига от 0,1 до 1000 с⁻¹ при температуре 25,0 ± 0,2 °C.

Структурирование из растворов. Процесс электроформования проводился на установке NANON-01A (Месс, Япония). Раствор распылялся через иглу на алюминиевый коллектор при напряжении 30 кВ и расстоянии между электродами 100 мм. Скорость подачи раствора варьировалась от 0,3 до 1 мл/ч.

Характеристика морфологии микрочастиц. Морфология микрочастиц изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega-3 (Tescan, Чехия) и оптического микроскопа. Статистический анализ распределения размеров частиц проводился с использованием программы Image-J (National Institutes of Health).

Результаты и обсуждение.

На основе проведенных исследований ацетата целлюлозы были получены результаты, которые позволяют глубже понять свойства и поведение данного материала в растворах. Характеристическая вязкость растворов ацетата целлюлозы составила 0,75 мл/г, что свидетельствует о наличии [12] умеренных вязкостных свойств, играющих важную роль в процессе формирования мембран. Значения тангенса угла механических потерь ($\tan \delta$) и константы Хаггинса (K_x) составили 1,21 и 2,15 соответственно. На основе этих данных была рассчитана молекулярная масса ацетата целлюлозы по уравнению Марка–Куна–Хаувинка, которая составила 24800 г./моль.

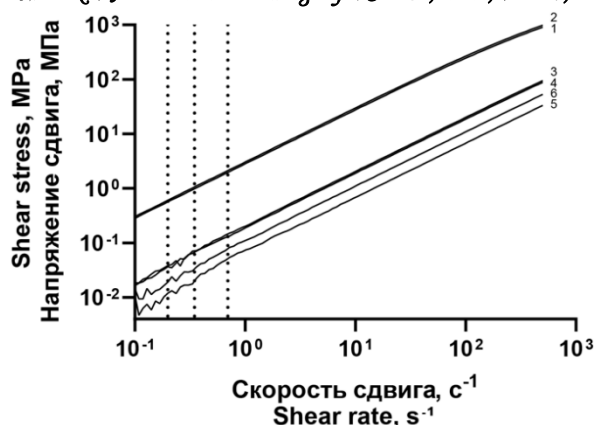


Рисунок 1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для растворов ацетата целлюлозы различной концентрации в смесях растворителей ацетон/ДМФА. Кривая 1 – 12 % ацетата целлюлозы в смеси растворителей ацетон/ДМФА в соотношении 6:4; Кривая 2 – 12% в соотношении 4:6; Кривая 3 – 8 % в соотношении 6:4; Кривая 4 – 8 % в соотношении 4:6; Кривая 5 – 6 % в соотношении 6:4; Кривая 6 – 6 % в соотношении 4:6

Figure 1. Dependence of shear stress on shear rate for cellulose acetate solutions of different concentrations in acetone/DMFA solvent mixtures. Curve 1–12% of cellulose acetate in acetone/DMFA solvent mixture at 6:4 ratio; Curve 2–12% at 4:6 ratio; Curve 3–8% at 6:4 ratio; Curve 4–8% at 4:6 ratio; Curve 5–6% at 6:4 ratio; Curve 6–6% at 4:6 ratio

На рисунке 1 представлена зависимость напряжения сдвига (σ) от скорости сдвига ($\dot{\gamma}$) для растворов ацетата целлюлозы при различных концентрациях (C). Как видно из графика, напряжение сдвига пропорционально скорости сдвига, что характерно для ньютоновских жидкостей. Для более детального анализа поведения раствора в процессе гальванопластики

были рассчитаны значения скоростей сдвига в игле при заданных значениях скорости подачи раствора (Q) и концентрации (C) по формуле:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{4Q}{\pi R^3},$$

Для анализа реологических характеристик использовалось уравнение капиллярного течения, связывающее скорость сдвига ($\dot{\gamma}$) со скоростью подачи раствора (Q) и радиусом иглы ($R = 0.21$ мм). При типичных скоростях подачи 0.1–0.3 мл/ч расчетные значения $\dot{\gamma}$ составили 3.8–7.6 с⁻¹, что соответствует оптимальному диапазону для электроформования ацетата целлюлозы. Экспериментальные данные для 5% раствора (соотношение растворителей 6:4) [13] показали увеличение напряжения сдвига с 52.5 до 106.1 кПа при росте скорости подачи, что согласуется с наблюдаемым уменьшением диаметра волокон с 0.79 до 0.61 мкм (таблица 1). Такое поведение объясняется ориентацией макромолекул и разрушением надмолекулярных структур при сдвиговом течении, что описывается фундаментальным соотношением $\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}$. Полученные результаты подтверждают, что контроль реологических параметров (50–150 кПа) [14] позволяет получать волокна с узким распределением диаметров, что критически важно для создания эффективных мембран топливных элементов.

Поведение растворов ацетата целлюлозы в потоке соответствует ньютоновской модели вязкого течения, где напряжение сдвига определяется как $\sigma = \eta \dot{\gamma}$, а η – коэффициент динамической вязкости. Для раствора с концентрацией $C \approx 14$ масс. % значение η составило 9.6 Па × с, а для раствора с концентрацией 15 масс. % – 13.8 Па × с.

Таблица 1.
Влияние соотношения растворителей, концентрации ацетата целлюлозы и скорости подачи раствора на морфологию образуемых волокон

Table 1.
Effect of solvent ratio, cellulose acetate concentration and solution feed rate on the morphology of the formed fibers

Соотношение растворителей ацетон к ДМФ The ratio of acetone to DMF solvents	Концентрация Ацетата целлюлозы (% масс) Concentration of Cellulose Acetate (% mass)	Коэффициент асимметрии Coefficient of asymmetry			Среднее значение диаметра волокна, мкм The average value of the fiber diameter, microns		
		Скорость подачи раствора, мл/ч / The flow rate of the solution, ml/h					
		0,3	0,7	1	0,3	0,7	1
6:4	6	$0,55 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	0,61	0,79	0,40
4:6	6	—	—	$1,9 \times 10^{-4}$	—	—	0,74
6:4	8	$3,2 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-3}$	0,77	0,59	0,63
4:6	8	$3,4 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-3}$	$5,3 \times 10^{-6}$	0,94	0,86	0,69
6:4	12	$5,3 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	0,95	1,02	0,81
4:6	12	$2,3 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$8,5 \times 10^{-5}$	0,75	0,54	0,76

В таблице 1 представлены данные, отражающие влияние соотношения растворителей (ацетон: ДМФА), концентрации ацетата целлюлозы и скорости подачи раствора на морфологию образуемых волокон. Анализ данных показывает сложную взаимосвязь между этими параметрами.

Представленное соотношение [13] растворителей объясняется технологической необходимостью, т. к. ДМФА обладает большим, чем ацетон сродством к ацетату целлюлозы из-за его большей полярности. Добавление его в раствор ведет к повышению растворимости ацетата целлюлозы за счет большего образования водородных связей растворителя с полимером и, как следствие, к более равномерному распределению макромолекул в объеме смеси [15].

Указанные явления способствуют [16] повышению эффективности электроспиннинга за счёт уменьшения испарения растворителя и стабилизации формирования полимерной струи. Это проявляется в улучшении морфологии волокон, а именно в образовании однородных волокон без включений в виде сферических частиц [17].

Результаты исследования показали, что использование 6% (рисунок 2) раствора ацетата целлюлозы в смеси ацетон: ДМФА (6:4) позволяет получать волокна с узким распределением по диаметру. Коэффициенты асимметрии составили 0.55×10^{-6} , 2.6×10^{-5} и 2.5×10^{-5} мкм при скоростях подачи 0.3, 0.7 и 1 мл/ч соответственно, при этом средний диаметр волокон варьировался в пределах 0.61–0.79 мкм [18].

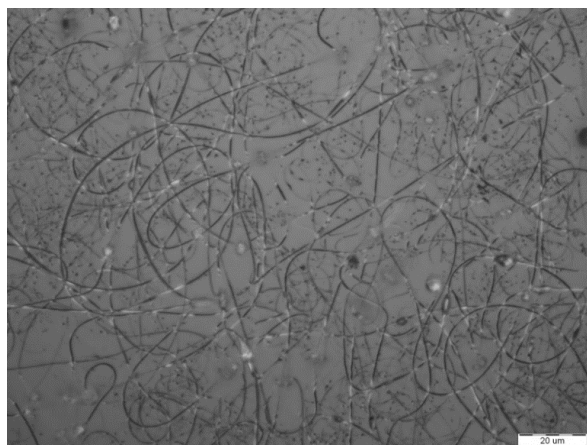


Рисунок 2. Морфология волокон, при концентрации ацетата целлюлозы 6% и скорости подачи 0,7 мл/ч
Figure 2. Fiber morphology, at a cellulose acetate concentration of 6% and a feed rate of 0.7 mL/h

Скорость подачи раствора оказывает существенное влияние на процесс электроформования. Наблюдаемая зависимость уменьшения диаметра волокон при снижении скорости подачи до 0.3 мл/ч соответствует известным

литературным данным о взаимосвязи этих параметров [19]. Незначительное увеличение диаметра при повышении скорости до 0.7–1 мл/ч может быть связано с изменением баланса между скоростью подачи раствора и процессами испарения растворителей [20]. Важно отметить, что во всем исследованном диапазоне скоростей сохраняется узкое распределение размеров волокон, что свидетельствует о стабильности процесса электроформования в данных условиях.

При увеличении концентрации ацетата целлюлозы до 8% и соотношении растворителей 6:4 коэффициенты асимметрии возрастают, что указывает на улучшение однородности размеров волокон (рисунок 3). В то же время для соотношения 4:6 наблюдается более широкое распределение размеров волокон, особенно при высоких скоростях подачи раствора [21].

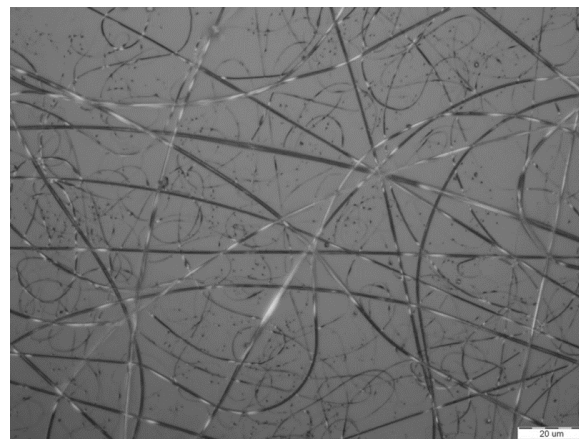


Рисунок 3. Морфология волокон, при концентрации ацетата целлюлозы 8% и скорости подачи 0,7 мл/ч
Figure 3. Fiber morphology, at a cellulose acetate concentration of 8% and a feed rate of 0.7 mL/h

Дальнейшее увеличение концентрации до 12% приводит к снижению однородности размеров волокон, что может быть связано с увеличением вязкости раствора. Для соотношения 6:4 коэффициенты асимметрии составляют 5.3×10^{-4} , 3.3×10^{-3} и 2.4×10^{-3} мкм, а для соотношения 4:6 – 2.3×10^{-3} , 2.9×10^{-4} и 8.5×10^{-5} мкм [22].

Морфология микрочастиц, полученных из растворов с концентрациями 6, 8 и 12 масс. %, была исследована с использованием оптической и сканирующей электронной микроскопии (ОМ и СЭМ). На рисунках 4 представлена гистограмма распределения размеров частиц для раствора с концентрацией 6 масс. %. Микроструктура образцов [23] демонстрирует наличие как волокнистых структур, так и каплевидных частиц. При концентрации 6 масс. % преобладают мелкие каплевидные частицы, что связано с низкой вязкостью раствора и неустойчивым распылением.

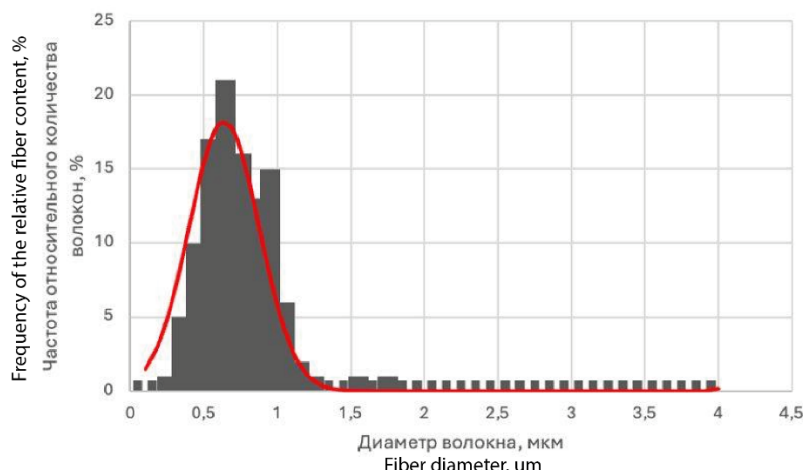


Рисунок 4. Распределение диаметров волокон по размерам

Figure 4. Size distribution of fiber diameters

Таким образом, результаты показывают, что увеличение концентрации ацетата целлюлозы способствует увеличению среднего диаметра волокон, при этом соотношение растворителей и скорость подачи раствора существенно влияют на однородность размеров образуемых волокон. Соотношение 6:4 демонстрирует более узкое распределение размеров волокон при меньшей концентрации, но с ростом концентрации наблюдается снижение однородности, в то время как соотношение 4:6 характеризуется более широким распределением размеров волокон во всем диапазоне концентраций и скоростей подачи.

Заключение

В рамках настоящего исследования были получены растворы ацетата целлюлозы с содержанием полимера 6, 8 и 12 мас. % в смеси ацетона и ДМФА, которые затем подверглись гальванопластике при варьирующемся приложенном напряжении от 0,1 до 0,2 мл/ч. В результате выполнения этих процессов были сформированы микрочастицы ацетата целлюлозы, обладающие разнообразной морфологией, что свидетельствует о зависимости [24] формирования структуры от условий обработки.

Анализ морфологии волокон показал, что при концентрации 6 мас. % и соотношении растворителей 6:4 наблюдается узкое распределение размеров волокон, что подтверждается низкими коэффициентами асимметрии, составляющими 0.55×10^{-6} , 2.6×10^{-5} и 2.5×10^{-5} мкм при скоростях подачи 0,3, 0,7 и 1 мл/ч соответственно. При увеличении концентрации до 8 мас. % в данном соотношении растворителей наблюдается улучшение однородности размеров волокон, о чем свидетельствуют повышенные коэффициенты

асимметрии, а также происходит тенденция к увеличению среднего диаметра волокон.

Однако при дальнейшем увеличении концентрации до 12 мас. % и при сохраняющемся соотношении 6:4 фиксируется снижение однородности, выражающееся в возрастании коэффициента асимметрии до значений 5.3×10^{-4} , 3.3×10^{-3} и 2.4×10^{-3} мкм с увеличением скорости подачи. Эти результаты подчеркивают значительное влияние вязкости раствора на морфологические характеристики образуемых структур. Рост концентрации ацетата целлюлозы вызывает усиление межмолекулярных взаимодействий между полимерными цепями, что подтверждается ростом динамической вязкости системы. Это приводит к увеличению плотности цепочечных переплетений, и большему времени релаксации макромолекул полимера в процессе электроформования. В результате снижается степень ориентации цепей под действием электрического поля, что увеличивает диаметр волокон [24–27].

Кроме того, повышение скорости подачи раствора является важным фактором, способствующим изменениям в морфологии частиц, что проявляется в переходе от каплевидных структур к волокнистым. Полученные данные подтверждают, что изменение условий электроформования оказывает статистически значимое влияние на формирование микрочастиц. Результаты настоящего исследования могут быть использованы для оптимизации процессов получения волокон и мембран на основе ацетата целлюлозы, что открывает новые [25] перспективы для их применения в различных областях [27].

Литература

- 1 O'Hayre R., Cha M. Recent roadmap of low-temperature proton exchange membrane fuel cell commercialisation // *Energy & Environmental Science*. 2016. V. 9. P. 3354–3380. doi: 10.1039/C6EE01617E
- 2 Antolini E. Recent advances in catalyst durability for proton exchange membrane fuel cells // *Applied Catalysis B*. 2019. V. 254. P. 338–353. doi: 10.1016/j.apcatb.2019.04.005
- 3 Park S., Kim Y., Kim J., Lee H. Degradation issues and mitigation strategies for perfluorosulfonic-acid membranes // *Progress in Polymer Science*. 2017. V. 67. P. 1–30. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2017.07.004
- 4 Raut S., Kumar A., Choudhury N. Thermal and chemical stability limits of PFSA membranes: a review // *Journal of Membrane Science*. 2021. V. 636. 119558. doi: 10.1016/j.memsci.2021.119558
- 5 Yu H., Yang J., Liu B., Chen Z. Strategies to maintain proton conductivity at low relative humidity // *Journal of Power Sources*. 2020. V. 448. 227423. doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227423
- 6 Zhang D., Liu Y., Wu G., Wang X. Recent progress on hydration strategies for proton-exchange membranes // *Electrochimica Acta*. 2022. V. 403. 139648. doi: 10.1016/j.electacta.2021.139648
- 7 Bae B., Kang Y. Nanoscale fillers for PFSA modification: 2015–2023 update // *Small Methods*. 2023. V. 7. 2300361. doi: 10.1002/smt.202300361
- 8 Zhu L., Wang H., Li Q. Functionalised ionic-group membranes beyond Nafion // *Chemical Society Reviews*. 2024. V. 53. P. 1872–1916. doi: 10.1039/D3CS00671D
- 9 Zhang C.-L., Sun W.-J., Li X.-B., Wang Y.-B. Tree-like cellulose-acetate nanofibre membrane fabricated by one-step electrospinning for proton-exchange fuel cells // *Journal of Membrane Science*. 2022. V. 642. 119997. doi: 10.1016/j.memsci.2021.119997
- 10 Zhang H., Li S., Pang J., Chen X. Micro-block poly(arylene ether sulfone)s with densely quaternised units for anion-exchange membranes // *Journal of Membrane Science*. 2023. V. 669. 121333. doi: 10.1016/j.memsci.2022.121333
- 11 Hao Z., Li M., Wang S., Chen Y. Enhanced proton conductivity of electrospun cellulose-acetate membranes via sulfonated graphene-oxide incorporation // *Journal of Membrane Science*. 2023. V. 662. 121084. doi: 10.1016/j.memsci.2023.121084
- 12 Zhang Y., Zhang C., Wang Y. Recent progress in cellulose-based electrospun nanofibres // *Nanoscale Advances*. 2021. V. 3. P. 6040–6047. doi: 10.1039/D1NA00479A
- 13 Kang S., Lee J., Kim S., Park H. Effect of acetone/dimethylformamide ratio on jet stability and fibre uniformity during cellulose-acetate electrospinning // *Polymer Testing*. 2023. V. 118. 107922. doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.107922
- 14 Li Z., Huang R., Li X., Zhou K. Core-shell electrospun proton-conducting membranes containing imidazole-grafted cellulose // *Journal of Power Sources*. 2022. V. 533. 231400. doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231400
- 15 Chen L., Zhao Y., Sun G., Wei J. Rheological window for stable needleless electrospinning of cellulose-acetate // *Polymer*. 2022. V. 255. 125034. doi: 10.1016/j.polymer.2022.125034
- 16 Da Silva E., Santos T., Souza F., Alves P. Influence of relative humidity on electrospinning of cellulose-acetate fuel-cell membranes // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. V. 49. P. 18702–18713. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.152
- 17 Oliveira P., Tavares L., Costa P., Gonçalves J. Proton-conductive electrospun membranes based on phosphonated cellulose // *Separation and Purification Technology*. 2024. V. 344. 124089. doi: 10.1016/j.seppur.2023.124089
- 18 Zhou X., Li Z., Feng C., Zhang L. Continuous production of aligned cellulose-acetate nanofibres using a rotating collector // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022. V. 14. P. 37513–37523. doi: 10.1021/acsami.2c14013
- 19 Singh J.-Y., Patel N., Gupta N., Lee J. Metal-organic-framework-functionalised nanofibre mats for humidity-resilient PEM fuel cells // *Small*. 2024. V. 20. 2401780. doi: 10.1002/sml.202401780
- 20 Liang Q., Chen X., Ma Y., Zhang H. High-throughput multi-jet electrospinning of cellulose-acetate nanofibres for fuel-cell membranes // *Carbohydrate Polymers*. 2024. V. 318. 120964. doi: 10.1016/j.carbpol.2023.120964
- 21 Gao R., Huang Y., Li J., Chen J. Heat-setting behaviour of cellulose-acetate fibres studied by in-situ SAXS // *Cellulose*. 2023. V. 30. P. 7979–7992. doi: 10.1007/s10570-023-05432-9
- 22 Kim J., Park S., Lee H., Cho D.-K. Environmental assessment of closed-loop solvent recovery in industrial electrospinning // *Green Chemistry*. 2025. V. 27. P. 3898–3909. doi: 10.1039/D5GC01234B
- 23 Liu H., Xu Q., Shi L., Huang M. Multi-scale characterisation of pore architecture in electrospun cellulose-acetate membranes // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2022. V. 346. 112280. doi: 10.1016/j.micromeso.2022.112280
- 24 Al-Saggaf A., Hassan M., Abdelrasoul A. Electrospun nanofibre mats for membrane-electrode assemblies: challenges and outlook // *Journal of Energy Chemistry*. 2025. V. 75. P. 1–18. doi: 10.1016/j.jechem.2024.11.023
- 25 Olsson E., Hedenqvist M., Albertsson A.-C. Cellulose derivatives for proton-exchange membranes: recent developments // *Polymers*. 2024. V. 16. 1526. doi: 10.3390/polym16091526
- 26 Zhang C.-L., Sun W.-J., Li X.-B., Wang Y.-B. Voltage-controlled morphology of cellulose-acetate nanofibres for enhanced proton exchange // *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. V. 140. e53346. doi: 10.1002/app.53346
- 27 Oliveira F., Delgado N., Santos P., Carvalho M. Layer-by-layer surface modification of cellulose-acetate nanofibres for improved PEM durability // *Surface & Coatings Technology*. 2023. V. 457. 129414. doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129414

References

- 1 O'Hayre R., Cha M. Recent roadmap of low-temperature proton exchange membrane fuel cell commercialisation. *Energy & Environmental Science*. 2016. vol. 9. pp. 3354–3380. doi:10.1039/C6EE01617E
- 2 Antolini E. Recent advances in catalyst durability for proton exchange membrane fuel cells. *Applied Catalysis B*. 2019. vol. 254. pp. 338–353. doi:10.1016/j.apcatb.2019.04.005
- 3 Park S., Kim Y., Kim J., Lee H. Degradation issues and mitigation strategies for perfluorosulfonic-acid membranes. *Progress in Polymer Science*. 2017. vol. 67. pp. 1–30. doi:10.1016/j.progpolymsci.2017.07.004
- 4 Raut S., Kumar A., Choudhury N. Thermal and chemical stability limits of PFSA membranes: a review. *Journal of Membrane Science*. 2021. vol. 636. p. 119558. doi: 10.1016/j.memsci.2021.119558
- 5 Yu H., Yang J., Liu B., Chen Z. Strategies to maintain proton conductivity at low relative humidity. *Journal of Power Sources*. 2020. vol. 448. p. 227423. doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227423

- 6 Zhang D., Liu Y., Wu G., Wang X. Recent progress on hydration strategies for proton-exchange membranes. *Electrochimica Acta*. 2022. vol. 403. p. 139648. doi: 10.1016/j.electacta.2021.139648
- 7 Bae B., Kang Y. Nanoscale fillers for PFSA modification: 2015–2023 update. *Small Methods*. 2023. vol. 7. p. 2300361. doi: 10.1002/smt.202300361
- 8 Zhu L., Wang H., Li Q. Functionalised ionic-group membranes beyond Nafion. *Chemical Society Reviews*. 2024. vol. 53. pp. 1872–1916. doi:10.1039/D3CS00671D
- 9 Zhang C.-L., Sun W.-J., Li X.-B., Wang Y.-B. Tree-like cellulose-acetate nanofibre membrane fabricated by one-step electrospinning for proton-exchange fuel cells. *Journal of Membrane Science*. 2022. vol. 642. p. 119997. doi: 10.1016/j.memsci.2021.119997
- 10 Zhang H., Li S., Pang J., Chen X. Micro-block poly(arylene ether sulfone)s with densely quaternised units for anion-exchange membranes. *Journal of Membrane Science*. 2023. vol. 669. p. 121333. doi: 10.1016/j.memsci.2022.121333
- 11 Hao Z., Li M., Wang S., Chen Y. Enhanced proton conductivity of electrospun cellulose-acetate membranes via sulfonated graphene-oxide incorporation. *Journal of Membrane Science*. 2023. vol. 662. p. 121084. doi: 10.1016/j.memsci.2023.121084
- 12 Zhang Y., Zhang C., Wang Y. Recent progress in cellulose-based electrospun nanofibres. *Nanoscale Advances*. 2021. vol. 3. pp. 6040–6047. doi:10.1039/D1NA00479A
- 13 Kang S., Lee J., Kim S., Park H. Effect of acetone/dimethylformamide ratio on jet stability and fibre uniformity during cellulose-acetate electrospinning. *Polymer Testing*. 2023. vol. 118. p. 107922. doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.107922
- 14 Li Z., Huang R., Li X., Zhou K. Core-shell electrospun proton-conducting membranes containing imidazole-grafted cellulose. *Journal of Power Sources*. 2022. vol. 533. p. 231400. doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231400
- 15 Chen L., Zhao Y., Sun G., Wei J. Rheological window for stable needleless electrospinning of cellulose-acetate. *Polymer*. 2022. vol. 255. p. 125034. doi: 10.1016/j.polymer.2022.125034
- 16 Da Silva E., Santos T., Souza F., Alves P. Influence of relative humidity on electrospinning of cellulose-acetate fuel-cell membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. vol. 49. pp. 18702–18713. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.152
- 17 Oliveira P., Tavares L., Costa P., Gonçalves J. Proton-conductive electrospun membranes based on phosphonated cellulose. *Separation and Purification Technology*. 2024. vol. 344. p. 124089. doi: 10.1016/j.seppur.2023.124089
- 18 Zhou X., Li Z., Feng C., Zhang L. Continuous production of aligned cellulose-acetate nanofibres using a rotating collector. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022. vol. 14. pp. 37513–37523. doi: 10.1021/acsami.2c14013
- 19 Singh J.-Y., Patel N., Gupta N., Lee J. Metal-organic-framework-functionalised nanofibre mats for humidity-resilient PEM fuel cells. *Small*. 2024. vol. 20. p. 2401780. doi: 10.1002/sml.202401780
- 20 Liang Q., Chen X., Ma Y., Zhang H. High-throughput multi-jet electrospinning of cellulose-acetate nanofibres for fuel-cell membranes. *Carbohydrate Polymers*. 2024. vol. 318. p. 120964. doi: 10.1016/j.carbpol.2023.120964
- 21 Gao R., Huang Y., Li J., Chen J. Heat-setting behaviour of cellulose-acetate fibres studied by in-situ SAXS. *Cellulose*. 2023. vol. 30. pp. 7979–7992. doi: 10.1007/s10570-023-05432-9
- 22 Kim J., Park S., Lee H., Cho D.-K. Environmental assessment of closed-loop solvent recovery in industrial electrospinning. *Green Chemistry*. 2025. vol. 27. pp. 3898–3909. doi: 10.1039/D5GC01234B
- 23 Liu H., Xu Q., Shi L., Huang M. Multi-scale characterisation of pore architecture in electrospun cellulose-acetate membranes. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2022. vol. 346. p. 112280. doi: 10.1016/j.micromeso.2022.112280
- 24 Al-Saggaf A., Hassan M., Abdelrasoul A. Electrospun nanofibre mats for membrane-electrode assemblies: challenges and outlook. *Journal of Energy Chemistry*. 2025. vol. 75. pp. 1–18. doi: 10.1016/j.jechem.2024.11.023
- 25 Olsson E., Hedenqvist M., Albertsson A.-C. Cellulose derivatives for proton-exchange membranes: recent developments. *Polymers*. 2024. vol. 16. p. 1526. doi: 10.3390/polym16091526
- 26 Zhang C.-L., Sun W.-J., Li X.-B., Wang Y.-B. Voltage-controlled morphology of cellulose-acetate nanofibres for enhanced proton exchange. *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. vol. 140. p. e53346. doi: 10.1002/app.53346
- 27 Oliveira F., Delgado N., Santos P., Carvalho M. Layer-by-layer surface modification of cellulose-acetate nanofibres for improved PEM durability. *Surface & Coatings Technology*. 2023. vol. 457. p. 129414. doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129414

Сведения об авторах

Артём И. Мошков аспирант, центр химической технологии, Университет ИТМО, Кронверкский проспект, дом 49, литера А, Санкт-Петербург, 197101, Россия, moshkov.ai@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2491-2787>

Анита И. Кецо магистрант, центра химической технологии, Университет ИТМО, Кронверкский проспект, дом 49, литера А, Санкт-Петербург, 197101, Россия, anita.ketsko17@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-7358-2840>

Анна Э. Василевская студент, центра химической технологии, Университет ИТМО, Кронверкский проспект, дом 49, литера А, Санкт-Петербург, 197101, Россия, avasilevkaya@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0006-7826-7751>

Алина А. Пономарева к.т.н., доцент, центра химической технологии, Университет ИТМО, Кронверкский проспект, дом 49, литера А, Санкт-Петербург, 197101, Россия, aaronomareva@itmo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1651-8045>

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 I. Moshkov graduate student, Chemical Engineering Center, ITMO University, 49 Kronverksky pr., lit. A, St Petersburg 197101, Russia, moshkov.ai@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2491-2787>

Anita I. Ketsko master's student, Chemical Engineering Center, ITMO University, 49 Kronverksky pr., lit. A, St Petersburg 197101, Russia, anita.ketsko17@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-7358-2840>

Anna E. Vasilevskaya student, Chemical Engineering Center, ITMO University, 49 Kronverksky pr., lit. A, St Petersburg 197101, Russia, avasilevkaya@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0006-7826-7751>

Alina A. Ponomareva Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, chemical engineering center, ITMO University, 49 Kronverksky pr., lit. A, St Petersburg 197101, Russia, aaronomareva@itmo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1651-8045>

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 11/04/2025	После редакции 18/05/2025	Принята в печать 20/05/2025
Received 11/04/2025	Accepted in revised 18/05/2025	Accepted 20/05/2025

Исследование содержания золота и платины в руде месторождения Мако (Сенегал)

Сабухи И. Нифталиев	¹	sabukhi@gmail.com	 0000-0001-7887-3061
Ирина В. Кузнецова	¹	kuznetsovaiv@mail.ru	 0000-0001-6666-6292
Виктор М. Ненахов	²	nenakhov@geol.vsu.ru	 0000-0003-1439-0970
Амаду Диалло	³	amadiallo91@gmail.com	 0009-0007-4339-2744
Елена М. Горбунова	¹	lobanova8686@gmail.com	 0000-0002-3550-0115
Валерия Р. Губанова	¹	lerchonok.99@mail.ru	 0009-0002-0350-504X

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

2 Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1 г. Воронеж, 394018, Россия

3 Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, 153000, Россия

Аннотация. Статья посвящена проблеме определения золота и платины в руде Сенегальского месторождения. Проведено исследование содержания золота и платины в рудах месторождения Мако (Сенегал) для оценки потенциала этого месторождения для дальнейшей добычи и переработки. В работе использовались методы геохимического анализа, включая геохимию образцов, рентгеновскую дифракцию и спектральный анализ, а также геофизические методы. При нагревании руды до 1250 °C был обнаружен только один эндотермический эффект (571,14–593,31 °C), сопровождающийся небольшой потерей массы. Измельчённую руду разделили на 5 фракций гравитационным методом. В тяжёлой фракции были обнаружены магнитные и немагнитные материалы. Промышленный продукт содержит только немагнитные материалы. Лёгкая фракция представляет собой глину. Кремнезём был обнаружен во фракции с размером частиц более 0,5 мм. Содержание металлов определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Перед измерением содержания металлов в растворах были проведены контрольные измерения содержания золота в стандартном растворе. В каждой фракции исследуемой руды были обнаружены и золото, и платина. Наибольшее количество золота и платины содержится в глинистой фракции (0,5 и 25,7 г/т соответственно). Наименьшее количество — в лёгкой фракции (0,065 и 0,26 г/т). Количество платины превышает содержание золота в продуктах гравитационного обогащения. Сделаны выводы о присутствии золота в руде в тонкодисперсном состоянии. Традиционный метод цианидного обогащения драгоценных металлов не подходит для выделения тонкодисперсного золота. Необходим поиск новых альтернативных, инновационных методов обогащения сенегальской руды.

Ключевые слова: золото, платина, атомно-адсорбционный анализ, руда, термический анализ, гравитационный метод.

Investigation of gold and platinum in ore from Mako deposit (Senegal)

Sabukhi I. Niftaliev	¹	sabukhi@gmail.com	 0000-0001-7887-3061
Irina V. Kuznetsova	¹	kuznetsovaiv@mail.ru	 0000-0001-6666-6292
Victor M. Nenakhov	²	nenakhov@geol.vsu.ru	 0000-0003-1439-0970
Amadou Diallo	³	amadiallo91@gmail.com	 0009-0007-4339-2744
Elena M. Gorbunova	¹	lobanova8686@gmail.com	 0000-0002-3550-0115
Valeria R. Gubanova	¹	lerchonok.99@mail.ru	 0009-0002-0350-504X

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

2 Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russia

3 Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

Abstract. A study of the gold and platinum content in the ores of the Mako deposit (Senegal) was conducted to assess the potential of this deposit for further extraction and processing. The work used methods of geo-chemical analysis, including geochemistry of samples, X-ray diffraction and spectral analysis, as well as geophysical methods. When the ore was heated to 1250 °C, only one endothermic effect was found (571.14–593.31 °C), accompanied by a slight loss of mass. Ground ore was divided into 5 fractions by the gravitational method. Magnetic and non-magnetic materials found in the heavy fraction. The industrial product contains only non-magnetic materials. The light fraction is clay. The silica was found in the fraction with a particle size of more than 0.5 mm. The metal content was determined by atomic absorption method. Before measuring the metal content in solutions, control measurements of the gold content in the standard solution were carried out. In each fraction of the studied ore, both gold and platinum were found. The largest amount of gold and platinum is in the clay fraction (0.5 and 25.7 g / t, respectively). The smallest - in the light fraction (0.065 and 0.26 g / t). The amount of platinum exceeds the gold content in the products of gravity separation. Conclusions are drawn about the presence of gold in the ore in a finely divided state. The traditional method of cyanide separation of precious metals is not suitable for the isolation of finely divided gold. A search is needed for new alternative, innovative methods for the separation of Senegal ore.)

Keywords: vibrational spectra, molecular structure, electron diffraction analysis, quantum-chemical calculations.

Для цитирования

Нифталиев С.И., Кузнецова И.В., Ненахов В.М., Диалло А., Горбунова Е.М., Губанова В.Р. Исследование содержания золота и платины в руде месторождения Мако (Сенегал) // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 165–170. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-165-170

For citation

Niftaliev S.I., Kuznetsova I.V., Nenakhov V.M., Diallo A., Gorbunova E.M., Gubanova V.R. Investigation of gold and platinum in ore from Mako deposit (Senegal). Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 165–170. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-165-170

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

Введение

Западная Африка обладает большим запасом полезных ископаемых, таких как фосфаты, золото, циркон, известняк, платина, железная руда. Согласно исследованиям авторов [1–7], данные, собранные в Западной Африке, подчеркивают разнообразную природу орогенных месторождений золота. Данные типы рудного месторождения могут образовываться из различных источников флюидов, как метаморфических, так и магматических.

Сабодальское месторождение золота восточной части Сенегала было открыто французским институтом геологических и горных исследований (BRGM) в 1961 году. Это месторождение находится на поясе Мако Гринстоун, в западной части Биримианской золотой провинции [8].

Золотоносные руды восточной части Сенегала состоят из известняков, перекрытых более молодыми осадочными породами, которые включают арсенит и алевролит. Основная часть рудного запаса размещается в пределах зоны распространения хрупкого и пластичного растяжения в поперечном направлении шириной от 10 до 50 м, определяемой как зона сдвига Садиола [8, 9].

Многие структурные и технологические особенности руд в настоящее время являются предметом интенсивного изучения [10–14]. В области технологии учитываются как традиционные подходы (цианирование [15]), так и перспективные инновационные способы извлечения золота с помощью биотехнологии [16,17]; гидрохлорирования [18]. Авторы [19, 20] рассматривают ряд металлургических процессов по извлечению платиновых металлов. Отмечается, что такие методы, как обжиг и выщелачивание руды под давлением являются капиталоемкими и экологически вредными. и механизмы кислотно-го выщелачивания вышеупомянутых платиносодержащих минералов варьируются и могут быть улучшены путем изменения условий выщелачивания или предварительной обработки руд / концентратов (например, механической активации). Тем не менее, минералогия каждого месторождения ставит свои собственные задачи, связанные с уникальной структурой руды.

Однако потенциал добычи золота и благородных металлов в основном используется недостаточно [15].

В связи с этим актуальным является исследование состава руды Сенегала с целью определения содержания в ней благородных металлов Au, Pt для выбора метода их извлечения.

Материалы и методы

Руда была предварительно измельчена на щековой и валковой дробилке золотодобывающего предприятия «Toro gold» Сенегала. Конечный диаметр измельчения частиц пробы 0,074 мм, конечный вес пробы 435 г.

Термический анализ образца был проведен при нагревании до 1250 °С в алюминиевых тиглях со скоростью 10 К/мин. в атмосфере азота на приборе синхронного термического анализа Netzsch STA 449 F1 Jupiter.

Измельченную руду разделили на 5 фракций гравитационным методом на концентрационном столе (рисунок 1).

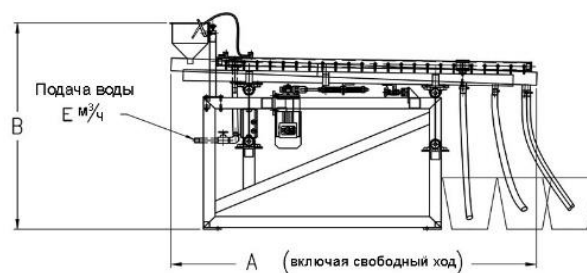


Рисунок 1. Концентрационный стол "ДЖЕМЕНИ"

Figure 1. Concentration table "JAMENI"

Концентрационный стол предназначен для мокрого гравитационного обогащения и имеет двойную зеркально отображенную поверхность для сепарации. С одного конца подается молотая руда, она движется по направлению к разгрузочному краю деки с помощью возвратно-поступательных движений, создаваемых приводом. На каждой половине деки разгружаются 4 фракции: суперконцентрат, концентрат, промпродукт и хвосты. Большая часть воды разгружается во фракцию с хвостами. На деке имеются желобки, в которых задерживаются частицы золота и направляются в прилегающие концентратные желобки, лежащие вдоль каждой половины деки. Каналы расположены на концах каждого концентратного желобка, и разгрузка осуществляется в продуктовые коробки.

Минералогический состав продуктов обогащения определяли методом оптической микроскопии (микроскоп «Olympus»).

Содержание металла в каждой фракции определялось атомно-абсорбционным методом с помощью атомно-абсорбционного спектрометра «КВАНТ-Z.ЭТА-1».

Помимо стандартных калибровочных процедур перед измерением содержаний золота в растворах были проведены контрольные

измерения содержания золота в растворе эталона. Эталонные образцы готовили растворением золота или платины в царской водке для получения растворов с концентрацией 51–55 мкг/л. Замеры на эталоне показали высокую воспроизводимость результатов, низкий показатель среднего квадратичного отклонения (СКО) менее 2,0 и его малую ошибку (ОСКО 3,5%), что указывает на высокую надежность измерений.

Результаты и обсуждение

По данным термического анализа в интервале температур 571,14–593,31 °С присутствует небольшой эндотермический эффект ($q = 1,409$ Дж/г) с малой потерей массы 0,06%, соответствующий процессу разложения материалов (удаление остаточной влаги, органики и др.). Больше никаких эффектов при нагревании руды до 1250 °С не обнаружено (рисунок 2).

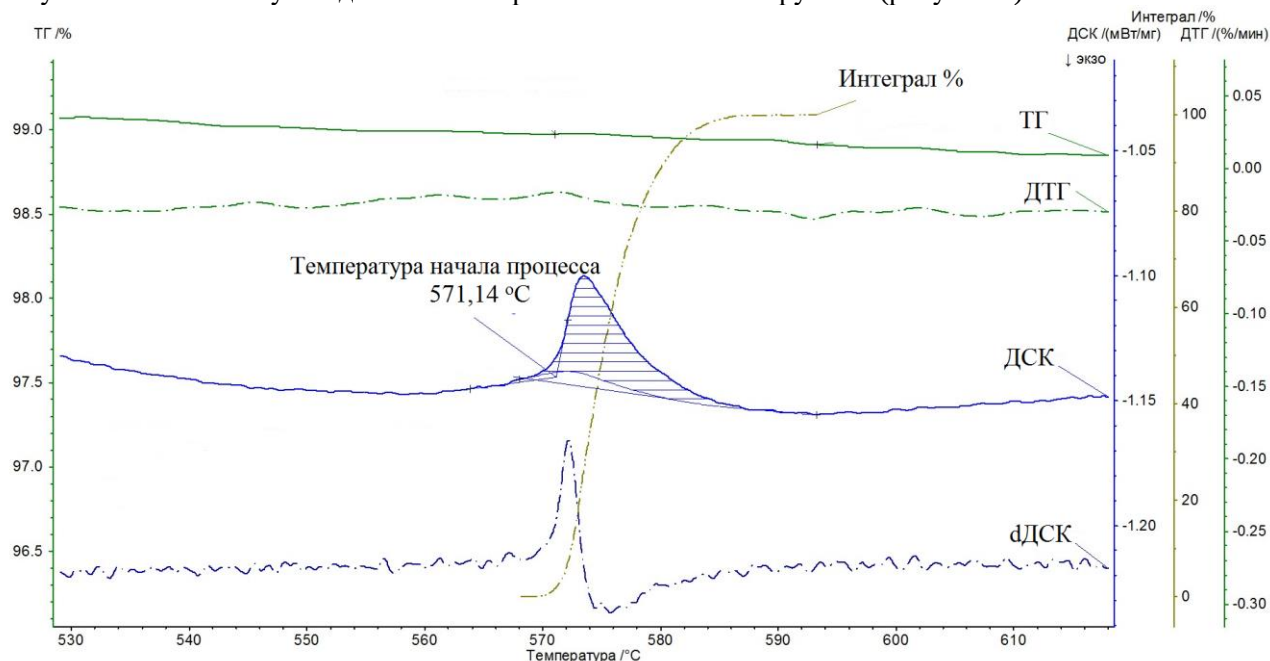


Рисунок 2. Термический анализ руды

Figure 2. Thermal analysis of ore

В результате разделения руды гравитационным методом получили пять фракций: тяжелую фракцию черного цвета $\omega = 1.825\%$; промпродукт коричневого цвета $\omega = 11.485\%$; легкую фракцию белого цвета $\omega = 32.388\%$; глинистую $\omega = 17.629\%$; фракцию с размером частиц больше 0.5 мм $\omega = 36.673\%$.

По результатам оптической микроскопии в состав руды входят следующие минералы:

циркон $ZrSiO_4$; апатит $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$; рутил TiO_2 ; алюмосиликат $Al_2 Si_3 O_5$; магнетит $Fe_3 O_4$; железосодержащие минералы $FeTiO_3$; $Cr[FeAl]_2 O_4$; $FeAl_4[SiO_4]_2 O_2(OH)_2$ (таблица 1).

Для определения содержания золота и платины атомно-адсорбционным методом каждую фракцию растворили в царской водке. Результаты анализа на содержание металлов представлены в таблице 2.

Таблица 1.

Минеральный состав продуктов обогащения на концентрационном столе "JAMENI"

Table 1.

Mineral composition of enrichment products on the concentration table "JAMENI"

Фракционный состав руды Fractional composition of ore	Минералогический состав руды Mineralogical composition of the ore
Тяжелая фракция Heavy fraction	Сильно магнитный минерал Fe_3O_4 Strongly magnetic mineral Fe_3O_4
	Немагнитные минералы TiO_2 , $ZrSiO_4$, $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$ Non-magnetic minerals TiO_2 , $ZrSiO_4$, $Ca_5(RO_4)_3(OH, Cl, F)$
	Электромагнитные минералы $FeTiO_3$, $Cr[FeAl]_2 O_4$ Electromagnetic minerals $FeTiO_3$, $Cr[FeAl]_2 O_4$
Промпродукты Industrial products	Немагнитные минералы SiO_2 , $ZrSiO_4$, $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$ Non-magnetic minerals SiO_2 , $ZrSiO_4$, $Ca_5(RO_4)_3(OH, Cl, F)$
Легкая фракция Light fraction	Глина Clay
Фракция > 0,5 мм Fraction > 0.5 mm	Кристаллы SiO_2 SiO_2 crystals

Таблица 2.

Результаты анализа на содержание золота и платины в продуктах обогащения

Table 2.

The results of the analysis for the content of gold and platinum in the products of enrichment

Фракционный состав руды Fractional composition of ore	Масса вещества, г Weight of substance, g	Объем раствора царской водки, мл Volume of tsar's vodka solution, ml	Au, мкг/л	Pt, мкг/л	Au, г/т	Pt, г/т
Тяжелая фракция Heavy fraction	3.00	15	39.900	225.000	0.200	1.120
Промпродукт	0.94	5	29.900	55.700	0.160	0.300
Легкая фракция	0.60	3	104.210	514.100	0.520	25.700
Промпродукты Industrial products	1.00	3	92.311	514.100	0.270	15.420

Наибольшее количество золота и платины обнаружено в легкой фракции (0.52 и 25.7 г/т), наименьшее – в промпродуктах (0.16 и 0.30 г/т). Платина присутствует в каждой фракции исследуемой руды в количествах, превышающих содержание золота. Заметное количество частиц металла представлено в тонкодисперсном состоянии, так как находится в легкой фракции в больших количествах, чем в тяжелой фракции и промпродуктах.

Известно, что высокая удельная поверхность глин (каолинов), входящих в состав легкой фракции, способствует сорбции мелкодисперсного золота с формой частиц предположительно в виде тонких пластинок. Этот факт существенно

усложняет возможность извлечения золота традиционной технологией цианирования [10]. Для выделения золота и платины из руды Сенегала необходимо тонкое измельчение материала и применение новых технологий переработки руды.

Заключение

Проведен физико-химический анализ руды месторождения Мако (Сенегал). Определен минералогический и фракционный состав. Легкая глинистая фракция содержит наибольшее количество золота и платины по сравнению с тяжелой фракцией и промпродуктом. Для извлечения драгоценных металлов из руды необходимо использование новых инновационных технологий.

Литература

- 1 Lawrence D., Treloar P., Rankin A. The geology and mineralogy of the Loulo mining district, Mali, West Africa: Evidence for two distinct styles of orogenic gold mineralization // *Economic Geology*. 2013. V. 108. № 2. P. 199–227. doi: 10.2113/econgeo.108.2.199
- 2 Treloar P.J., Lawrence D.M., Senghor D., Boyce A. et al. The Massawa gold deposit, Eastern Senegal, West Africa: an orogenic gold deposit sourced from magmatically derived fluids? // *Geological Society of London, Special Publications*. 2016. V. 393. № 1. P. 135–160. doi: 10.1144/SP393.12
- 3 Masurel Q., Miller J.M., Hein K.A., Hanssen E. et al. The Yatela gold deposit in Mali, West Africa: The final product of a long-lived history of hydrothermal alteration and weathering // *Journal of African Earth Sciences*. 2016. V. 113. P. 73–87. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2015.10.006
- 4 Lebrun E., Thébaud N., Miller J. et al. Mineralisation footprints and regional timing of the world-class Siguiri orogenic gold district (Guinea, West Africa) // *Miner Deposita*. 2017. V. 52. P. 539–564. doi: 10.1007/s00126-016-0684-6
- 5 Tshibubudze A., Hein K. Gold mineralisation in the Essakane goldfield in Burkina Faso, West African craton // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 78. P. 652–659. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.030
- 6 Lawrence D., Lambert-Smith J., Treloar P. A review of gold mineralization in Mali // *Mineral Deposits of North Africa*. 2016. P. 327–351. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.08.008
- 7 Goldfarb R.J., André-Mayer A., Jowitt S.M., Mudd G.M. West Africa: The World's Premier Paleoproterozoic Gold Province // *Economic Geology*. 2017. V. 112. № 1. P. 123–143. doi: 10.2113/econgeo.112.1.123
- 8 Sylla S., Gueye M., Ngom P. New Approach of Structural Setting of Gold Deposits in Birimian Volcanic Belt in West African Craton: The Example of the Sabodala Gold Deposit, SE Senegal // *International Journal of Geosciences*. 2016. V. 7. № 5. P. 440–458. doi: 10.4236/ijg.2016.73034
- 9 Masurel Q., Thébaud N., Miller J., Ulrich S. et al. Sadiolla Hill: A world-class carbonate-hosted gold deposit in Mali, West Africa // *Economic Geology*. 2017. V. 112. № 1. P. 23–47. doi: 10.2113/econgeo.112.1.23
- 10 Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 2. С. 204–218.
- 11 Surimbayev B., Akcil A., Bolotova L., Shalgymbayev S. et al. Processing of Refractory Gold-Bearing Sulfide Concentrates: A Review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2023. V. 45. № 8. P. 573–591. doi: 10.1080/08827508.2023.2230344
- 12 Askarova G.Y., Shautenov M.R., Nogaeva K.A. Optimization of the combined beneficiation scheme and increase in the performance of highly efficient refractory gold-bearing ores under development // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1047. № 1. 012036. doi: 10.1088/1757-899X/1047/1/012036
- 13 Захаров Б.А., Меретуков М.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Руда и Металлы, 2013. 451 с.

- 14 Кондратьева Т.Ф. Биотехнология получения благородных и цветных металлов: состояние и перспективы // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2009. Т. 5. № 1. С. 49–62.
- 15 Logan T.C., Seal T.S., Brierley J.A. Whole-ore biooxidation of sulfidic gold – bearing ores // *Biomining*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 113–138. doi: 10.1007/978-3-540-34911-2_6
- 16 Горланов В.В., Харламова Т.А. Интенсификация процесса выщелачивания с применением метода гидрохлорирования // Научный вестник МГТУ. 2013. № 2 (35). С. 57–63.
- 17 Mpinga Ceksteen J., Aldrich C. Direct leach approaches to Platinum Group Metal (PGM) ores and concentrates: A review // *Minerals Engineering*. 2015. V. 78. P. 93–113. doi: 10.1016/j.mineng.2015.04.015
- 18 Seisembayev R., Kozhakhmetov S., Kvyatkovsky S.A., Semenova A.S. Extraction of Gold from Refractory Gold-Bearing Ores by Means of Reducing Pyrometallurgical Selection // *Metallurgist*. 2020. V. 64. № 7-8. P. 788–795. doi: 10.1007/s11015-020-01055-z
- 19 Moh Ezeldin, Alsiddiq Osama. Determination of gold concentration in quartz rock samples by using atomic absorption spectrophotometer technique // *IJRCD*. 2015. V. 2. № 1. P. 78–80.
- 20 Grayson R.F. Fine Gold Recovery – Alternatives to Mercury and Cyanide Purpose of study // *World Placer Journal*. 2007. V. 7. P. 66–161.

References

- 1 Lawrence D., Treloar P., Rankin A. et al. The geology and mineralogy of the Ioulo mining district, Mali, West Africa: Evidence for two distinct styles of orogenic gold mineralization. *Economic Geology*. 2013. vol. 108. no. 2. pp. 199–227. doi: 10.2113/econgeo.108.2.199
- 2 Treloar P.J., Lawrence D.M., Senghor D., Boyce A. et al. The Massawa gold deposit, Eastern Senegal, West Africa: an orogenic gold deposit sourced from magmatically derived fluids? *Geological Society of London, Special Publications*. 2016. vol. 393. no. 1. pp. 135–160. doi: 10.1144/SP393.12
- 3 Masurel Q., Miller J.M., Hein K.A., Hanssen E. et al. The Yatela gold deposit in Mali, West Africa: The final product of a long-lived history of hydrothermal alteration and weathering. *Journal of African Earth Sciences*. 2016. vol. 113. pp. 73–87. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2015.10.006
- 4 Lebrun E., Thébaud N., Miller J. et al. Mineralisation footprints and regional timing of the world-class Siguiri orogenic gold district (Guinea, West Africa). *Mineralium Deposita*. 2017. vol. 52. pp. 539–564. doi: 10.1007/s00126-016-0684-6
- 5 Tshibubudze A., Hein K. Gold mineralisation in the Essakane goldfield in Burkina Faso, West African craton. *Ore Geology Reviews*. 2016. vol. 78. pp. 652–659. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.030
- 6 Lawrence D., Lambert-Smith J., Treloar P. A review of gold mineralization in Mali. *Mineral Deposits of North Africa*. 2016. pp. 327–351. doi: 10.1007/978-3-319-31733-5_13
- 7 Goldfarb R.J., André-Mayer A., Jowitt S.M., Mudd G.M. et al. West Africa: The World's Premier Paleoproterozoic Gold Province. *Economic Geology*. 2017. vol. 112. no. 1. pp. 123–143. doi: 10.2113/econgeo.112.1.123
- 8 Sylla S., Gueye M., Ngom P. New Approach of Structural Setting of Gold Deposits in Birimian Volcanic Belt in West African Craton: The Example of the Sabodala Gold Deposit, SE Senegal. *International Journal of Geosciences*. 2016. vol. 7. no. 3. pp. 440–458. doi: 10.4236/ijg.2016.73034
- 9 Masurel Q., Thébaud N., Miller J., Ulrich S. et al. Sadiolla Hill: A world-class carbonate-hosted gold deposit in Mali, West Africa. *Economic Geology*. 2017. vol. 112. no. 1. pp. 23–47. doi: 10.2113/econgeo.112.1.23
- 10 Komogortsev B.V., Varenichev A.A. The problems of processing poor and insistent gold-bearing ores. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten*. 2016. no. 2. pp. 204–218. (in Russian)
- 11 Surimbayev B., Akcil A., Bolotova L., Shalgymbayev S. et al. Processing of Refractory Gold-Bearing Sulfide Concentrates: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2023. vol. 45. no. 8. pp. 573–591. doi: 10.1080/08827508.2023.2230344
- 12 Askarova G.Y., Shautenov M.R., Nogaeva K.A. Optimization of the combined beneficiation scheme and increase in the performance of highly efficient refractory gold-bearing ores under development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. vol. 1047. no. 1. pp. 012036. doi: 10.1088/1757-899X/1047/1/012036 (in Russian)
- 13 Zakharov B.A., Meretukov M.A. Gold: refractory ores. Moscow: Ruda i Metally, 2013. 451 p. (in Russian)
- 14 Kondratyeva T.F. Biogeotechnological obtain noble and non-ferrous metals: status and prospects. *Bulletin of Biotechnology and Physico-Chemical Biology named after Yu. A. Ovchinnikova*. 2009. vol. 5. pp. 49–62. (in Russian)
- 15 Logan T.C., Seal T.S., Brierley J.A. Whole-ore biooxidation of sulfidic gold – bearing ores. *Biomining*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. pp. 113–138. doi: 10.1007/978-3-540-34911-2_6
- 16 Gorlanov V.V., Kharlamova T.A. Identification of the leaching process using the hydrochlorination method. *Nauchnyi Vestnik MGTU*. 2013. no. 2 (35). pp. 57–63. (in Russian)
- 17 Mpinga Ceksteen J., Aldrich C. Direct leach approaches to Platinum Group Metal (PGM) ores and concentrates: A review. *Minerals Engineering*. 2015. vol. 78. pp. 93–113. doi: 10.1016/j.mineng.2015.04.015
- 18 Seisembayev R., Kozhakhmetov S., Kvyatkovsky S.A., Semenova A.S. et al. Extraction of Gold from Refractory Gold-Bearing Ores by Means of Reducing Pyrometallurgical Selection. *Metallurgist*. 2020. vol. 64. no. 7-8. pp. 788–795. doi: 10.1007/s11015-020-01055-z (in Russian)
- 19 Ezeldin M., Osama A. Determination of gold concentration in quartz rock samples by using atomic absorption spectrophotometer technique. *International Journal of Research and Chemical Development*. 2015. vol. 2. no. 1. pp. 78–80.
- 20 Grayson R.F. Fine Gold Recovery – Alternatives to Mercury and Cyanide Purpose of study. *World Placer Journal*. 2007. vol. 7. pp. 66–161/

Сведения об авторах

Сабухи И. Нифталиев д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sabukhi@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

Ирина В. Кузнецова к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kuznetsovaiv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6666-6292>

Виктор М. Ненахов д.г.-м.н., профессор, кафедра общей геологии и геодинамики, Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394006, Россия, nenakhov@geol.vsu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1439-0970>

Амаду Диалло аспирант, кафедра неорганической химии, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, 153000, Россия, amadiallo91@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-4339-2744>

Елена М. Горбунова к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lobanova8686@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>

Валерия Р. Губанова ассистент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lerchonok.99@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-0350-504X>

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

Sabukhi I. Niftaliev Dr. Sci. (Chem.), professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sabukhi@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

Irina V. Kuznetsova Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuznetsovaiv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6666-6292>

Victor M. Nenakhov PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Professor, general geology and geodynamics department, Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russia, nenakhov@geol.vsu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1439-0970>

Amadou Diallo graduate student, inorganic chemistry department, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia, amadiallo91@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-4339-2744>

Elena M. Gorbunova Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lobanova8686@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>

Valeria R. Gubanova assistant, Inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lerchonok.99@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-0350-504X>

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 11/04/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2025
Received 11/04/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2025

Разработка гигиенического моющего средства для тела

Ирина Д. Щеголева ¹	shegoleva.id@yandex.ru	 0000-0003-2835-345x
Екатерина Р. Вольнова ¹	volnovaer@mgupp.ru	 0000-0002-0015-446x
Александр Е. Ергиев ¹	alekcaedre@gmail.com	

¹ Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Россия

Аннотация. Настоящая статья посвящена разработке инновационного гигиенического моющего средства для тела, не требующего смывания водой, что является актуальной задачей в условиях дефицита водных ресурсов и необходимости специального ухода за малоподвижными больными. Авторы отмечают недостаточность ассортимента такой продукции на российском рынке и отсутствие соответствующих научных публикаций в отечественной литературе. Целью работы стало создание средства с высокими органолептическими и функциональными свойствами. На основе анализа существующих аналогов была составлена базовая рецептура, включающая мягкие поверхностно-активные вещества (ПАВ), регулятор pH, увлажнитель, консервант и воду. Для повышения эффективности и безопасности в состав были введены биологически активные компоненты: пантенол, масло шиповника, масло авокадо и эфирное масло ромашки. Ключевой задачей исследования стала стабилизация эмульсионной структуры, нарушенной из-за введения масляных фракций. Для этого изучалось влияние различных загустителей и эмульгаторов: ксантановой камеди, ПЭГ 120 и карбомера. Экспериментальным путем установлено, что наилучшие результаты достигаются при использовании 2% ксантановой камеди или бинарной смеси ксантановой камеди и ПЭГ 120. Данные композиции позволили получить стабильный эмульсионный гель с оптимальной вязкостью, однородной текстурой, хорошей очищающей способностью и легкой удаляемостью салфеткой. Органолептическая оценка подтвердила превосходство опытных образцов над контрольными, особенно образца с бинарной смесью загустителей. Таким образом, разработанное средство представляет собой перспективную альтернативу традиционным моющим продуктам, сочетая эффективное очищение с уходом за кожей и экономией воды.

Ключевые слова: моющий эмульсионный гель для тела, сухой душ, рецептура, поверхностно-активное вещество, биологически активные ингредиенты, загуститель, органолептические и функциональные свойства.

Development of a hygienic body wash

Irina D. Shchegoleva ¹	shegoleva.id@yandex.ru	 0000-0003-2835-345x
Ekaterina R. Volnova ¹	volnovaer@mgupp.ru	 0000-0002-0015-446x
Alexander E. Ergiev ¹	alekcaedre@gmail.com	

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

Abstract. This article is devoted to the development of an innovative hygienic detergent for the body that does not require rinsing with water, which is an urgent task in conditions of water scarcity and the need for special care for sedentary patients. The authors note the insufficient range of such products on the Russian market and the lack of relevant scientific publications in the domestic literature. The aim of the work was to create a product with high organoleptic and functional properties. Based on the analysis of existing analogues, a basic formulation was compiled, including mild surfactants (surfactants), a pH regulator, a humidifier, a preservative and water. To increase the effectiveness and safety, biologically active ingredients were introduced into the composition: panthenol, rosehip oil, avocado oil and chamomile essential oil. The key objective of the study was to stabilize the emulsion structure, which was disrupted due to the introduction of oil fractions. For this purpose, the effect of various thickeners and emulsifiers was studied: xanthan gum, PEG 120 and carbomer. It has been experimentally established that the best results are achieved when using 2% xanthan gum or a binary mixture of xanthan gum and PEG 120. These compositions made it possible to obtain a stable emulsion gel with optimal viscosity, uniform texture, good cleaning ability and easy removal with a napkin. The organoleptic evaluation confirmed the superiority of the experimental samples over the control ones, especially the sample with a binary mixture of thickeners. Thus, the developed product represents a promising alternative to traditional detergents, combining effective cleansing with skin care and water conservation.

Keywords: washing emulsion gel for body, dry shower, recipe, surfactant, biologically active ingredients, thickener, organoleptic and functional properties.

Введение

Косметико-гигиеническая моющая продукция представляет значительную часть химических технологий. Согласно ГОСТ 31696–2012 [1], к этой группе относят шампуни, жидкое мыло, гели для душа и т. д. В настоящее время спрос

на жидкие косметические моющие средства выше, чем на твердое мыло [2–4]. Очищающей основой моющих средств являются водные растворы поверхностно-активных веществ [1, 3, 5, 6]. Имея сочетание в молекуле полярной и неполярной частей, ПАВ способны снижать межфазную энергию, удалять из воды различные

Для цитирования

Щеголева И.Д., Вольнова Е.Р., Ергиев А.Е. Разработка гигиенического моющего средства для тела // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 171–179. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-171-179

For citation

Shchegoleva I.D., Volnova E.R., Ergiev A.E. Development of a hygienic body wash. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 171–179. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-171-179

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

компоненты. Благодаря уникальной структуре и характеристикам ПАВ гидрофобные соединения, присутствующие в избытке кожного сала и других загрязнениях на поверхности кожи, смываются легче, чем это можно было бы сделать с помощью одной только воды [3, 5, 6]. Кроме ПАВ, в моющие средства могут входить специальные добавки, улучшающие потребительские свойства. Для большинства моющих средств установлены высокие требования к пенообразованию и устойчивости пены [1], поэтому после применения остатки средства смывают водой. Обычные моющие средства требуют значительного расхода воды, что создает проблемы в условиях дефицита водных ресурсов или в других ситуациях, ограничивающих использование воды, например, для лежачих больных.

Текущая тенденция в технологии косметических гигиенических средств привела к созданию моющих продуктов, не требующих смывания водой [7–9]. Такие изделия выпускаются в форме гелей, пенки, спреев и специальных одноразовых салфеток или губок, пропитанных моющим средством. Первые продукты категории «dry shower» («сухой душ») появились за рубежом в 2000-х годах [7, 9, 10]. Популярность их среди потребителей растет. Применение моющего средства состоит в его нанесении на кожу, взбивании в пену, адсорбирующую загрязнения, затем удалении остатков пены чистым сухим полотенцем или салфеткой. Возможно перед применением разбавить порцию моющего средства небольшим количеством воды. Таким образом, косметико-гигиенические моющие средства, не требующие смывания водой (КГМС), составляют новую группу моющих средств с особыми требованиями к составу и функциональным характеристикам. Проведенный нами анализ показал, что на российском рынке продукция данной группы представлена недостаточно – не более 5–6 наименований, преимущественно в онлайн-маркетах. В доступной отечественной научно-технической литературе публикации на эту тему отсутствуют. За рубежом гигиенические моющие средства, не требующие смывания водой, используются в медицинских учреждениях при уходе за малоподвижными больными. Исследования голландских ученых, обобщающие большой статистический материал, показали, что применяемые гигиенические средства без смывания водой не уступают в эффективности традиционной гигиене [9]. К аналогичным выводам пришли и другие авторы – мытье без воды, применяемое как частичная замена обычного душа, защищает кожные покровы от повреждений; затраты на подготовку и проведение этих процедур не отличаются от затрат на традиционное

купание лежачих больных в медицинских учреждениях [10, 11]. Таким образом, мытье без воды может быть альтернативой обычного приема душа [9, 10, 11].

Учитывая растущую заинтересованность населения в косметико-гигиенических моющих средствах, не требующих смывания водой, и очевидную недостаточность ассортимента этой продукции, разработка нового изделия с улучшенными потребительскими характеристиками является актуальной.

Цель работы – разработка косметико-гигиенического моющего средства для тела, не требующего смывания водой, обладающего высокими органолептическими и функциональными характеристиками. В рамках обозначенной цели был проведен отбор ингредиентов для базовой рецептуры КГМС, подготовлены и проанализированы базовые образцы КГМС, проведены исследования по оптимизации состава продукта и его соответствия заявляемым характеристикам.

Материалы и методы

Объектами исследований были образцы косметико-гигиенических моющих средств для тела, не требующих смывания водой, полученные в лабораторных условиях из следующих ингредиентов:

– поверхностно-активные вещества: кокоглюкозид (страна-изготовитель – Китай); алкилполиглюкозид C8-C10 (страна-изготовитель – Китай); кокаmidопропил бетаин (страна-изготовитель – Малайзия); кислота лимонная моногидрат пищевая (изготовитель – ООО «Стандарт», Россия); глицерин пищевой (страна-изготовитель – Германия); бензоат натрия (изготовитель – ООО «ХИМСТОР», Россия);

– биологически активные ингредиенты: пантенол (изготовитель – ГК «Нижфарм», Россия); масло шиповника косметическое с витаминно-антиоксидантным комплексом (изготовитель – ООО «АромаМарка», Россия); масло авокадо рафинированное (страна-изготовитель – Германия); эфирное масло ромашки Римской (изготовитель – ООО «ВИПЛЮС», Россия); загустители и эмульгаторы: ксантановая камедь (страна-изготовитель – Китай); карбомер (страна-изготовитель – Китай); ПЭГ 120 диолеат метил глюкозы (страна-изготовитель – Китай); вода очищенная.

Образцы КГМС готовили в следующем порядке: взвешивали рецептурные компоненты; сухую лимонную кислоту растворяли в небольшом количестве воды (в соотношении 1:10). В варочный аппарат загружали оставшуюся воду, включали нагрев, температуру воды доводили до 55–60° С, затем при медленном перемешивании последовательно вводили

кокоглюкозид, алкилполиглицозид С8-С10, кокамидопропил бетаин. После образования однородной смеси ее температуру снижали до 30 °С и в смесь последовательно, при перемешивании, добавляли глицерин, пантенол, масло шиповника, масло авокадо, эфирное масло ромашки. раствор лимонной кислоты, бензоат натрия. Осуществляли гомогенизацию до образования однородной массы, охлаждали до комнатной температуры и отбирали пробу готового продукта для проведения органолептического и физико-химического анализа.

Методы исследований. Органолептические показатели (внешний вид, цвет, запах), определяли методами ГОСТ 29188.0–2014 [12], активную кислотность рН-методом ГОСТ 29188.2–91 [13]. Вязкость измеряли на ротационном вискозиметре марки Fungilab (Испания) в единицах измерения $\text{mPa}\cdot\text{s}$. Коллоидную устойчивость определяли визуально по расслоению фаз; при появлении признаков расслоения в период от 1 до 90 дней образец оценивали как «нестабильный». Дополнительно оценивали потребительские свойства – равномерность нанесения на кожу, липкость на коже, очищающую способность, полноту удаления средства салфеткой после применения. Математическую обработку экспериментальных данных проводили при помощи программного пакета Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Эффективность гигиенических моющих средств определяется подбором рецептурных ингредиентов, которые должны одновременно решать несколько задач – очищать кожу от разных типов загрязнений, не вызывать раздражение и сухость кожи, улучшать состояние кожи за счет питательного, противовоспалительного, увлажняющего и других воздействий, иметь удобную для применения консистенцию, обеспечивать стабильность готового продукта при хранении.

Отбор ингредиентов для базовой рецептуры КГМС проводили исходя из анализа составов моющих средств для тела без смывания водой, представленных на российском рынке. В настоящее время основными производителями данной продукции являются ООО «Эльффарма» г. Москва (продукт: «Сухой душ» пенка очищающая для гигиены тела) и ООО ПК «Гермес» г. Челябинск (продукт: гель для тела «Без воды»). Также известна люксовая продукция ООО «Ботавикос-Клуб» г. Москва (продукт: мицеллярный спрей для тела Aromatherapy Relax, экспресс-очищение без мыла и воды, цветочный). Производители сообщают наименование рецептурных ингредиентов средств без весового соотношения. Приведем составы и характеристики выпускаемой продукции.

«Сухой душ» пенка очищающая для гигиены тела / ООО «Эльффарма». Форма – гель. Состав: вода, кокамидопропил бетаин, динатриевый лауретсульфосукцинат, кокоглюкозид, глицерин, каприлоил / капроилметилглюкамид, сорбитол, пантенол, гидролат ромашки, гидролат календулы, мальтоолигосилглюкозид, парфюмированная вода, лимонная кислота, бензиловый спирт, бензоат натрия, сорбат калия.

Гель для тела «Без воды» / ООО ПК «Гермес». Форма – гель. Состав: вода, глицерин, кокамидопропилбетаин, д-пантенол, молочная кислота, сорбат калия, пропиленгликоль, тетраборат калия.

Мицеллярный спрей для тела Aromatherapy Relax / ООО «Ботавикос-Клуб». Форма – спрей. Состав: вода, каприлоил / каприловый глюкозид, глицерин, бензиловый спирт, пантенол, этилгексилглицерин, масло цветков дамасской розы, масло бергамота, масло жасмина лекарственного, масло листьев пеларгонии розовой, масло древесины розы лекарственной, масло санталума белого, масло иланг-иланга, диацетат тетраэтрия глутамата, лимонная кислота, отдушка, фарнезол.

Таким образом, гель для тела «Без воды» имеет минимальный набор ингредиентов, необходимых для очищения кожи, «Сухой душ», наряду с очищением, предусматривает улучшение состояния кожи за счет биологически активных ингредиентов – гидролатов и других. Наиболее сложный состав демонстрирует мицеллярный спрей для тела Aromatherapy Relax, включающий большой набор натуральных масел экзотических растений, что способствует глубокому увлажнению и питанию клеток эпидермиса, ускоряет их обновление. Общими ингредиентами в указанных моющих средствах являются следующие: поверхностно-активные вещества (основа моющего средства) – мягкие ПАВ амфотерного и неионогенного типа, регуляторы pH, консерванты, увлажняющие добавки, биологически активные ингредиенты, вода очищенная.

Исходя из того, что разрабатываемое средство должно не только очищать, но и улучшать состояние кожи, в его состав были включены мягкие ПАВ без сильного пенообразования, амфотерные и неионогенные, – кокамидопропил бетаин, кокоглюкозид, алкилполиглицозид С8-С10, а также лимонная кислота, бензоат натрия, глицерин, биологически активные ингредиенты – пантенол, масло шиповника, масло авокадо, эфирное масло ромашки, и вода.

Подготовка и анализ лабораторных образцов КГМС по базовым рецептурам.

Были приготовлены два базовых образца КГМС: № 1 (контроль) – включал основные ингредиенты без биологически активных компонентов; № 2 – то же, с добавлением пантенола, масла шиповника, масла авокадо, эфирного масла ромашки. Весовые количества ингредиентов в рецептуре КГМС устанавливали, ориентируясь их содержание, указанное в патентах на моющие средства для тела с использованием воды [14, 15]. Для того, чтобы максимально избежать негативного действия ПАВ на кожу, суммарное весовое содержание ПАВ в базовой рецептуре установили на треть меньше, чем в средствах для мытья младенцев [15]. Базовая рецептура № 1 имела следующий состав: кокамидопропил бетаин 6%; кокоглюкозид 3%; алкилполиглюкозид C8-C10 3%; глицерин 3%; лимонная кислота 0,3%; бензоат натрия 0,2%. Рецептура № 2 дополнительно включала пантенол 1%; масло шиповника 3%; масло авокадо 3%; эфирное масло ромашки 0,3%. Результаты анализа органолептических и физико-химических показателей образцов № 1, № 2 приведены в таблице 1.

Полученные образцы КГМС № 1 и № 2 представляли собой однородные жидкости, которые наносились на кожу равномерно, не растекались, с высоким пенообразованием (пена обильная, пузырьки $d = 1-2$ мм), без липкости, хорошо удалялись после применения, имели высокую очищающую способность. Следовательно, базовые образцы соответствовали основному

назначению разрабатываемого средства – эффективное очищение кожи от загрязнений. Однако, были выявлены некоторые недостатки: 1) значение водородного показателя образцов было ниже установленного ГОСТ 31696–2012 (норма pH 5,0–8,5); 2) образец № 2 был нестабилен при хранении, представлял собой эмульсию М/В, эмульгирующей способности рецептурных ПАВ было недостаточно для ее стабилизации. Учитывая эти замечания, последующие разработки включали уменьшение содержания лимонной кислоты и введение в состав КГМС с масляными биодобавками загустителя и эмульгатора.

С целью стабилизации структуры КГМС, содержащего биологически активные (масляные) ингредиенты, в рецептуру разрабатываемого продукта вводили загустители и эмульгаторы разных типов: ПЭГ-120, карбомер, ксантановую камедь. ПЭГ 120 – метил глюкоза диолеат, натуральный эфир метил глюкозы, этерифицированный олеиновой кислотой. Карбомер (К) – синтетический полимер акриловой кислоты. Ксантановая камедь (КК) – полисахарид, образуемый бактериями вида *Xanthomonas campestris*. Все три добавки используются в косметической продукции для приготовления водных гелей и эмульсий, действуют как загустители и эмульгаторы, не вызывают раздражения кожи. Однако, структурные различия этих веществ отражаются на их функциональных свойствах.

Таблица 1.

Показатели качества КГМС (базовые рецептуры)

Table 1.

Quality indicators of KGMS (basic recipes)

Показатели Indicators	Образцы КГМС Samples of KGMS	
	контроль (№ 1) control (№ 1)	с биологически активными ингредиентами (№ 2) with biologically active ingredients (№ 2)
Внешний вид Appearance	однородная жидкость, прозрачная homogeneous liquid, transparent	однородная жидкость без примесей, при хранении расслаивается homogeneous liquid, delaminates during storage
Цвет Color	бесцветный no color	бесцветный, мутный no color, cloudy
Запах Smell	без запаха no smell	запах ромашки the smell of chamomile
pH	4,4	4,5
Вязкость, мПа·с Viscosity, mPa·s	240	780
Равномерность нанесения на кожу Uniform distribution on the skin	при нанесении растекается when applied to the skin it spreads	при нанесении растекается when applied to the skin it spreads
Липкость на коже Stickiness on the skin	отсутствует	does not stick to the skin
Полнота удаления средства салфеткой после применения Complete removal of the product with a napkin after use	удаляется полностью is removed completely	
Очищающая способность Cleansing ability	удовлетворительная adequately	
Стабильность при хранении Stability of quality during storage	стабилен is stable during storage	нестабилен is not stable during storage

Загустители вносили в количестве от 0,5 до 4%. Кроме того, для оптимизации pH продукта долю лимонной кислоты в рецептуре уменьшили в два раза – до 0,15%. Содержание остальных ингредиентов соответствовало базовой рецептуре № 2. Проведенные опыты показали, что ПЭГ 120 формирует в продукте пенообразную однородную структуру с высокими потребительскими характеристиками, но малоустойчивую, быстро разделяющуюся на водную и масляную фазы. При использовании

карбомера образуется продукт в виде неоднородной текучей эмульсии. Наилучшие результаты получены с помощью ксантановой камеди. Показатели качества КГМС, приготовленного с использованием ксантановой камеди, приведены в таблице 2. Внешний вид образцов КГМС с биологически активными масляными ингредиентами без добавления загустителя (образец № 2) и с добавлением загустителя ксантановой камеди в количестве 0,5–4,0% (образцы 3–5) представлены на рисунке 1.

Таблица 2.

Показатели качества КГМС с ксантановой камедью

Table 2.

Quality indicators of KGMS with xanthan gum

Показатели Indicators	Образцы КГМС с содержанием ксантановой камеди: Samples of KGMS containing xanthan gum in the amount of:		
	0,5% (№ 3)	2% (№ 4)	4% (№ 5)
Внешний вид Appearance	однородная жидкость без примесей, при хранении расслаивается homogeneous liquid, delaminates during storage	эмульсионный гель, имеются небольшие пузырьки emulsion gel, contains small bubbles	эмульсионный гель, имеются пузырьки, плотный, нетекучий emulsion gel, there are bubbles, dense, not fluid
Цвет Color	бесцветный, мутный no color, cloudy	белый white	белый white
Запах Smell	запах ромашки the smell of chamomile	запах ромашки the smell of chamomile	запах ромашки the smell of chamomile
рН	5,5	5,6	5,6
Вязкость, мПа×с Viscosity, mPa×s	1300	3800	4500
Равномерность нанесения на кожу Uniform distribution on the skin	при нанесении растекается when applied to the skin it spreads	наносится равномерно apply evenly to the skin	образец плотный, наносится неравномерно the sample is dense and applied unevenly
Липкость на коже Stickiness on the skin	отсутствует does not stick to the skin		
Полнота удаления средства салфеткой после применения Complete removal of the product with a napkin after use	удаляется полностью is removed completely		
Очищающая способность Cleansing ability	хорошая good		удовлетворительная adequately
Стабильность при хранении Stability of quality during storage	нестабилен is not stable during storage	стабилен is stable during storage	

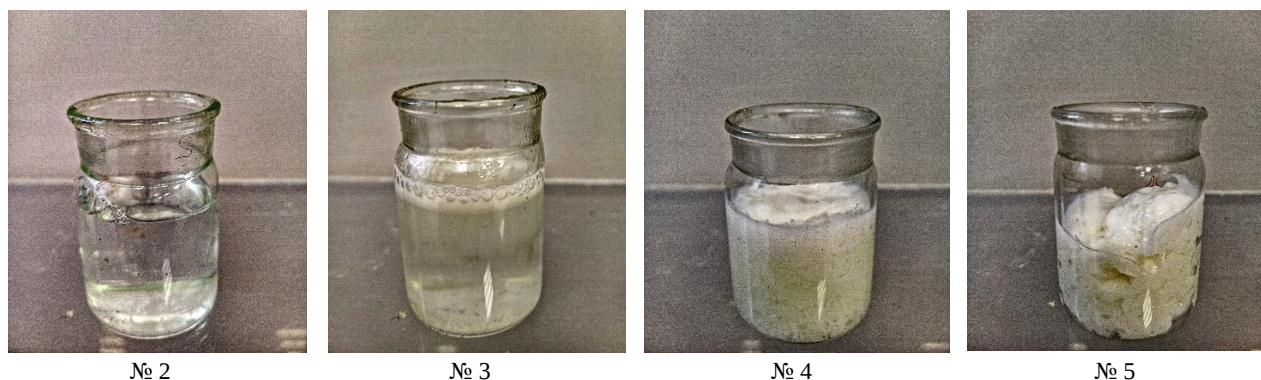


Рисунок 1. Внешний вид образцов КГМС с биологически активными масляными ингредиентами: № 2 – без загустителя; № 3 – с 0,5% ксантановой камеди; № 4 – с 2% ксантановой камеди; № 5 – с 4% ксантановой камеди
Figure 1. Appearance of KGMS samples with biologically active oil ingredients: No. 2 – without thickener; No. 3 – with 0.5% xanthan gum; No. 4 – with 2% xanthan gum; No. 5 – with 4% xanthan gum

Добавление ксантановой камеди в зависимости от ее массовой доли по-разному влияло на структуру, вязкость и потребительские характеристики КГМС. При содержании КК 0,5% КГМС мало отличалось от базового образца № 2, т. е. имело жидкую консистенцию, при хранении расслаивающуюся на водную и масляную фазы. При содержании КК 2% формировалась структура эмульсионного геля, устойчивая в хранении, образец имел высокие потребительские характеристики. Внесение КК в рецептуру в количестве 4% приводило к ухудшению некоторых потребительских характеристик КГМС – эмульсионный гель был излишне плотным, на кожу наносился менее неравномерно.

По остальным показателям образцы № 3, 4, 5 были одинаковы, показатель рН соответствовал норме. Таким образом, внесение в рецептуру КГМС 2% ксантановой камеди позволило сформировать стабильную структуру эмульсионного геля и получить продукт с высокими органолептическими и потребительскими свойствами.

Из научной литературы известно, что для стабилизации масс, имеющих структуру эмульсионного геля, к которым, относятся образцы последней серии, более эффективными являются комбинации из нескольких загустителей – бинарные или тройные смеси. Такие комбинации загустителей используют в кондитерских и косметических эмульсионных продуктах [16, 17, 18].

Нами проведены исследования влияния бинарных смесей загустителей на формирование структуры, стабильность и потребительские характеристики КГМС. В базовую рецептуру № 2 добавляли два варианта смесей загустителей: первый вариант (образец № 6) содержал 1,5% ксантановой камеди и 1,5% ПЭГ 120, второй (образец № 7) – 1,5% ксантановой камеди и

1,5% карбомера. Приготовленные по этим рецептурам образцы анализировали по органолептическим и физико-химическим показателям. Результаты приведены в таблице 3. Внешний вид образцов КГМС с биологически активными масляными ингредиентами и бинарными смесями загустителей представлены на рисунке 2.

Таблица 3.

Показатели качества КГМС с бинарными смесями загустителей

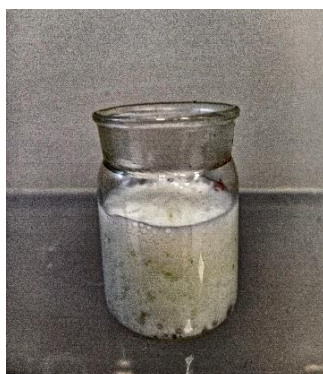
Table 3.

Quality indicators of KGMS with binary mixtures of thickeners

Показатели Indicators	Образцы КГМС с бинарными смесями загустителей: Samples of KGMS with binary mixtures of thickeners:	
	ксантановая камедь + ПЭГ 120 (№ 6) xanthan gum + PEG 120 (№ 6)	ксантановая камедь + карбомер (№ 7) xanthan gum + carbomer (№ 7)
Внешний вид Appearance	эмульсионный гель, похожий на пенку, однородный emulsion gel, foam-like, homogeneous	эмульсионный гель, не вполне однородный emulsion gel, not completely homogeneous
Цвет Color	белый white	
Запах Smell	запах ромашки, слабый faint scent of chamomile	
pH	5,7	5,6
Вязкость, мПа×с Viscosity, mPa×s	3200	3600
Равномерность нанесения на кожу Uniform distribution on the skin	наносится равномерно apply evenly to the skin	наносится равномерно, немного растекается It is applied evenly to the skin and spreads a little
Липкость на коже Stickiness on the skin	отсутствует does not stick to the skin	
Полнота удаления средства салфеткой после применения Complete removal of the product with a napkin after use	удаляется полностью is removed completely	
Очищающая способность Cleansing ability	хорошая good	
Стабильность при хранении Stability of quality during storage	стабилен is stable during storage	

Данные таблицы 3 показывают, что КГМС, приготовленные с бинарными смесями загустителей «ксантановая камедь + ПЭГ 120» и «ксантановая камедь + карбомер», имели высокие органолептические и потребительские показатели: равномерно наносились на кожу, хорошо вспенивались и поглощали загрязнения, полностью удалялись салфеткой после применения, были устойчивы при хранении. Было выявлено различие во внешнем виде

продуктов – КГМС с бинарной смесью «ксантановая камедь + ПЭГ 120» имел структуру эмульсионного геля, сформированного в пенку, а КГМС с бинарной смесью «ксантановая камедь + карбомер» представлял собой эмульсионный гель, не вполне однородный, с каплями жировой фазы. Эти результаты демонстрируют преимущество образца КГМС, содержащего бинарную смесь загустителей «ксантановая камедь + ПЭГ 120».



№ 6



№ 7

Рисунок 2. Внешний вид образцов КГМС с бинарными смесями загустителей: № 6 – ксантановая камедь + ПЭГ 120; № 7 – ксантановая камедь + карбомер

Figure 2. Appearance of KGMS samples with binary mixtures of thickeners: No. 6 – xanthan gum + PEG 120; No. 7 – xanthan gum + carbomer

Полученные нами образцы КГМС представляли собой стабильные эмульсионные гели, образованные с помощью полимерных загустителей. Этот результат соответствовал современным научным положениям о формировании эмульсионных гелей, раскрытых в работах зарубежных и российских ученых [16, 18]. Для разрабатываемого нами продукта наиболее эффективным структурообразователем стала ксантановая камедь, функциональные свойства которой были дополнительно улучшены ПЭГ 120 и карбомером.

В завершении исследования контрольный образец (№ 1) и опытные образцы (с одним загустителем – ксантановой камедью и с бинарными смесями загустителей) были предложены потенциальным потребителям для оценки органолептических показателей. Анализ проводили

с привлечением комиссии экспертов в составе 5 человек. Вначале экспертами был согласован перечень признаков продукта, характеризующих ожидания потребителей: внешний вид, запах, равномерность нанесения на кожу, очищающая способность, полнота удаления средства салфеткой после применения. Воспринимаемую интенсивность выбранных дескрипторов оценивали по пятибалльной шкале. Для получения объективных результатов применяли коэффициенты весомости показателей качества. Наиболее значимыми показателями были очищающая способность и полнота удаления средства салфеткой после применения. Оценка уровня качества в баллах вычисляли умножением оценки каждого показателя на коэффициент весомости, результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Балловая оценка органолептических показателей контрольного и опытных образцов КГМС

Table 4.

Scoring of organoleptic indicators of control and experimental samples of KGMS

Показатели Indicators	Коэффициент весомости	Образцы КГМС: Samples of KGMS:			
		контроль (№ 1) control (№ 1)	с биологически активными ингредиентами и загустителями: with biologically active ingredients and thickeners:		
			ксантановая камедь, 2% (№ 4) xanthan gum, 2% (№ 4)	ксантановая камедь + ПЭГ 120 (№ 6) xanthan gum + PEG 120 (№ 6)	ксантановая камедь + карбомер (№ 7) xanthan gum + carbomer (№ 7)
Внешний вид Appearance	0,1	0,4	0,5	0,5	0,4
Запах Smell	0,1	0,3	0,4	0,5	0,5
Равномерность нанесения на кожу Uniform distribution on the skin	0,2	0,6	1,0	1,0	1,0
Полнота удаления средства салфеткой после применения Complete removal of the product with a napkin after use	0,3	1,5	1,5	1,5	1,5
Очищающая способность Cleansing ability	0,3	1,2	1,5	1,5	1,5
Средний балл Average score		4,0	4,9	5,0	4,7

Результаты органолептической оценки позволили установить, что лучшим по функциональным показателям, внешнему виду, консистенции и запаху был КГМС с биологически активными ингредиентами и бинарной смесью загустителей «ксантановая камедь + ПЭГ 120», он получил 5 баллов. Образец с 2% ксантановой камеди немного уступал по внешнему виду и имел, как отметили дегустаторы, более интенсивный запах.

Закключение

Косметико-гигиенические средства типа «сухой душ» образуют новую перспективную группу моющих средств для ухода за кожей, не требующих смывания водой. Применение этих средств актуально при дефиците водных ресурсов, а также при уходе за малоподвижными людьми. Выявлена недостаточность производства и ассортимента этой продукции. На основании анализа научно-технических данных была составлена базовая рецептура косметико-гигиенического моющего средства

типа «сухой душ», включающая мягкие ПАВ амфотерного и неионогенного типа. В ходе исследования для оптимизации органолептических и функциональных характеристик в базовую рецептуру были включены биологически активные ингредиенты (масло шиповника, масло авокадо и другие) и загустители и эмульгаторы. Установлено, что при использовании загустителя ксантановой камеди в количестве 2% или бинарной смеси из ксантановой камеди и ПЭГ 120, получают продукты со структурой эмульсионного геля, обладающие хорошей очищающей способностью, удаляемые салфеткой после применения, увлажняющие и смягчающие кожу, стабильные при хранении.

В целом, проведенные исследования показывают, что разработанные косметико-гигиенические эмульсионные гели для тела, не требующие смывания водой, могут быть альтернативой традиционным средствам для умывания или душа.

Литература

- 1 ГОСТ 31696–2012. Продукция косметическая гигиеническая моющая. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 6 с.
- 2 Пучкова Т.В. Энциклопедия ингредиентов для косметики и парфюмерии. М.: Школа косметических химиков, 2015. 410 с.
- 3 Богданова С.А., Шигабиева Ю.А., Князев А.А., Галяметдинов Ю.Г. и др. Химия и технология косметических средств. В 2 ч. Ч. 1 Пеномоющие и очищающие средства: учебник. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2018. 340 с.
- 4 Хомутова К.В. Демокопическая оценка ассортимента косметико-гигиенических моющих средств для ухода за кожей // Economics. 2019. Т. 41. № 3. С. 67–71.
- 5 Mijaljica D., Spada F., Harrison I.P. Skin cleansing without or with compromise: soaps and syndets // *Molecules*. 2022. V. 27. № 6. P. 2010. doi: 10.3390/molecules27062010
- 6 Li Z. Modern mild skin cleansing // *Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications*. 2020. V. 10. № 2. P. 85–98. doi: 10.4236/jcdsa.2020.102009
- 7 CleanLIFE [сайт] / CleanLife BODY CARE (CleanLife УХОД ЗА ТЕЛОМ). URL: <https://cleanlifeproducts.com/body-care/> (дата обращения: 29.04.2025)
- 8 ZABOTA-market.ru: [сайт] / Обзор средств гигиены для мытья без воды. URL: <https://zabota-market.ru/news/2018/11/12/obzor-sredstv-gigieny-dlya-mytya-bez-vody> (дата обращения: 29.04.2025)
- 9 Groven F.M.V., Zwakhalen S.M.G., Odekerken-Schröder G., Joosten E.J.T. et al. How does washing without water perform compared to the traditional bed bath: a systematic review // *BMC geriatrics*. 2017. V. 17. P. 1–16. doi: 10.1186/s12877-017-0425-4
- 10 Ogai K., Matsumoto M., Aoki M., Ota R. et al. Wash or wipe? A comparative study of skin physiological changes between water washing and wiping after skin cleaning // *Skin Research and Technology*. 2017. V. 23. № 4. P. 519–524. doi: 10.1111/srt.12364
- 11 Schoonhoven L., van Gaal B.G.I., Teerenstra S., Adang E. et al. Cost-consequence analysis of “washing without water” for nursing home residents: a cluster randomized trial // *International Journal of Nursing Studies*. 2015. V. 52. № 1. P. 112–120. doi: 10.1016/j.ijnurstu.2014.08.001
- 12 ГОСТ 29188.0–2014. Продукция парфюмерно-косметическая. Правила приемки, отбор проб, методы органолептических испытаний. М.: Стандартинформ, 2019. 6 с.
- 13 ГОСТ 29188.2–91. Продукция парфюмерно-косметическая. Метод определения водородного показателя pH. М.: Издательство стандартов, 1992. 3 с.
- 14 Пат. 2555358 Рос. Федерация. Гель для душа / Бочина Н.А., Ерофеева Е.Г., Ильчишина Н.В., Тарасов В.Е. и др.; заявитель и патентообладатель [и др.]. № 2014123375/15; заявл. 06.06.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19. 8 с.
- 15 Пат. 2657805 Рос. Федерация. Композиция для мытья и умывания младенцев / Пантелеев Е.А., Саморукова А.В., Чечерникова Л.В., Борисенко Е.А. и др.; заявитель и патентообладатель [и др.]. № 2017148970/15; заявл. 08.12.2017; опубл. 15.06.2018, Бюл. № 17. 12 с.
- 16 Бутин С.А., Васькина В.А., Щеголева И.Д. Влияние полисахаридного комплекса в стеновом материале эмульсионного геля на качество шоколадно-ореховой начинки для кондитерских изделий // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2022. № 2. С. 173–187. doi: 10.36107/spfp.2022.303
- 17 Васькина В.А., Шаршунов В.А., Машкова И.А., Быков А.А. и др. Влияние продуктов переработки конопли и природы белка в стеновом материале эмульсионного геля на качество и структуру заварного полуфабриката для эклера // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2023. № 1. С. 150–162. doi: 10.36107/spfp.2023.414
- 18 Wan C., Cheng Q., Zeng M., Huang C. Recent progress in emulsion gels: from fundamentals to applications // *Soft Matter*. 2023. V. 19. № 7. P. 1282–1292. doi: 10.1039/D2SM01481E
- 19 Mawazi S.M., Ann J., Othman N., Khan J. et al. A review of moisturizers; history, preparation, characterization and applications // *Cosmetics*. 2022. V. 9. № 3. P. 61. doi: 10.3390/cosmetics9030061
- 20 Franceschini M. Oil based rheological additives substitution with natural biopolymers in skincare leave-on formulations: theoretical introduction, laboratory synthesis and scale-up process towards industrial scale production. 2022.
- 21 Huanbutta K., Sripirom P., Phetthong P. et al. Dissolvable shower gel tablets with enhanced skin benefits // *International Journal of Cosmetic Science*. 2023. V. 45. № 6. P. 739–748. doi: 10.1111/ics.12885
- 22 Ziemska A., Wójcik M., Mroziak-Lal K., Zagórska-Dziok M. et al. Assessment of Cosmetic Properties and Safety of Use of Model Washing Gels with Reishi, Maitake and Lion's Mane Extracts // *Molecules*. 2022. V. 27. № 16. P. 5090. doi: 10.3390/molecules27165090

References

- 1 State Standard 31696–2012. Cosmetic hygienic washing products. General specifications. Moscow: Standartinform, 2019. 6 p. (in Russian)
- 2 Puchkova T.V. Encyclopedia of Ingredients for Cosmetics and Perfumery. Moscow: School of Cosmetic Chemists, 2015. 410 p. (in Russian)
- 3 Bogdanova S.A., Shigabieva Yu.A., Knyazev A.A., Galyametdinov Yu.G. Chemistry and technology of cosmetics. In 2 parts. Part 1 Foaming and cleaning agents: textbook. Kazan: Kazan National Research Technological University, 2018. 340 p. (in Russian)
- 4 Khomutova K.V. Demoscopic assessment of the range of cosmetic and hygienic detergents for skin care. Economics. 2019. vol. 41. no. 3. pp. 67–71. (in Russian)
- 5 Mijaljica D., Spada F., Harrison I.P. Skin cleansing without or with compromise: soaps and syndets. *Molecules*. 2022. vol. 27. no. 6. p. 2010. doi:10.3390/molecules27062010

- 6 Li Z. Modern mild skin cleansing. Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications. 2020. vol. 10. no. 2. pp. 85–98. doi:10.4236/jcdsa.2020.102009
- 7 CleanLIFE [website]. CleanLife BODY CARE. URL: <https://cleanlifeproducts.com/body-care/> (in Russian)
- 8 ZABOTA-market.ru: [website]. Review of hygiene products for washing without water. URL: <https://zabota-market.ru/news/2018/11/12/obzor-sredstv-gigieny-dlya-mytya-bez-vody> (in Russian)
- 9 Groven F.M.V., Zwakhale S.M.G., Odekerken-Schröder G., Joosten E.J.T., Hamers J.P.H. How does washing without water perform compared to the traditional bed bath: a systematic review. BMC geriatrics. 2017. vol. 17. pp. 1–16. doi: 10.1186/s12877-017-0425-4
- 10 Ogai K., Matsumoto M., Aoki M., Ota R., Hashimoto K., Wada R., Kobayashi M., Sugama J. Wash or wipe? A comparative study of skin physiological changes between water washing and wiping after skin cleaning. Skin Research and Technology. 2017. vol. 23. no. 4. pp. 519–524. doi:10.1111/srt.12364
- 11 Schoonhoven L., van Gaal B.G.I., Teerenstra S., Adang E., van der Vleuten C., van Achterberg T. Cost-consequence analysis of "washing without water" for nursing home residents: a cluster randomized trial. International Journal of Nursing Studies. 2015. vol. 52. no. 1. pp. 112–120. doi:10.1016/j.ijnurstu.2014.08.001
- 12 State Standard 29188.0–2014. Perfumery and cosmetic products. Acceptance rules, sampling, organoleptic testing methods. Moscow: Standartinform, 2019. 6 p. (in Russian)
- 13 State Standard 29188.2–91. Cosmetics. Method for determining the hydrogen ion concentration (pH). Moscow: Publishing House of Standards, 1992. 3 p. (in Russian)
- 14 Bochina N.A., Erofeeva E.G., Ilchishina N.V., Tarasov V.E. Shower gel. Patent RU 2555358, 2015. (in Russian)
- 15 Pantelev E.A., Samorukova A.V., Chechernikova L.V., Borisenko E.A., Dunaeva Zh.L., Astafieva O.A., Borisevich G.A., Bolshakova T.B. Composition for washing and cleaning babies. Patent RU 2657805, 2018. (in Russian)
- 16 Butin S.A., Vaskina V.A., Schegoleva I.D. Influence of the polysaccharide complex in the wall material of the emulsion gel on the quality of chocolate-nut filling for confectionery. Storage and processing of agricultural raw materials. 2022. no. 2. pp. 173–187. doi:10.36107/spfp.2022.303 (in Russian)
- 17 Vaskina V.A., Sharshunov V.A., Mashkova I.A., Bykov A.A., Schegoleva I.D. Influence of hemp processing products and the nature of protein in the wall material of emulsion gel on the quality and structure of choux semi-finished for éclair. Storage and processing of agricultural raw materials. 2023. no. 1. pp. 150–162. doi:10.36107/spfp.2023.414 (in Russian)
- 18 Wan C., Cheng Q., Zeng M., Huang C. Recent progress in emulsion gels: from fundamentals to applications. Soft Matter. 2023. vol. 19. no. 7. pp. 1282–1292. doi:10.1039/D2SM01481E
- 19 Mawazi S.M., Ann J., Othman N., Khan J., Alolayan S.O., Althagfan S.S., Kaleemullah M. A review of moisturizers; history, preparation, characterization and applications. Cosmetics. 2022. vol. 9. no. 3. p. 61. doi:10.3390/cosmetics9030061
- 20 Franceschini M. Oil based rheological additives substitution with natural biopolymers in skincare leave-on formulations: theoretical introduction, laboratorial synthesis and scale-up process towards industrial scale production. 2022.
- 21 Huanbutta K., Sripirom P., Phetthong P. et al. Dissolvable shower gel tablets with enhanced skin benefits. International Journal of Cosmetic Science. 2023. vol. 45. no. 6. pp. 739–748. doi:10.1111/ics.12880
- 22 Ziemska A., Wójcik M., Mroziak-Lal K., Zagórska-Dziok M., Bujak T., Nizioł-Lukaszewska Z., Szczepanek D., Sowa I. Assessment of Cosmetic Properties and Safety of Use of Model Washing Gels with Reishi, Maitake and Lion's Mane Extracts. Molecules. 2022. vol. 27. no. 16. p. 5090. doi:10.3390/molecules27165090

Сведения об авторах

Ирина Д. Щеголева к.т.н., доцент, кафедра технологии и биоорганического синтеза, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, shegoleva.id@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2835-345x>

Екатерина Р. Вольнова к.т.н., доцент, кафедра технологии и биоорганического синтеза, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, volnovaer@mgupp.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0015-446x>

Александр Е. Ергиев студент, кафедра технологии и биоорганического синтеза, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, alekcaedre@gmail.com

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 D. Shchegoleva Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, biotechnology and bioorganic synthesis department, Russian Biotechnological University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080, Russia, shegoleva.id@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2835-345x>

Ekaterina R. Volnova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, biotechnology and bioorganic synthesis department, Russian Biotechnological University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080, Russia, volnovaer@mgupp.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0015-446x>

Alexander E. Ergiev student, biotechnology and bioorganic synthesis department, Russian Biotechnological University, Volokolamsk highway, 11, Moscow, 125080, Russia, alekcaedre@gmail.com

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 11/04/2025	После редакции 28/04/2025	Принята в печать 20/05/2025
Received 11/04/2025	Accepted in revised 28/04/2025	Accepted 20/05/2025

Многослойные полимерные оболочки для скрытой маркировки зеркальных изделий

Александра Ю. Погиба	¹	pogiba.a@ya.ru	 0009-0008-6550-2892
Владислав Ю. Верещагин	¹	slavaver@ya.ru	 0000-0002-1344-4888
Виктор А. Род	¹	vikdor.andreevich@mail.ru	 0009-0008-8333-4749
Александр П. Кондратов	¹	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

¹ Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия

Аннотация. Поляризация света, отраженного от зеркальной поверхности стеклянной, пластмассовой или металлической тары, фольги или этикетки из металлизированной пленки позволяет наблюдать в полимерных многослойных покрытиях эффект плеохроизма и использовать его в публичной (открытой) и скрытой (защитной) маркировке товаров. Анизотропные оптически активные полимерные пленки двух типов, используемые для маркировки прозрачных оболочек и упаковки получают путем линейной и двухосной ориентационной вытяжки. Линейная ориентация при производстве полимерных плёнок создаёт «эффект памяти формы» и используется для изготовления внешнего слоя оболочки, который сжимает и фиксирует её многослойную структуру при термоусадке на цилиндрической конической или иной криволинейной поверхности изделий с зеркальной поверхностью. Установлено, что коэффициент пропускания обычного и поляризованного света термоусадочной плёнкой поливинилхлорида «памятью формы» существенно различается и в зависимости от длины волны света и уровня внутренних напряжений в пленке снижается в процессе её усадки в несколько раз. При исследовании оптических свойств комбинированных полимерных плёнок в условиях термостимулируемой усадки обнаружены яркие цветные эффекты и парадокс влияния масштабного фактора на прозрачность пленки поливинилхлорида для потока света, отражённого от зеркальной поверхности. Поляризация света, отраженного от зеркальной поверхности, позволяет использовать многоцветный эффект плеохроизма для привлечения внимания покупателя к товару и скрытой (защитной) маркировки упаковки путем штрихового кодирования информации о товаре. Показана возможность считывания информации, вводимой в многослойную оболочку путем высечки штрихового кода в среднем слое двухосно ориентационной пленки полипропилена, с использованием видеокамеры и программного обеспечения смартфонов. Плеохроизм многослойной оболочки, формируемой путем термостимулируемой усадки оболочек или цилиндрических этикеток зависит от уровня внутренних напряжений во внешнем слое термоусадочной плёнки поливинилхлорида. Оптимальный уровень внутренних напряжений для усадки и фиксации оболочек на изделиях задается в диапазоне 1-4 МПа путем реализации свободной усадки в диапазоне 10-60% от максимальной усадки без ограничения размеров пленки.

Ключевые слова: пленка, деформация, термоусадка, поливинилхлорид; упаковка, фотометрия, плеохроизм, поляризованный свет, цветовое различие; штрих-код.

Multilayer polymer films for covert marking of mirrored products

Aleksandra Yu. Pogiba	¹	pogiba.a@ya.ru	 0009-0008-6550-2892
Vladislav Yu. Vereshchagin	¹	slavaver@ya.ru	 0000-0002-1344-4888
Viktor A. Rod	¹	vikdor.andreevich@mail.ru	 0009-0008-8333-4749
Aleksandr P. Kondratov	¹	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

¹ Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia

Abstract. The polarization of light reflected from the mirror-like surfaces of glass, plastic, or metal containers, or from foil or metallized film labels, produces pleochroism effects in polymer multilayer coatings. This optical phenomenon can be utilized for both open and hidden product markings. Two types of anisotropic optically active polymer films used for marking transparent coatings and packaging are produced by linear and biaxial stretching. Linear stretching during the production of polymer films creates a shape memory effect and is used to manufacture the outer layer of the coating. This layer compresses and fixes the multilayer structure during heat shrinkage onto cylindrical, conical, or other curved mirror-like surfaces. It has been established that the optical transmission coefficients of regular and polarized light through a shape-memory polyvinyl chloride (PVC) shrink film differ significantly. Depending on the light wavelength and the stress in the film, the transmission decreases several times during the film shrinkage process. In the study of the optical properties of composite polymer films undergoing thermally induced shrinkage, striking color phenomena and a paradoxical effect of the scale factor on the transparency of PVC film for light reflected from mirror surfaces were observed. The polarization of reflected light enables the use of multicolor pleochroism as both eye-catching visual features for consumer engagement and hidden security elements capable of encoding product information in a barcode-like format for discreet package authentication. The feasibility of reading information embedded within a multilayer film has been demonstrated by incorporating a barcode into the middle layer of a biaxially oriented polypropylene film. This embedded data can be accurately captured and decoded using a smartphone camera in combination with a dedicated software application. The pleochroism observed in the multilayer film formed through thermally induced shrinkage of sleeves or cylindrical labels depends on the level of internal stress present in the outer layer of the PVC shrink film. The optimal internal stress is 1-4 MPa for the film shrinkage and fixation on products, corresponding to the 5-65% of the maximum shrinkage strain.

Keywords: film, deformation, heat shrinkage, polyvinyl chloride, packaging, photometry, pleochroism, polarized light, color difference, barcode.

Для цитирования

Погиба А.Ю., Верещагин В.Ю., Род В.А., Кондратов А.П. Многослойные полимерные оболочки для скрытой маркировки зеркальных изделий // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 180–189. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-180-189

For citation

Pogiba A.Yu., Vereshchagin V.Yu., Rod V.A., Kondratov A.P. Multilayer polymer films for covert marking of mirrored products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 180–189. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-180-189

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

Введение

При увеличении популярности дистанционного (онлайн) выбора промышленных товаров, напитков и скоропортящихся продуктов питания на marketplace в стеклянной, металлической и полимерной таре с доставкой к местам потребления, не оборудованных средствами проверки подлинности товара важное значение приобретает их оптическая маркировка.

Фирменная упаковка с логотипом производителя и известные средства маркировки, основанные на полиграфических технологиях и использовании разноцветных полимерных материалов недостаточно эффективны в борьбе с контрафактным производством и подделкой товаров. Использование голограмм, микроперфорации, цветной люминесцентной [1] и/или цветоперменной [2] маркировки этикеток требует наличия у предприятий занимающихся индивидуальной упаковкой продуктов сложного оборудования, дорогостоящих красителей и поэтому не пригодно для применения в розничной торговле и доставке товаров на дом.

В условиях интенсивного развития информационных технологий особую актуальность приобретают исследования в области новых материалов для цифровой маркировки, способов скрытой записи и хранения информации. Одним из перспективных направлений в данной сфере является разработка оптических носителей с повышенной степенью защиты от несанкционированного копирования и фальсификации.

Программируемое оптическое шифрование возможно с использованием жидкокристаллических эластомеров с контролируемой толщиной. Структурные цвета генерируются посредством взаимодействия света с микро- или наноструктурами в разнотолщинном диэлектрическом материале. В ненапряженном состоянии образцы пленки жидкокристаллических эластомеров с различной толщиной демонстрируют схожие оптические свойства. При приложении равномерной силы растяжения более тонкий образец испытывает большее растягивающее напряжение, что приводит значительному сдвигу длины волны по сравнению с более толстым. Этот дифференциальный механохромный отклик позволяет осуществлять сложный контроль нескольких длин волн при равной силе растяжения и обеспечивает кодирование информации [3].

Ранее было изобретено и запатентовано применение для маркировки и упаковки товаров эластичных пленочных полимерных материалов с «памятью формы» [5–6], способных за счет термоусадки прочно фиксировать этикетки,

ярлыки и торговые марки на товарах. В современной литературе описаны новые разные подходы к использованию полимерных пленок в качестве носителя информации и методы добавления информации в полимерные материалы, например, с использованием эффекта флюоресценции. В [1, 7] описано использование сопряженного полимера на основе поли(пара)фенилена для хранения информации с применением оптического метода записи. Ключевой особенностью разработанного материала является возможность формирования после УФ-облучения участков с различными флуоресцентными свойствами, включая многоцветную флуоресценцию и состояния типа "включено-выключено". Существенным преимуществом данной технологии является невидимость записанной информации при обычном освещении, что обеспечивает определенный уровень защиты кодированных данных. В статье рассматриваются физические и химические механизмы быстрых изменений флуоресценции, происходящих под воздействием ультрафиолетового излучения, а также демонстрируются многоцветные микромасштабные изображения и скрытые QR-коды, записанные на гибких полимерных пленках. В зависимости от методики подготовки, записанные структуры сохраняют стабильность после воздействия воды и фонового УФ-излучения окружающей среды.

Новый подход к созданию флуоресцентных структур для кодирования информации представлен в статье [8]. Авторы разработали биосовместимые наночастицы на основе пептидов, которые при сворачивании во вторичную β -структуру демонстрируют интенсивную и настраиваемую флуоресценцию в широком спектральном диапазоне с квантовым выходом до 30%. Особенностью данных нанодотов является значительный необратимый эффект фотообесцвечивания, связанный с разрушением межмолекулярных водородных связей β -структуры под воздействием света. Исследователи продемонстрировали возможность создания высокоразрешающей долговременной оптической памяти. Технология позволяет записывать фотообесцвеченные структуры, штрих-коды и изображения высокого разрешения.

Добавление информации происходит и с добавлением хромофоров. В статье [9] авторы разработали трехуровневую систему защиты на основе QR-кодов, интегрирующую цифровые полимеры со стимул-чувствительными хромофорами (родамин В, родамин 6G и спиропиран). Ключевой особенностью предложенного подхода является скрытое состояние штрих-кода, который проявляется только при определенных

стимулах и может быть сканирован с помощью смартфона, что обеспечивает первый и второй уровни защиты. Третий уровень защиты представлен зашифрованной информацией в структуре цифровых полимеров, которая может быть расшифрована только с использованием tandemной масс-спектрометрии. Эта технология защиты от подделок требует использования дорогостоящей и сложной в эксплуатации аппаратуры.

Практическое применение для скрытой записи информации и защитной маркировки изделий возможно с использованием динамически реконфигурируемого цвета упаковочных материалов в которых оптические отклики можно настраивать путем изменения показателя преломления, рельефа поверхности [10–12] и размеров [13, 14] локальных зон. Настройка размеров локальных зон оптических устройств с помощью полимеров с памятью формы представляет наибольший интерес, вследствие короткого времени отклика на внешнее воздействие при записи информации. Термоусадочные пленки с памятью формы используются для формирования одномерных и двумерных штриховых кодов. Прозрачные полимерные пленки с «памятью формы» на зеркальных поверхностях благодаря своим оптическим свойствам могут быть использованы в качестве носителя информации, однако эти наиболее экономичные новые способы маркировки и записи скрытой информации предполагают наличие ДВУХ светофильтров для поляризации света на источнике излучения и средствах идентификации маркировки [15].

В настоящем исследовании показана возможность исключения из процесса идентификации товаров по скрытой маркировке и / или считывания информации из невидимого логотипа или штрихового кода светофильтра-поляризатора, или специального источника поляризованного света.

Материалы и методы

Коммерчески доступные термоусадочные с «памятью формы» пленки поливинилхлорида различных производителей: АО «Дон-полимер», толщиной 70 ± 10 мкм, «Dongil Chemical», толщиной $50 \pm 3,5$ мкм, «Klockner Pentaplast», толщиной 45 ± 5 мкм. Пленки поливинилхлорида обладают высокими механическими характеристиками и широко применяются для изготовления упаковки товаров и продуктов [16].

Коммерчески доступные биоксально ориентированные пленки изотактического полипропилена (BOPP): прозрачная марки HGW-40 толщиной 45 ± 5 мкм и металлизированная HMGW.M-20 толщиной 25 ± 5 мкм.

Поляризованный световой луч формировался и анализировался с помощью поляризационной пленки NPF F1205DU (Япония), обеспечивающей степень поляризации света 95,8%.

Для изучения оптических характеристик из пленок вырезали ленты различной длины, которые собирали в многослойные пакеты с последовательным увеличением длины (стопа Столетова). Пакеты помещались на изделия, имеющие гладкие непрозрачные отражающие поверхности (зеркала): алюминиевой фольги, стеклянного зеркала, металлизированной пленки BOPP. Цветные эффекты получали, варьируя количество слоев в пакете. Фотографирование и измерение координат цвета производили спектрофотометром X-Rite i1Pro.

Цвет многослойных пленок в нормальном и поляризованном свете оценивали с использованием координат равномерного цветового пространства $L^*a^*b^*$, а также по величине цветового различия ΔE и контраста (формула 1, 2).

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

$$PCS = \frac{L_2 - L_1}{L_2} 100\% \quad (2)$$

Здесь ΔL – разность значений светлоты, Δa – разность цвета по красно-зеленому компоненту, а Δb – разность цвета по желто-синему компоненту в соответствии с цветовым пространством CIELAB.

Для измерения внутренних напряжений в плёнке с «памятью формы» образцы в форме лент, вырезанных поперек направления экструзии, фиксировали в зажимах цифрового малоинерционного динамометра с функцией записи максимального усилия (рисунок 1.)

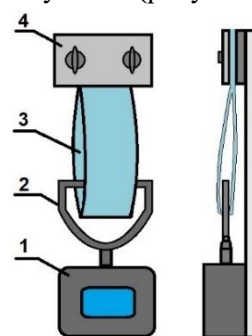


Рисунок 1. Схема динамометра для измерения силы термоусадки с регулируемой долей «свободной» термоусадки: 1 – динамометр, 2 – держатель пленки – регулятор «свободной» термоусадки, 3 – лента из пленки; 4 – зажим (струбцина) для фиксации концов образца пленки

Figure 1. Diagram of a dynamometer for measuring the shrink force with an adjustable proportion of “free” shrinkage: 1 – dynamometer, 2 – film holder – “free” shrinkage regulator, 3 – film strip, 4 – clamp (screw clamp) for fixing the ends of the film sample.

Образец пленки поливинилхлорида с «памятью формы» в форме ленты 200 x 40 мм складывают вдвое (рисунок 1, поз. 2) и укладывают средней частью на держатель пленки – регулятор «свободной» термоусадки, соединенный с измерителем силы усадки (рисунок 1, поз. 1). Концы ленты зажимают металлической струбиной (рисунок 1, поз. 4) и оплавливают газовой горелкой для надежной фиксации длины образца в устройстве. При нагревании образца в таком положении свободная усадка отсутствует и измеритель силы усадки фиксирует максимум внутренних напряжений в образце пленки. В процессе выполнения задачи по уменьшению уровня внутренних напряжений образцы перед термообработкой укладывают средней частью на держатель (рисунок 1, поз. 2) с зазором. Величина зазора, при котором отсутствует напряжение после термоусадки ленты соответствует 46% длины образца между шпилькой и зажимами. Изменяя размер зазора,

получали образцы термоусадочной пленки, имеющие различный уровень внутренних напряжений предназначенные для повторной термоусадки без зазора и изучения оптических эффектов измерения цвета и оценки плеохроизма в поляризованном потоке света.

Результаты и обсуждения

Многослойные прозрачные окрашенные триадной краской и бесцветные термоусадочные пленки поливинилхлорида приобретают в поляризованном свете различную окраску, определяющуюся тремя равнозначными факторами: цветом и толщиной слоя краски, числом слоев пленки и углом наблюдения. Соотношения этих факторов является предметом настоящего исследования, выполненного с целью скрытой записи информации (маркировки) на гибкой полимерной упаковке товаров и продуктов массового потребления.



(a)

3 слоя ПП синего цвета режима пленка-поляризатор

3 layers PP blue color mode film-polarizer

	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
L	32	53	59	64	70	72	69	65	57	53	31
A	-5	1	-12	-87	-82	-18	-68	-90	-39	14	-7
b	-18	-19	-46	0	38	22	36	20	-41	-12	11
Цвет Color											

(b)

Рисунок 2. Фотографии в поляризованном потоке света (координаты цвета) под различными углами пакетов пленок из 10 и 3 х слоев пленки поливинилхлорида (соответственно). Бесцветные под прямым углом (a) и окрашенные [2] голубой триадной краской под различными углами наблюдения (b)

Figure 2. Photographs in polarized light (color coordinates) at different angles of packages made from 10-layer and 3-layer polyvinyl chloride films, respectively. Colorless at a right angle (a) and colored [2] with blue triad dye at different observation angles (b)

Причиной появления и изменения цвета пакета пленок, а также явления плеохроизма, являются внутренние напряжения в полимере «заторможенные» в производстве термоусадочных упаковочных материалов путем «холодной» вытяжки при температуре ниже температуры стеклования термопласта.

По методике термообработки пленок с фиксированными размерами (рисунок 1) приготовлены 10 образцов пленки ПВХ с памятью формы, отличающиеся уровнем внутренних напряжений. Снижение внутренних напряжений в пленках, обладающих эффектом «память формы» исследовали по методике, предложенной в работе [17]. Величина внутреннего напряжения в пленках измерена в зависимости от доли

свободной усадки (рисунок 3). Измерялась величина внутренних напряжений в ПВХ-пленках в зависимости от степени свободной усадки в приборе (рисунок 1) при кратковременном «быстром» нагревании до температуры ниже температуры стеклования термопласта.

По мере уменьшения внутренних напряжений в пленке поливинилхлорида при частичной термоусадке изменяются ее оптические свойства. Когда внутреннее напряжение в пленке поливинилхлорида падает ниже 1 МПа, различие цвета (ΔE) между двумя слоями пленки ВОРР под ней в многослойном пакете достигает 20 единиц. Такого уровня цветового контраста между внутренними слоями достаточно для записи информации на многослойной оболочке путем

высечки (перфорации) одного из слоев ВОРР – пленки. Поскольку внутреннее напряжение продолжает снижаться ниже 1 МПа, контраст и разница в цвете слоев ВОРР в местах перфорации продолжают увеличиваться на фиг. 4. Однако на этом этапе внешняя термоусадочная пленка из ПВХ теряет способность удерживать этикетку на контейнере. Этикетка может расслаиваться и отделяться от банки (контейнера с проуктом) во время транспортировки. Поэтому степень свободной усадки должна быть ограничена 10–60%.

Например, если на приборе (рисунок 1.) держатель 4 расположен на небольшом расстоянии от перегиба образца пленки и зазор составляет 0,05 его длины то свободная усадка пленки при нагревании составит 5%, а доля усадки образца от максимально возможного

сокращения размеров пленки без ограничения ее длины составит 10%. Динамометр поз. 1 измерит силу сжатия пленки соответствующую напряжению $3,5 \pm 0,5$ МПа. Если зазор между держателем и местом перегиба образца пленки составляет 0,3 его длины то свободная усадка пленки при нагревании составит 60% и напряжение в пленке после термоусадки будет минимальным $1 \pm 0,5$ МПа (рисунок 3). Внутреннее напряжение менее 1 МПа в пленке поливинилхлорида образующей внешний слой оболочки негативно влияет на её фиксацию на зеркальной поверхности цилиндрической тары и изделий с криволинейной поверхностью.

Размещение пленок на зеркальной поверхности обуславливает изменение цвета многослойного пакета в поляризованном свете.

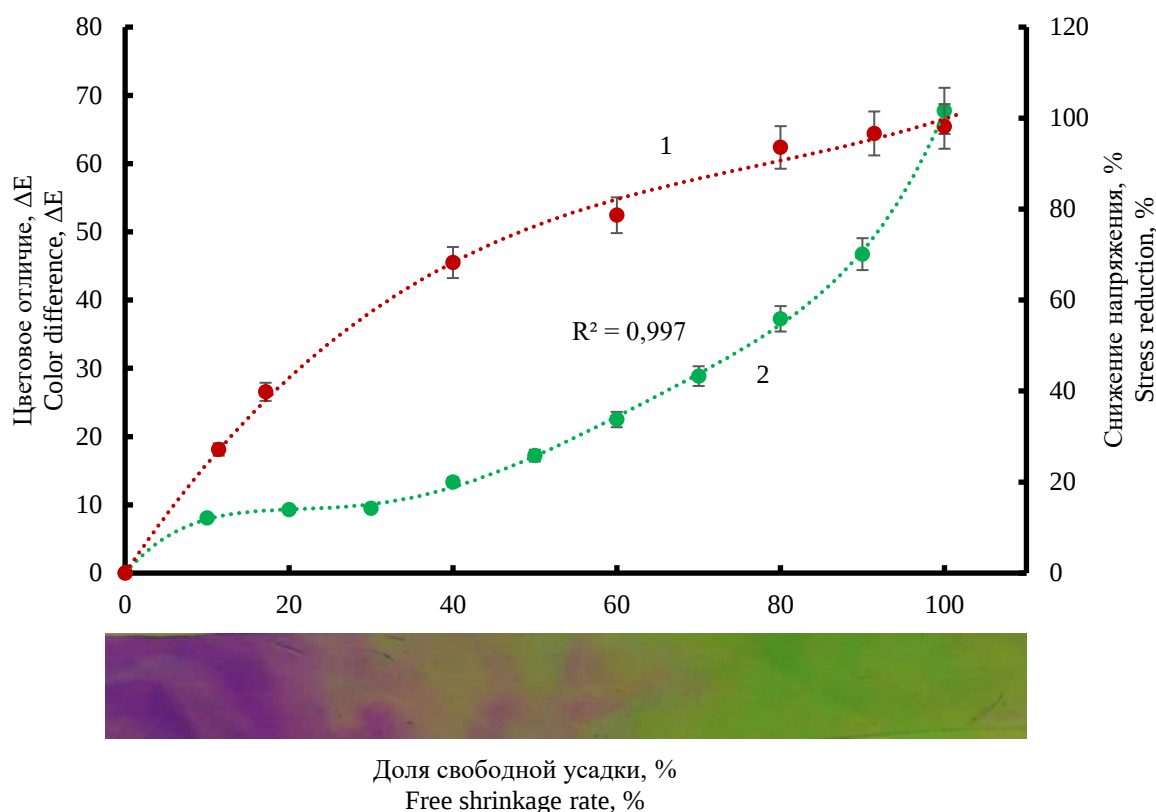


Рисунок 3. 1 – Нормированное снижение внутренних напряжений в ТУ пленке ПВХ с памятью формы в результате свободной усадки. 2 – Изменение цвета в поляризованном свете оболочки при градиентной усадке внешнего слоя из пленки ПВХ

Figure 3. Normalized reduction of internal stresses in shape memory PVC shrink film as a result of free shrinkage. Color change of the shell in polarized light during the gradient shrinkage of the outer layer made of PVC film

Уровень внутренних напряжений в пленке поливинилхлорида с памятью формы зависит от величины свободной усадки пленки при нагревании и непропорционально деформации снижается до нуля при полном сокращении длины образцов (рисунок 3).

Для количественного изучения и наглядной демонстрации существенной зависимости цвета прозрачных многослойных оболочек от свободной термоусадки разработана методика получения образцов с градиентом внутренних напряжений (рисунок 4). Это адекватная

физическая модель производственного процесса аппликации этикеток, колереток и колпачков из термоусадочной пленки на таре с помощью промышленных агрегатов типа BS-2020A Hualian [18].

Для моделирования процесса аппликации из пленки ПВХ сформировали рукав, длина окружности которого соответствует большему сечению конуса (рисунок 4).

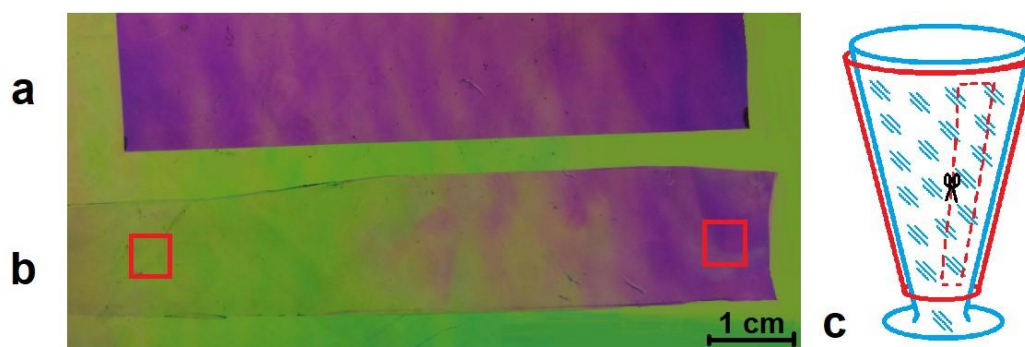


Рисунок 4. Фото в проходящем поляризованном свете образцов, вырезанных из многослойной прозрачной оболочки до термоусадки на конусе (а) и после градиентной усадки (б). Схема термоусадки РУКАВА на конусе (с)

Figure 4. Photographs in transmitted polarized light of samples cut from the multilayer transparent film before heat shrinking on a cone (a) and after gradient shrinkage (b). Diagram of the sleeve heat-shrinking process on a cone (c)

Рукав одевали на стеклянный конус (колбу). Собранный конструктор из полимера и стекла нагревали потоком горячего воздуха или погружением в воду при температуре $75 \pm 5^\circ\text{C}$.

Пакет из двух анизотропных пленок полипропилена (BOPP) и пленки поливинилхлорида с памятью формы представляет собой полно-размерную модель прозрачной многослойной оболочки зеркальных объектов (товаров, емкостей) с функцией скрытой маркировки и записи цифровой информации.

Фотографии многослойной прозрачной оболочки в проходящем поляризованном свете после градиентной усадки внешнего слоя пленки поливинилхлорида иллюстрируют необычный оптический эффект увеличения прозрачности термоусадочной пленки поливинилхлорида и «исчезновения» ее «окраски» в составе многослойной оболочки (рисунок 4).

Для количественного изучения этого оптического эффекта провели спектроскопическое исследование прозрачности термоусадочной пленки в обычном и проходящем поляризованном свете после частичной усадки (рисунок 5 и 6).

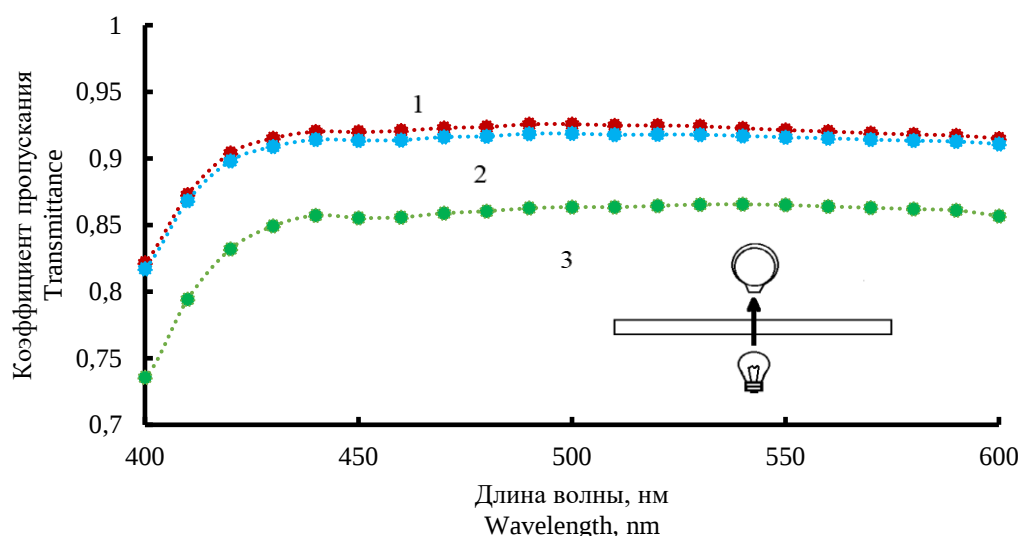


Рисунок 5. Спектры прозрачности пленки с разным уровнем внутреннего напряжения: 1 – пленка до усадки, 2 – усадка 5%, 3 – усадка 90%

Figure 5. Transmittance spectra of the film with different levels of internal stress: 1 – film before shrinkage, 2 – 5% shrinkage, 3 – 90% shrinkage

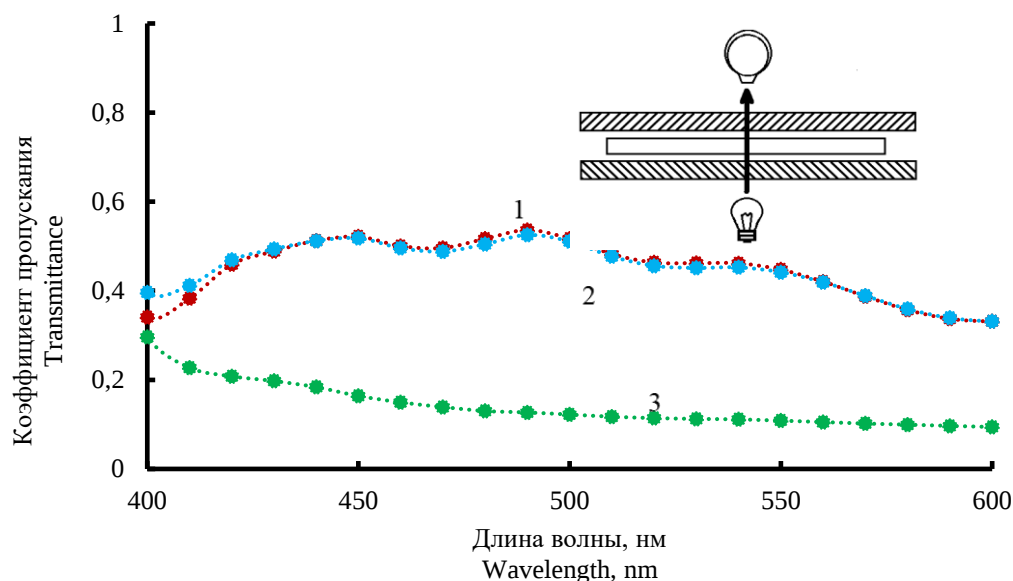


Рисунок 6. Спектры прозрачности пленки с разным уровнем внутреннего напряжения в поляризованном потоке света 1 – пленка до усадки, 2 – усадка 5%, 3 – усадка 90%

Figure 6. Transmittance spectra of the film under polarized light at different levels of internal stress: 1 – film before shrinkage, 2 – 5% shrinkage, 3 – 90% shrinkage

Изменение цвета и прозрачности многослойной оболочки в процессе усадки ТУ пленки ПВХ имеет важное практическое значение для использования прозрачных полимерных плёнок с «памятью формы» при записи информации на зеркальной таре [19].

Согласно предложенному техническому решению [20] термоусадочная пленка используется в качестве внешнего слоя колпачка

(фиксирующего покрытия). С увеличением степени усадки пленки ПВХ теряются её цветовые характеристики в отраженном поляризованном потоке (ПВХ становится прозрачным). Чем он прозрачнее, тем меньше он влияет на цветовую характеристику расположенных под ним 2 слоев ВОРР из которых формируется штриховые и пробельные элементы штрихового кода.



Рисунок 7. а – схема многослойной термоусадочной этикетки из прозрачной пленки поливинилхлорида (1) с «вкладышем» из двух слоев пленки ВОРР (3,4) на стальной банке с полированной поверхностью; б – штриховой код, высеченный из пленки ВОРР с информационной меткой «Z»; в – окно русской программы «QR-сканер» с результатом распознавания штрих-кода «Z» в поляризованном свете

Figure 7. a – diagram of a multilayer heat-shrinkable label made of transparent polyvinyl chloride (PVC) film (1) with an “insert” of two layers of BOPP film (3, 4) on a steel can with a polished surface; b – barcode cut out from BOPP film with an informational tag “Z”; c – window of the Russian program “QR Scanner” showing the result of recognizing the “Z” barcode in polarized light

Колпачок из пленки с усадкой 25% изготовлен из нескольких слоев – из металлизированной пленки BOPP, отражающей свет и среднего слоя с высечками в форме информационных символов – линейного штрихового кода из анизотропной двусло-ориентированной пленки полипропилена толщиной 20 мкм (рисунок 7). При наблюдении колпачка через поляризационный фильтр или сквозь поляризационные очки информационный символ выглядит цветным на белом фоне,

т. е. проявляется в оранжевом, розовом или фиолетовом цвете в зависимости от угла обозрения (таблица 1). При обычном освещении без поляризаторов информационный символ – линейный штрихового кода не имеет цвета, прозрачен и поэтому не заметен (скрыт от наблюдателя). Таким образом, в устройстве оболочки, упаковки или колпачка может быть реализована функция скрытой маркировки.

Таблица 1.

Цвет (*) в CIELAB, контраст и цветовое различие оболочек на различных поверхностях

Table 1.

Color (*) in CIELAB, contrast, and color difference of the films on various surfaces

Маркировка зеркальной тары Marking of mirror containers		Цвет МОДУЛЕЙ ШК* в CIELAB Color (*) in CIELAB						ΔE
		Пробел Space			Штрих Bar			
Фольга Al + BOPP + BOPP + ПВХ	до усадки before shrinkage	12.4	7.1	2.3	28.8	-1.1	-1.3	18.7
	после усадки after shrinkage	49.1	6.4	1.9	67.1	-12	0.2	25.5
Метализ. BOPP + 2 BOPP + ПВХ	до усадки before shrinkage	26.2	17.5	-10	48.3	-8.1	20.7	45.8
	после усадки after shrinkage	42.9	-7.3	-8.9	62.1	1.8	20.4	36.2

Таблица 2.

Координаты цвета, контраст и цветовое различие МОДУЛЕЙ ШК (barcode elements)

Table 2.

Color coordinates, contrast, and color difference of barcode element modules

Позиция элемента кода Code Element Position	Координаты цвета Color Coordinates			Контраст Contrast	Цветовое различие ΔE Color Difference ΔE
	L*	a*	b*		
1 (штрих) bar	87	-4	12	44,8	45,19
4 (пробел) space	48	-15	-8		
2 (штрих) bar	86	-4	10	44,1	44,09
5 (пробел) space	48	-14	-10		
3 (штрих) bar	79	-6	6	41,7	38,01
6 (пробел) space	46	-16	-10		

Видно, что контраст и цветовое различие штриховых и пробельных элементов ШК превышает порог чувствительности глаз человека [15] более чем в 10 раз (таблица 2) и является достаточным для того чтобы штриховой код высеченный в среднем слое прозрачной оболочки зеркальной тары, этикетки или упаковки был легко обнаружен невооруженным глазом и, при необходимости, считан сканером в поляризованном свете.

Заключение

1 Поляризация света, отраженного от зеркальной поверхности стеклянной или металлической тары, фольги или этикетки из металлизированной пленки позволяет использовать многоцветный эффект плеохроизма для привлечения внимания покупателя к товару и скрытой (защитной) маркировки упаковки путем штрихового кодирования информации о товаре.

2 Скрытая маркировка оболочек или упаковки товаров осуществляется размещением (аппликацией) или высечкой плоской фигуры товарного знака или штрихового кода в анизотропной пленке полипропилена, уложенной на зеркальной поверхности между несколькими слоями пленки полипропилена и термоусадочной пленки поливинилхлорида.

3 Плеохроизм многослойной оболочки, формируемой путем термостимулируемой усадки оболочек или цилиндрических этикеток зависит от уровня внутренних напряжений, который задается в диапазоне $1 - 4 \pm 0,5$ МПа нормированной долей свободной усадки 5–65%.

4 Обнаружен парадокс влияния масштаба фактора на прозрачность пленки

поливинилхлорида для потока света, отраженного от зеркальной поверхности.

При свободной усадке и снижении уровня внутренних напряжений во внешнем слое цилиндрической оболочки из термоусадочной пленки поливинилхлорида толщина возрастает по мере сокращения их диаметра до 1,8 раза. При этом ее прозрачность в поляризованном свете снижается в 4 раза. Однако в составе многослойной оболочки прозрачность внешнего слоя пленки поливинилхлорида для потока поляризованного света, отраженного от зеркальной поверхности, существенно увеличивается по мере усадки. Сквозь термоусадочный слой оболочки, проявляется цветная маркировка и увеличивается контраст внутренних слоев.

Литература

- 1 Медведев Р.П., Подковырина Ю.С., Скорынина А.А. Применение люминофора из фосфогипса в качестве люминесцентного наполнителя для полимеров // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 1 (83). С. 219–224.
- 2 Васина Ю.А., Род В.А., Авдеева Я.В. и др. Цветопеременные эффекты при печати триадными красками на многослойной упаковке из прозрачной пленки полипропилена // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 8. № 2. С. (В печати).
- 3 Nam S., Woo S., Park J.Y. et al. Programmable optical encryption using thickness-controlled stretchable chiral liquid crystal elastomers // *Light: Science & Applications*. 2025. Vol. 14. № 1. P. 136.
- 4 Patent 3563973 US, IPC B29C61/06. Articles with polymeric memory and method of constructing same / Arditti S.J., Avedikian S.Z., Bernstein B.S. publ. 16.02.1971.
- 5 Patent 1075704 GB, IPC B29C48/90. Process and apparatus for producing elastic memory articles / Wray Pierre Edward. publ. 12.07.1967.
- 6 Patent 3144398 US, IPC B29C61/06. Heat-shrinkable Polyethylene / Rainer W.C., Redding E.M., Hitov J.J. et al. publ. 11.08.1964.
- 7 Liu X., Kleybolte M.E., Hantro M. et al. A Fluorescent Polymer for Facile One-Step Writing of Polychromatic Hidden Information in Flexible Films // *Advanced Functional Materials*. 2024. Vol. 34. № 37. P. 2402033.
- 8 Rosenbaum P., Barhom H., Inberg A. et al. Hidden imaging in thin polymer films with embedded fluorescent peptide nanodots // *Optics Express*. 2024. Vol. 32. № 3. P. 4485–4497.
- 9 Huang X., Liang Z., Yang X. et al. Multilevel Anti-counterfeiting Barcode with Enhanced Information Encryption Based on Stimulus-Responsive Digital Polymers // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024. Vol. 16. № 33. P. 43075–43082.
- 10 Ding C., Liu Y., Wang H. et al. Tunable balanced liquid crystal phase shifter based on spoof surface plasmon polaritons with common-mode suppression // *Liquid Crystals*. 2020. Vol. 47. № 11. P. 1612–1623.
- 11 Dong W., Liu H., Behera J.K. et al. Wide bandgap phase change material tuned visible photonics // *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. № 6. P. 1806181.
- 12 Franklin D., Chen Y., Vazquez-Guardado A. et al. Polarization-independent actively tunable colour generation on imprinted plasmonic surfaces // *Nature Communications*. 2015. Vol. 6. P. 7337.
- 13 Mizuno A., Ono A. Dynamic control of the interparticle distance in a self-assembled Ag nanocube monolayer for plasmonic color modulation // *ACS Applied Nano Materials*. 2021. Vol. 4. № 9. P. 9721–9728. doi: 10.1021/acsanm.1c02089
- 14 Cataldi U., Caputo R., Kurylyak Y. et al. Growing gold nanoparticles on a flexible substrate to enable simple mechanical control of their plasmonic coupling // *Journal of Materials Chemistry C*. 2014. Vol. 2. № 37. P. 7927–7933.
- 15 Kondratov A.P., Nikolaev A.A., Nazarov V.G. et al. Design and multilevel structuring of shape memory polymers for pleochroism control // *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. Vol. 140. № 41. P. e54532.
- 16 Седых В.А., Жучков А.В. Технические свойства упаковочных пленок на основе ПВХ // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 2 (56). С. 141–146.
- 17 Kondratov A.P., Cherkasov E.P., Paley V. et al. Recording, storage, and reproduction of information on polyvinyl chloride films using shape memory effects // *Polymers*. 2021. Vol. 13. № 11. P. 1802.
- 18 VF650 Shrink Sleeve Applicator // Accraply. URL: https://www.accraply.com/docs/default-source/default-document-library/sleeving/grahamsleevit_vf650.pdf (дата обращения: 22.05.2025).
- 19 Patent 2013193758 JP, IPC B65D41/62. Shrink cap and container using the same / Ozawa Tatsuro, Furuichi Kozue. publ. 30.09.2013.
- 20 Пат. 2025101494 Российская Федерация. Термоусадочный колпачок / Погиба А.Ю. заявл. 24.01.2025.

References

- 1 Medvedev R.P., Podkovyrina Y.S., Skorynina A.A. The use of phosphor from phosphogypsum as a luminescent filler for polymers. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020. vol. 82. no. 1(83). pp. 219–224. (in Russian)
- 2 Vasina Yu.A., Rod V.A., Avdeeva Ya.V., Kondratov A.P. Color-changing effects when printing with triad inks on multilayer packaging made of transparent polypropylene film. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2025. vol. 8. no. 2. (in Russian)

- 3 Nam S., Woo S., Park J.Y., Choi S.S. Programmable optical encryption using thickness-controlled stretchable chiral liquid crystal elastomers. *Light: Science & Applications*. 2025. vol. 14. no. 1. p. 136. doi:10.1038/s41377-025-01633-7
- 4 Arditti S.J., Avedikian S.Z., Bernstein B.S. Patent US 3563973. Articles with polymeric memory and method of constructing the same. 1971.
- 5 Wray Pierre Edward. Patent GB 1075704. Process and apparatus for producing elastic memory articles. 1967.
- 6 Rainer W.C., Redding E.M., Hitov J.J., Sloan A.W., Stewart W.D. Patent US 3144398. Heat-shrinkable Polyethylene. 1964.
- 7 Liu X., Kleybolte M.E., Hantro M., Butler C., Vagin S.I. et al. A Fluorescent Polymer for Facile One-Step Writing of Polychromic Hidden Information in Flexible Films. *Advanced Functional Materials*. 2024. vol. 34. no. 37. p. 2402033. doi: 10.1002/adfm.202402033
- 8 Rosenbaum P., Barhom H., Inberg A., Lapsker I., Rosenman G. et al. Hidden imaging in thin polymer films with embedded fluorescent peptide nanodots. *Optics Express*. 2024. vol. 32. no. 3. pp. 4485–4497. doi:10.1364/OE.515847
- 9 Huang X., Liang Z., Yang X., Piao M., Huang Z. et al. Multilevel Anti-counterfeiting Barcode with Enhanced Information Encryption Based on Stimulus-Responsive Digital Polymers. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024. vol. 16. no. 33. pp. 43075–43082. doi: 10.1021/acsami.4c06945
- 10 Ding C. et al. Tunable balanced liquid crystal phase shifter based on spoof surface plasmon polaritons with common-mode suppression. *Liquid Crystals*. 2020. vol. 47. no. 11. pp. 1612–1623. doi:10.1080/02678292.2020.1733118
- 11 Dong W., Liu H., Behera J.K., Lu L., Ng R.J.H. et al. Wide bandgap phase change material tuned visible photonics. *Advanced Functional Materials*. 2019. vol. 29. no. 6. p. 1806181. doi: 10.1002/adfm.201806181
- 12 Franklin D., Chen Y., Vazquez-Guardado A., Modak S., Boroumand J. et al. Polarization-independent actively tunable color generation on imprinted plasmonic surfaces. *Nature communications*. 2015. vol. 6. p. 7337. doi: 10.1038/ncomms8337
- 13 Mizuno A., Ono A. Dynamic control of the interparticle distance in a self-assembled Ag nanocube monolayer for plasmonic color modulation. *ACS Applied Nano Materials*. 2021. vol. 4. no. 9. pp. 9721–9728. doi: 10.1021/acsanm.1c02089
- 14 Cataldi U., Caputo R., Kurylyak Y., Klein G., Chekini M. et al. Growing gold nanoparticles on a flexible substrate to enable simple mechanical control of their plasmonic coupling. *Journal of Materials Chemistry C*. 2014. vol. 2. no. 37. pp. 7927–7933. doi: 10.1039/C4TC01153B
- 15 Kondratov A.P., Nikolaev A.A., Nazarov V.G., Vereshchagin V.Y., Volinsky A.A. Design and multilevel structuring of shape memory polymers for pleochroism control. *Journal of Applied Polymer Science*. 2023. vol. 140. no. 41. p. e54532. doi: 10.1002/app.54532
- 16 Sedykh V.A., Zhuchkov A.V. Technical properties of PVC-based packaging films. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2013. no. 2(56). pp. 141–146. (in Russian)
- 17 Kondratov A.P., Cherkasov E.P., Paley V., Volinsky A.A. Recording, storage, and reproduction of information on polyvinyl chloride films using shape memory effects. *Polymers*. 2021. vol. 13. no. 11. p. 1802. doi:10.3390/polym13111802
- 18 VF650 Shrink Sleeve Applicator. URL: https://www.acccaply.com/docs/default-source/default-document-library/sleeving/grahamsleeve_vf650.pdf (in Russian)
- 19 Ozawa Tatsuro, Furuichi Kozue. Patent JP 2013193758. Shrink cap and container using the same. 2013.
- 20 Pogiba A.Yu. Patent RU 2025101494. Heat-shrinkable cap. 2025. (in Russian)

Сведения об авторах

Александра Ю. Погиба преподаватель, кафедра инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, pogiba.a@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0008-6550-2892>

Владислав Ю. Верещагин к.т.н., доцент, кафедра инфокогнитивных технологий, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, slavaver@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1344-4888>

Виктор А. Род студент, техник, кафедра инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, vikdor.andreevich@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-8333-4749>

Александр П. Кондратов д.т.н., профессор, кафедра инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия, apkrezer@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Aleksandra Yu. Pogiba lecturer, innovative materials of printmediaindustry department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, pogiba.a@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0008-6550-2892>

Vladislav Yu. Vereshchagin Cand. Sci. (Tech.), associate professor, infocognitive technologies department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, slavaver@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1344-4888>

Viktor A. Rod student, technician, innovative materials of printmediaindustry department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, vikdor.andreevich@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-8333-4749>

Aleksandr P. Kondratov Dr. Sci. (Tech.), professor, innovative materials of printmediaindustry department, Moscow Polytechnic University, st. Bolshaya Semenovskaya, 38, Moscow, 107023, Russia, apkrezer@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

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 11/03/2025	После редакции 17/04/2025	Принята в печать 29/04/2026
Received 11/03/2025	Accepted in revised 17/04/2025	Accepted 29/04/2026

Влияние лазерной и струйно-абразивной модификации стальной поверхности на адгезионную прочность эпоксидных защитных покрытий

Никита И. Щегольков	¹	shegolkovnicita@ya.ru	 0009-0002-5422-4061
Людмила Ю. Комарова	¹	luknew@ya.ru	 0000-0003-3005-6411
Александр И. Цыбин	²	tsybin.a@tnzinc.ru	
Александр П. Кондратов	¹	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

1 Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, Москва, 107023, Россия

2 ООО «Техноватинк», ул. 2-я Энтузиастов, д.5, к. 3, Москва, 111024, Россия

Аннотация. Коррозия оказывает существенное негативное влияние на нефтедобывающую отрасль. В связи с этим остаются актуальными научные исследования в области изучения и совершенствования технологий защиты металлических конструкций от коррозионных разрушений. Наиболее распространенным способом защиты внутренней поверхности трубопроводов является нанесение полимерного слоя на основе различных органических пленкообразующих соединений. Для подготовки стальной поверхности к нанесению лакокрасочного покрытия традиционно применяют струйно-абразивную технологию очистки, но процесс её реализации связан с отрицательным влиянием на окружающую среду и неоднородностью деформации обрабатываемой поверхности. Современной альтернативой является технология лазерной очистки, которая лишена недостатков традиционного метода, но в то же время не имеет достаточной научно-практической базы, подробно описывающей эксплуатационные характеристики полимерного покрытия при эксплуатации. В работе исследовалась адгезионная прочность полимерного слоя на основе эпоксидно-волачных смол, сшитого аминсодержащим отвердителем, на поверхности стальных пластин марки Ст20, очищенных струйно-абразивной и лазерной технологиями. В качестве абразивного материала использовалась улучшенная стальная колотая дробь. Для реализации процесса лазерной очистки использовались два вида оптоволоконных лазеров: с импульсным и непрерывным излучением. Оценка шероховатости поверхности стальных пластин после очистки производилась с помощью профилометра. Адгезионная прочность полимерного слоя определялась методом нормального отрыва грибка. Показано влияние выбора технологии модификации стальной поверхности на степень очистки и глубину микрорельефа поверхности. Продемонстрировано влияние микрорельефа на адгезионную прочность защитного полимерного слоя.

Ключевые слова: адгезионная прочность, полимерный слой, лазерная очистка, струйно-абразивная очистка, шероховатость, эпоксидное покрытие.

Effect of laser and shot blasting modification of steel surface on the adhesion strength of epoxy protective coatings

Nikita I. Shchegolkov	¹	shegolkovnicita@ya.ru	 0009-0002-5422-4061
Lyudmila Yu. Komarova	¹	luknew@ya.ru	 0000-0003-3005-6411
Alexander I. Tsybin	²	tsybin.a@tnzinc.ru	
Alexander P. Kondratov	¹	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

1 Moscow Polytechnic University, st. Bolesnaya Semenovskaja, 38, Moscow, 107023, Russia

2 LLC "Technovatsink", 2-ya Entuziastov St., Bld. 5, Unit 3, Moscow, 111024, Russia

Abstract. Corrosion poses a significant adverse impact on the oil extraction industry. Consequently, scientific research into the study and improvement of technologies for protecting metal structures from corrosive damage remains highly relevant. The most common method for protecting the internal surfaces of pipelines involves applying a polymer layer based on various organic film-forming compounds. Traditionally, shot blasting technology has been used to prepare steel surfaces for the application of paint coatings; however, this process is associated with negative environmental impacts and non-uniform deformation of the treated surface. A modern alternative is laser cleaning technology, which eliminates the drawbacks of the traditional method but lacks sufficient scientific and practical data detailing the operational characteristics of polymer coatings during service. This study investigated the adhesive strength of a polymer layer based on epoxy-novolac resins cross-linked with an amine-containing hardener, applied to grade St20 steel plates cleaned via shot blasting and laser technologies. Enhanced steel grit was employed as the abrasive material. Two types of fiber-optic lasers—pulsed and continuous-wave—were used for the laser cleaning process. Surface roughness of the steel plates post-cleaning was evaluated using a profilometer. The adhesive strength of the polymer layer was determined via a normal pull-off test using a dolly. The research demonstrated the influence of the chosen steel surface modification technology on the degree of cleaning and the depth of surface microrelief. Additionally, the effect of microrelief on the adhesive strength of the protective polymer layer was revealed.

Keywords: adhesive strength, polymer layer, laser cleaning, abrasive blasting, surface roughness, epoxy coating.

Для цитирования

Щегольков Н.И., Комарова Л.Ю., Цыбин А.И., Кондратов А.П. Влияние лазерной и струйно-абразивной модификации стальной поверхности на адгезионную прочность эпоксидных защитных покрытий // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 190–197. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-190-197

For citation

Shchegolkov N.I., Komarova L.Yu., Tsybin A.I. Kondratov A.P. Effect of laser and shot blasting modification of steel surface on the adhesion strength of epoxy protective coatings. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 190–197. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-190-197

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

Введение

Коррозия наносит колоссальный ущерб стальным конструкциям, эксплуатируемым в условиях атмосферной и коррозионно-агрессивной среды. К последней можно отнести действие влаги и агрессивных химических соединений на внешние и внутренние поверхности стальных труб при их эксплуатации в недрах земли, в том числе при добыче нефти, с высоким содержанием в транспортируемом флюиде воды, твердых абразивных частиц, а также углекислого газа и сероводорода.

Коррозионные разрушения в нефтегазовой отрасли приводят к экономическим затратам на ремонт оборудования в размере от 2 до 5% от ВВП для стран с развитой экономикой. Внедрение и развитие методов борьбы с коррозией могут снизить эти затраты на 15–35% [1–3].

Наиболее распространенным способом защиты металлических конструкций в нефтегазовой отрасли, в частности, внутренней поверхности стальных трубопроводов, является нанесение полимерных покрытий.

Защитные полимерные покрытия, на основе эпоксидных смол, после отверждения образуют термореактивный материал с высокой прочностью, химической и коррозионной стойкостью, благодаря чему они нашли широкое применение в промышленности [4–6].

Важнейшим свойством для защитных полимерных покрытий является их адгезия к защищаемой поверхности [7].

Для обеспечения условий образования адгезионных связей на границе контакта полимер – сталь необходимо подготовить поверхность субстрата. Подготовка реализуется путем очистки поверхности от загрязняющих соединений, следов коррозии и формированием развитого микрорельефа, оцениваемого шероховатостью. Шероховатость отвечает за площадь контакта полимер – сталь и напрямую влияет на адгезионную прочность защитной системы [8, 9].

Наиболее распространенной технологией подготовки поверхности является струйно-абразивная обработка различными абразивными материалами. Поверхность стали после подобной модификации приобретает развитую морфологию, что позволяет добиться высокой адгезионной прочности полимерного слоя к субстрату [10, 11].

В тоже время, для технологии струйно-абразивной модификации характерны следующие недостатки: негативное влияние на окружающую

среду, низкая эффективность при очистке поверхностей с сложной геометрией, неоднородность деформации поверхности, а также зависимость от формы и качества абразивного материала [12, 13].

В качестве альтернативы рассматривается технология лазерной очистки. Это передовой способ модификации поверхности, в котором используется высокоэнергетический лазерный луч для удаления загрязняющих соединений и формирования микрорельефа поверхности. В сравнении с традиционными подходами подготовки металлоконструкций к нанесению лакокрасочного покрытия, она отличается экологичностью, высокой точностью, эффективностью и гибкостью настройки процесса модификации.

Лазерная очистка основана на фототермической абляции – нагреве металла до температуры межфазной границы с последующим испарением поверхностного слоя. Локальное воздействие лазерного излучения и возникающее давление разрушают загрязнения, а плазменный шлейф создает зону высокого внутреннего давления с циклами нагрев-охлаждение. Это способствует изменению физико-химических свойств поверхности.

Ключевые параметры процесса лазерной очистки – мощность, интенсивность и частота излучения. При низкой интенсивности удаляются загрязнения без изменения морфологии, тогда как высокая интенсивность вызывает плавление металла и выброс вещества, формируя развитый микрорельеф [14–17].

Фундаментальным параметром лазерной модификации является тип излучения: непрерывное или импульсное. Каждая имеет свои особенности, характеристики и области применения.

Непрерывное лазерное излучение обеспечивает постоянный поток энергии, что делает его эффективным для очистки крупномасштабных промышленных объектов с высокой производительностью. Благодаря высокой мощности, оно способно удалять трудноотделяемые загрязнения. При этом высокая мощность излучения может приводить к избыточному тепловому воздействию на материал и вызывать его повреждения. Непрерывные лазеры широко используются благодаря своей доступности и производительности [18, 19].

Импульсное излучение основано на использовании серии коротких импульсов с высокой энергией, позволяющей удалять с обрабатываемой поверхности ржавчину и оксидные соединения. Характеризуется меньшей средней мощностью, что позволяет обрабатывать поверхность без перегрева [20].

В настоящее время, для технологии лазерной очистки, отсутствует единый стандарт, регламентирующий степень очистки стальной поверхности перед нанесением лакокрасочного покрытия, аналогичный международному стандарту ISO 8501–1 для струйно-абразивного способа модификации.

Также отсутствуют в достаточном объеме экспериментальные данные, раскрывающая взаимосвязь параметров настройки лазерного излучателя и адгезионной прочности полимерного слоя, в частности, на основе эпоксидных смол. Тем не менее, научные работы, раскрывающие эту взаимосвязь, активно публикуются в последние годы [21–23].

Целью работы является исследование степени очистки и шероховатости стальной поверхности после воздействия импульсного и непрерывного лазерного излучения и сравнение результатов с традиционной струйно-абразивной обработкой. Оценить адгезионную прочность полимерного покрытия после предварительной модификации рассматриваемыми технологиями.

Работа является отправной точкой для дальнейшего изучения возможностей технологии лазерной очистки и её применения в области защиты поверхности трубопроводов в нефтедобывающей отрасли.

Материалы и методы

В качестве экспериментальных образцов были выбраны пластины из стали марки Ст 20. Размер пластин: 100 x 50 x 3,9 мм.

Исходное состояние изучаемой поверхности относится к типу «А» согласно ГОСТ Р ИСО 8501–1–2014.

В качестве основы полимерного антикоррозионного слоя использовалась эпоксидно-фенольная смола с отвердителем аминного типа.

При подготовке стальной поверхности к нанесению полимерного покрытия использованы два принципиально разных способа очистки и модификации поверхности: лазерный и струйно-абразивный.

Для лазерной очистки и модификации стальной поверхности использовались два вида оптоволоконных лазерных излучателей: импульсный и непрерывный.

Струйно-абразивная очистка поверхности стальных пластин производилась в закрытой стационарной камере напорного типа. В качестве абразивного материала применялась стальная литая колотая дробь улучшенная (ДСКУ), изготовленная согласно ГОСТ 11964.

Параметры процессов модификации стальной поверхности приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры процессов модификации стальной поверхности

Table 1.

Parameters for steel surface modification processes

Технология модификации Modification technology	Параметры процесса Parameters			
	Мощность, Вт Power, Watt	Частота излучения, кГц Radiation frequency, kHz	Площадь пятна, см² Spot area, cm²	Длина волны, нм Wavelength, nm
Лазерная очистка, импульсный источник Laser cleaning, pulsed source	100	500	1,8	1080
Лазерная очистка, непрерывный источник Laser cleaning, continuous source	1500	5000	12,6	
Струйно-абразивная очистка Blast cleaning	ДСКУ, фракция 0,7–0,8 мм, давление подачи из сопла составляет 6 атм DSCU, fraction 0.7-0.8 mm, supply pressure from the nozzle is 6 atm			

С помощью каждой технологии модификации было обработано по 10 стальных пластин, взятых из одной производственной партии. Среднее время процесса модификации поверхности одного образца для каждой технологии составляло 15–20 секунд.

На каждой пластине после процесса модификации проводилась оценка шероховатости поверхности в пяти точках при помощи профилометра «Time Group Inc TR220». Базовая линия измерений составляла 0,8 мм. Результат зафиксирован в виде среднеарифметического значения для параметров R_z , R_a и R_{max} [24].

Перед нанесением жидкого полимерного слоя пластины обезжиривали промывкой химически чистым ацетоном.

Нанесение лакокрасочного покрытия производилось на лабораторной установке по принципу безвоздушного распыления, при котором жидкий полимерный материал разбивается в мелкий аэрозоль с помощью механического вращения распылителя, приводимого в движение воздушной турбиной.

Полимеризация защитного слоя происходила в сушильном шкафу без вентиляции при температуре в $160 \pm 5^\circ \text{C}$ в течении одного часа.

Измерение толщины полимерного покрытия осуществлялось с помощью прибора измерения геометрических параметров «Константа К5». Средняя толщина полимерного покрытия на образцах составила 170 ± 3 мкм.

Величина адгезионной прочности полимерного слоя определялась методом нормального отрыва грибка по ГОСТ 32299–2013. На каждом образце стальной пластины с лакокрасочным

покрытием производилось 2 испытания по определению адгезионной прочности. За результат принималось среднее арифметическое всех измерений.

Результаты и обсуждение

Внешний вид поверхности стальных пластин до и после процесса модификации тремя технологиями представлен на рисунке 1.

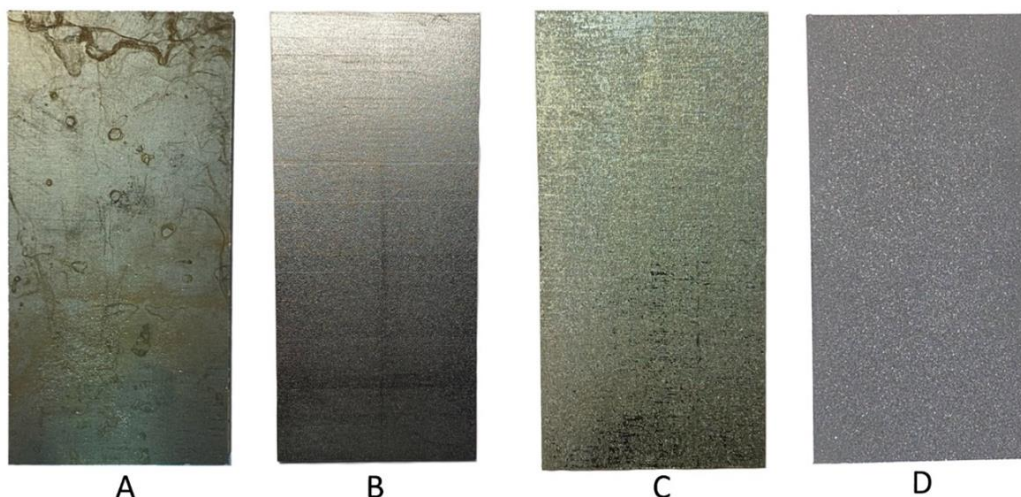


Рисунок 1. Внешний вид поверхности стальной пластины до и после процесса модификации: А – без модификации; В – лазерная очистка, импульсный источник; С – лазерная очистка, непрерывный источник; D – струйно-абразивная очистка ДСКУ

Figure 1. Appearance of the steel plate surface before and after the modification process: A – untreated; B – laser cleaning, pulsed source; C – laser cleaning, continuous source; D – shot blasting with improved steel grit

Исходное состояние стальной поверхности (рисунок 1 – А) характеризуется наличием прокатной окалины и низким содержанием продуктов коррозии.

На поверхности стальной пластины, подвергнутой лазерной очистке импульсным источником (рисунок 1 – В), наблюдается удаление следов ржавчины, но остается равномерный поверхностный слой окисленного металла, что свидетельствует о незначительной глубине очистки.

После процесса лазерной абляции, с использованием источника непрерывного излучения, зафиксирована очистка поверхности от продуктов коррозии и частичное удаление слоя прокатной окалины (рисунок 1 – С). Данный результат визуально сопоставим с степенью очистки Sa 2 [25], допускающий наличие на поверхности трудноотделимой прокатной окалины.

На образцах после струйной абразивной модификации ДСКУ (рисунок 1 – D) зафиксирована глубокая степень очистки Sa3 [25], подразумевающая очистку до видимой чистой стали.

Исходная и сформированная шероховатости после обработки тремя технологиями модификации поверхности отображены в таблице 2.

Таблица 2.

Исходная и сформированная шероховатости после обработки тремя технологиями модификации поверхности

Table 2.

Initial and resulting roughness after processing with three surface modification technologies

Технология модификации Modification technology	R_z , мкм	R_a , мкм	R_{max} , мкм
Без модификации No modification	3,1	1,3	11,1
Лазерная очистка, импульсный источник Laser cleaning, pulsed source	7,8	1,5	11,8
Лазерная очистка, непрерывный источник Laser cleaning, continuous source	22,7	4,7	42,8
Струйно-абразивная очистка Blast cleaning	32,1	6,1	45,9

При анализе результатов измерения шероховатости выявлено, что при использовании струйно-абразивной технологии модификации поверхности удалось добиться десятикратного прироста высоты неровностей профиля (R_z) и увеличения среднего арифметического отклонения профиля (R_a) в 4,7 раза.

При модификации поверхности импульсным излучением зафиксировано увеличение среднего арифметического отклонения профиля на 15,4%. При воздействии на поверхность излучателем, генерирующим непрерывное излучение, увеличение этого параметра составляет 261,5%.

При обработке поверхности непрерывным лазером высота неровностей профиля и среднее отклонение профиля выше в 3 раза, чем при обработке лазером импульсного типа.

Максимальная высота пика шероховатости ($R_{\max}$) после лазерной абляции импульсным источником увеличивается относительно исходной поверхности на 6,3%, тогда как у непрерывного лазера и струйно-абразивной очистки наблюдается сопоставимое увеличение этого параметра в 3,9 и 4,1 раза соответственно.

Наиболее развитый микрорельеф поверхности после воздействия абразивным материалом объясняется тем, что остроугольные частицы дроби, при столкновении с обрабатываемым изделием, придают поверхности анкерный профиль, подразумевающий наличие углублений в обработанной поверхности и, как следствие, увеличение площади, в дальнейшем контактирующей с жидким полимерным составом.

Различная морфология поверхности после модификации двумя видами лазерных излучателей объясняется изменением интенсивности излучения.

Интенсивность излучения характеризует плотность мощности на единицу площади лазерного луча. От её величины зависит возможность оказывать влияние на микрорельеф стальной поверхности [17].

Исходя из уравнения (1) установлено, что интенсивность излучения для импульсного лазера составляет 55,5 Вт/см², а для непрерывного 119,1 Вт/см². Температура поверхности стальной пластины после воздействия импульсного и непрерывного излучений составляет 45° С и 67° С соответственно.

$$I = \frac{P}{A} \quad (1)$$

где: I – интенсивность лазерного излучения, Вт/см²; P – мощность лазерного излучателя, Вт; A – площадь лазерного пятна, см².

На рисунке 2 продемонстрирована средняя адгезионная прочность полимерного слоя для рассматриваемых технологий модификации стальной поверхности.

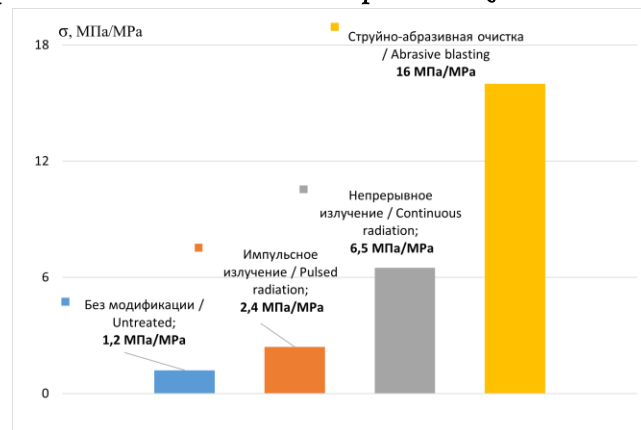


Рисунок 2. Средняя адгезионная прочность полимерного слоя для трёх технологий модификации поверхности

Figure 2. Average adhesive strength of the polymer layer across three surface modification technologies

Наибольшая адгезионная прочность зафиксирована на образцах полимерного покрытия с предварительной струйно-абразивной модификацией. Данный показатель больше в 13,3 раза в сравнении с полимерным слоем без предварительной модификации.

Наименьшая величина адгезии наблюдается при предварительном воздействии на поверхность импульсным излучением, не учитывая поверхность без модификации.

Полимерное покрытие с предварительной обработкой непрерывным излучением демонстрирует на 170,8% более высокую адгезионную прочность по сравнению с импульсной обработкой.

Адгезионная прочность полимерного слоя после предварительной модификаций абразивными материалами в 2,5 раза выше, чем после процесса абляции непрерывным лазером.

На рисунке 3 продемонстрирован характер отрыва грибков при определении адгезионной прочности полимерного слоя.

Наблюдается явно выраженный адгезионный характер отрыва грибка на образце покрытия с предварительной лазерной модификацией импульсным источником, что свидетельствует о сравнительно низкой степени механического сцепления между полимером и сталью.

При отрыве лакокрасочного покрытия после воздействия непрерывным излучением и струйно-абразивной очисткой наблюдается смешанный характер отрыва грибка, с наличием участков адгезионного и когезионного разрушений. При этом на образцах с предварительной модификацией абразивами когезионный характер отрыва более выраженный.

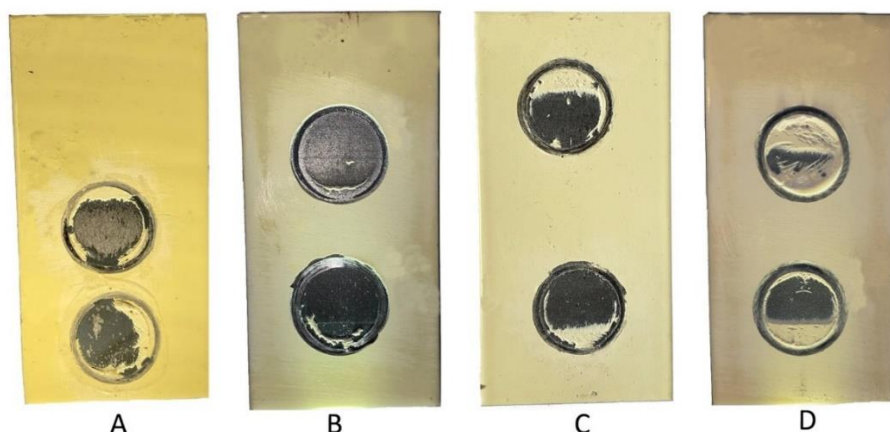


Рисунок 3. Характер отрыва грибков при определении адгезионной прочности полимерного слоя: А – без модификации; В – лазерная очистка, импульсный источник; С – лазерная очистка, непрерывный источник; D – струйно-абразивная очистка ДСКУ

Figure 3. Dolly detachment behavior during adhesive strength testing of the polymer layer: A – untreated; B – laser cleaning, pulsed source; C – laser cleaning, continuous source; D – shot blasting with improved steel grit

Существенная разница в адгезионной прочности полимерного слоя между предварительной обработкой импульсным лазером и струйно-абразивной очисткой – это следствие создания разной рельефности и разной величины поверхностной энергии. Из уравнения (2) видно, что внутренняя энергия поверхностного слоя зависит от площади поверхности раздела фаз, то есть от площади контакта жидкого полимерного состава и стальной поверхности.

$$U_s = \left[\sigma - T \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) \right] \cdot S \quad (2)$$

где: σ – энергия образования единицы поверхности, Дж/м²; T – температура, К; $d\sigma/dT$ – температурный коэффициент, Дж / (м²·К); S – площадь поверхности раздела, м².

Заключение

При реализации технологии лазерной очистки поверхности с использованием импульсного излучателя были удалены продукты коррозионного процесса с минимальными изменениями микрорельефа и без нагрева субстрата. Подобный режим очистки подходит для термочувствительных материалов и / или лакокрасочных покрытий, эксплуатация которых не подразумевает нахождение защищаемой металлоконструкции в агрессивных условиях среды.

Использование непрерывного лазерного излучения позволяет удалить продукты коррозии и частично прокатную окалину, а также сформировать развитый микрорельеф поверхности. Эти явления наблюдаются за счёт большей интенсивности излучения лазера, при этом отмечается повышение температуры изделия.

Таким образом, зафиксировано влияние вида и интенсивности излучения на шероховатость стальной поверхности.

Также подтверждена эффективность традиционной технологии струйно-абразивной модификации с использованием ДСКУ для формирования адгезионно-прочных защитных полимерных покрытий.

Результаты сравнения технологий лазерной и струйно-абразивной модификации демонстрируют, что лазерная обработка непрерывным излучением, обеспечивая сопоставимую с традиционной струйно-абразивной очисткой шероховатость, способна стать экологически безопасной альтернативой.

Применение непрерывного лазерного излучателя наиболее вероятно при внедрении технологии лазерной модификации для очистки стальных трубопроводов в нефтегазовой отрасли, так как данный вид металлоконструкций обрабатывается в больших объемах в рамках производственных процессов и требует развитого микрорельефа поверхности для формирования коррозионностойкого полимерного покрытия.

Новизна работы состоит в определении адгезионной прочности полимерного слоя на основе эпоксидных смол, сшитого отвердителем аминного типа, на стальной поверхности, модифицированной технологией лазерной очистки с использованием двух видов излучателей.

Практическая значимость исследования выражается в том, что полученные данные могут служить основой для разработки нормативной базы, аналогичной ISO 8501–1, что актуально для внедрения лазерных технологий в промышленность.

Дальнейшие исследования в данной области направлены на изучение корреляции настроек лазерного излучателя и физико-химических характеристик обработанной поверхности.

Литература

- 1 Solovyeva V.A., Almuhammadi K.H., Badeghaish W.O. Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review // *Materials*. 2023. V. 16. № 5. P. 1795. doi: 10.3390/ma16051795
- 2 Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 288. Art. 123115. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123115
- 3 Al-Janabi Y.T. An Overview of Corrosion in Oil and Gas Industry // *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry*. 2020. P. 1–39. doi: 10.1002/9783527822140.ch1
- 4 de Leon A.C.C., da Silva Í.G.M., Pangilinan K.D., Chen Q. et al. High performance polymers for oil and gas applications // *Reactive and Functional Polymers*. 2021. V. 162. Art. 104878. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104878
- 5 Сургаева Е.С., Юдин П.Е., Амосов А.П. Разрушение внутренних антикоррозионных полимерных покрытий нефтепромысловых труб при эксплуатации // *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024. № 2. С. 90–100. doi: 10.23947/2541-9129-2024-8-2-90-100
- 6 Darweesh S.Y., Majeed Z.N., Dahham A.T. Improving the Durability of Streak and Thermal Insulation of Petroleum Pipes by Using Polymeric Based Paint System // *Baghdad Science Journal*. 2020. V. 17. № 3. P. 826–831. doi: 10.21123/bsj.2020.17.3.0826
- 7 Sadowski L., Kampa L., Chowanec A., Krolicka A. et al. Enhanced adhesive performance of epoxy resin coating by a novel bonding agent // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 301. Art. 124078. P. 1–16. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124078
- 8 Croll S.G. Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review // *Progress in Organic Coatings*. 2020. V. 148. Art. 105847. P. 1–14. doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105847
- 9 van Dam J.P.B., Abrahami S.T., Yilmaz A., Gonzalez-Garcia Y. et al. Effect of surface roughness and chemistry on the adhesion and durability of a steel-epoxy adhesive interface // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020. V. 96. Art. 102450. P. 1–33. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102450
- 10 Kim A., Kainuma S., Yang M. Surface Characteristics and Corrosion Behavior of Carbon Steel Treated by Abrasive Blasting // *Metals*. 2021. V. 11. № 12. Art. 2065. P. 1–21. doi: 10.3390/met11122065
- 11 Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I. et al. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020. V. 102. Art. 102653. P. 1–32. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102653
- 12 Noraini A.M., Dzuraidah A.W., Zambri H., Nurhasyimah A.A. et al. Assessing Cleaning in Remanufacturing: A Case Study of Shot Blasting Efficiency to Alternator Design // *Jurnal Kejuruteraan*. 2024. V. 36. № 2. P. 429–437. doi: 10.17576/jkukm-2024-36(2)-04
- 13 Basdeki M., Apostolopoulos C. The Effect of the Shot Blasting Process on the Dynamic Response of Steel Reinforcement // *Metals*. 2022. V. 12. № 6. Art. 1048. P. 1–16. doi: 10.3390/met12061048
- 14 Zhou Z., Sun W., Wu J., Chen H. et al. The Fundamental Mechanisms of Laser Cleaning Technology and Its Typical Applications in Industry // *Processes*. 2023. V. 11. № 5. Art. 1445. P. 1–17. doi: 10.3390/pr11051445
- 15 Kumar V., Verma R., Kango S., Sharma V.S. Recent progresses and applications in Laser-based surface texturing systems // *Materials Today Communications*. 2020. V. 26. Art. 101736. P. 1–48. doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101736
- 16 Moldovan E.R., Concheso Doria C., Ocaña J.L., Baltes L.S. et al. Wettability and Surface Roughness Analysis of Laser Surface Texturing of AISI 430 Stainless Steel // *Materials*. 2022. V. 15. № 8. Art. 2955. P. 1–17. doi: 10.3390/ma15082955
- 17 Min J., Wan H., Carlson B.E., Lin J. et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review // *Optics and Laser Technology*. 2020. V. 128. Art. 106188. P. 1–8. doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106188
- 18 Cui K., Luo J., Xu K., Ling L. et al. The Study of Patterns and Mechanisms of Continuous Laser Ablation of Carbon Steel Rust Layers in Multi-Medium Environments // *Applied Sciences*. 2024. V. 14. № 12. Art. 5052. P. 1–18. doi: 10.3390/app14125052
- 19 By Laser. Which is better, pulse or continuous laser cleaner? (25.06.2024). URL: <https://www.lybylaser.com/which-is-better-pulse-or-continuous-laser-cleaner>
- 20 He C., Yang C., Yang H., Wang J. et al. Effect of Different Laser Parameters on Surface Physical Characteristics and Corrosion Resistance of 20 Steel in Laser Cleaning // *Applied Sciences*. 2024. V. 14. № 5. Art. 2058. P. 1–13. doi: 10.3390/app14052058
- 21 Zhuang S., Kainuma S., Yang M., Haraguchi M. et al. Characterizing corrosion properties of carbon steel affected by high-power laser cleaning // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 274. Art. 122085. P. 1–11. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122085
- 22 Ciecińska B. Experimental studies of the possibility of laser processing as a cleaner method of achieving a surface with good adhesion // *Production Engineering Archives*. 2022. V. 28. № 3. P. 233–240. doi: 10.30657/pea.2022.28.28
- 23 Sun X., Yu Q., Bai X., Jin G. et al. Substrate cleaning threshold for various coated Al alloys using a continuous-wave laser // *Photonics*. 2021. V. 8. № 8. Art. 395. P. 1–17. doi: 10.3390/photonics8090395
- 24 ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Стандартинформ, 2018. 6 с.
- 25 ГОСТ 9.402–2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. М.: Стандартинформ, 2006. 39 с.

References

- 1 Solovyeva V.A., Almuhammadi K.H., Badeghaish W.O. et al. Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review. *Materials*. 2023. vol. 16. no. 5. pp. 1795. doi: 10.3390/ma16051795
- 2 Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*. 2021. vol. 288. pp. 123115. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123115
- 3 Al-Janabi Y.T. An Overview of Corrosion in Oil and Gas Industry. *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry*. 2020. pp. 1–39. doi: 10.1002/9783527822140.ch1
- 4 de Leon A.C.C., da Silva Í.G.M., Pangilinan K.D., Chen Q. et al. High performance polymers for oil and gas applications. *Reactive and Functional Polymers*. 2021. vol. 162. pp. 104878. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104878
- 5 Surgaeva E.S., Yudin P.E., Amosov A.P. Degradation of Internal Anticorrosive Polymer Coatings of Oilfield Pipes During Operation. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024. vol. 8. no. 2. pp. 90–100. doi: 10.23947/2541-9129-2024-8-2-90-100 (in Russian)

- 6 Darweesh S.Y., Majeed Z.N., Dahham A.T. Improving the Durability of Streak and Thermal Insulation of Petroleum Pipes by Using Polymeric Based Paint System. Baghdad Science Journal. 2020. vol. 17. no. 3. pp. 826–831. doi: 10.21123/bsj.2020.17.3.0826
- 7 Sadowski L., Kampa L., Chowanec A., Krollicka A. et al. Enhanced adhesive performance of epoxy resin coating by a novel bonding agent. Construction and Building Materials. 2021. vol. 301. pp. 124078. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124078
- 8 Croll S.G. Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review. Progress in Organic Coatings. 2020. vol. 148. pp. 105847. doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105847
- 9 van Dam J.P.B., Abrahams S.T., Yilmaz A., Gonzalez-Garcia Y. et al. Effect of surface roughness and chemistry on the adhesion and durability of a steel-epoxy adhesive interface. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2020. vol. 96. pp. 102450. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102450
- 10 Kim A., Kainuma S., Yang M. Surface Characteristics and Corrosion Behavior of Carbon Steel Treated by Abrasive Blasting. Metals. 2021. vol. 11. no. 12. pp. 2065. doi: 10.3390/met11122065
- 11 Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I. et al. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2020. vol. 102. pp. 102653. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102653
- 12 Abdul Malek N., Abd Wahab D., Harun Z., Abd Aziz N. et al. Assessing Cleaning in Remanufacturing: A Case Study of Shot Blasting Efficiency to Alternator Design. Jurnal Kejuruteraan. 2024. vol. 36. no. 2. pp. 429–437. doi: 10.17576/jkukm-2024-36(2)-04
- 13 Basdeki M., Apostolopoulos C. The Effect of the Shot Blasting Process on the Dynamic Response of Steel Reinforcement. Metals. 2022. vol. 12. no. 6. pp. 1048. doi: 10.3390/met12061048
- 14 Zhou Z., Sun W., Wu J., Chen H. et al. The Fundamental Mechanisms of Laser Cleaning Technology and Its Typical Applications in Industry. Processes. 2023. vol. 11. no. 5. pp. 1445. doi: 10.3390/pr11051445
- 15 Kumar V., Verma R., Kango S., Sharma V.S. Recent progresses and applications in Laser-based surface texturing systems. Materials Today Communications. 2020. vol. 26. pp. 101736. doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101736
- 16 Moldovan E.R., Concheso Doria C., Ocaña J.L., Baltes L.S. et al. Wettability and Surface Roughness Analysis of Laser Surface Texturing of AISI 430 Stainless Steel. Materials. 2022. vol. 15. no. 8. pp. 2955. doi: 10.3390/ma15082955
- 17 Min J., Wan H., Carlson B.E., Lin J. et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. Optics and Laser Technology. 2020. vol. 128. pp. 106188. doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106188
- 18 Cui K., Luo J., Xu K., Ling L. et al. The Study of Patterns and Mechanisms of Continuous Laser Ablation of Carbon Steel Rust Layers in Multi-Medium Environments. Applied Sciences. 2024. vol. 14. no. 12. pp. 5052. doi: 10.3390/app14125052
- 19 By Laser. Which is better, pulse or continuous laser cleaner? 25.06.2024. URL: <https://www.lybylaser.com/which-is-better-pulse-or-continuous-laser-cleaner> (accessed: 25.06.2024)
- 20 He C., Yang C., Yang H., Wang J. et al. Effect of Different Laser Parameters on Surface Physical Characteristics and Corrosion Resistance of 20 Steel in Laser Cleaning. Applied Sciences. 2024. vol. 14. no. 5. pp. 2058. doi: 10.3390/app14052058
- 21 Zhuang S., Kainuma S., Yang M., Haraguchi M. et al. Characterizing corrosion properties of carbon steel affected by high-power laser cleaning. Construction and Building Materials. 2021. vol. 274. pp. 122085. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122085
- 22 Ciecinska B. Experimental studies of the possibility of laser processing as a cleaner method of achieving a surface with good adhesion. Production Engineering Archives. 2022. vol. 28. no. 3. pp. 233–240. doi: 10.30657/pea.2022.28.28
- 23 Sun X., Yu Q., Bai X., Jin G. et al. Substrate cleaning threshold for various coated Al alloys using a continuous-wave laser. Photonics. 2021. vol. 8. no. 9. pp. 395. doi: 10.3390/photonics8090395
- 24 State Standard 2789–73. Surface Roughness. Parameters and Characteristics. Moscow: Standartinform, 2018. 6 p. (in Russian)
- 25 State Standard 9.402–2004. Unified System of Corrosion and Aging Protection. Paint and Varnish Coatings. Preparation of Metal Surfaces for Painting. Moscow: Standartinform, 2006. 39 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Никита И. Щегольков аспирант, полиграфический институт, Московский Политехнический университет, ул. Большая Семеновская 38, г. Москва, 107023, Россия, shchegolkovnicita@ya.ru
 <https://orcid.org/0009-0002-5422-4061>

Людмила Ю. Комарова к.т.н., доцент, полиграфический институт, Московский Политехнический университет, ул. Большая Семеновская 38, г. Москва, 107023, Россия, luknew@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-3005-6411>

Александр И. Цыбин к.х.н., технический директор, лаборатория, ООО «Техновацинк», ул. 2-я Энтузиастов, д.5, к. 3, Москва, 111024, Россия, tsybin.a@tnzinc.ru

Александр П. Кондратов д.т.н., профессор, полиграфический институт, Московский Политехнический университет, ул. Большая Семеновская 38, г. Москва, 107023, Россия, apkrezerov@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Nikita I. Shchegolkov graduate student, polygraphic institute, Moscow Polytechnic University, st. Bolesnaya Semenovskaja, 38, Moscow, 107023, Russia, shchegolkovnicita@ya.ru
 <https://orcid.org/0009-0002-5422-4061>

Lyudmila Yu. Komarova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, polygraphic institute, Moscow Polytechnic University, st. Bolesnaya Semenovskaja, 38, Moscow, 107023, Russia, luknew@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-3005-6411>

Alexander I. Tsybin Cand. Sci. (Chem), technical director, laboratory, LLC «Technovatsink», 2-ya Entuziastov St., Bld. 5, Unit 3, Moscow, 111024, Russia, tsybin.a@tnzinc.ru

Alexander P. Kondratov Dr. Sci. (Engin.), professor, polygraphic institute, Moscow Polytechnic university, st. Bolesnaya Semenovskaja, 38, Moscow, 107023, Russia, apkrezerov@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

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 11/04/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 10/05/2025
Received 11/04/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 10/05/2025

Development of antimicrobial packaging materials using rosemary essential oil

Emiru Y. Melesse	¹	emydms12@gmail.com	 0000-0002-0871-787X
Ali Y. Alkhair	¹	alkheerali@gmail.com	 0000-0002-9518-7781
Ekaterina A. Shchukina	¹	katya_shchukina2003@mail.ru	 0009-0008-3834-0904
Irina A. Kirsh	²	irina-kirsh@ya.ru	 0000-0003-3370-4226
Anna V. Zaitseva	³	fairy.tail.1872@mail.ru	 0009-0001-7822-7577

1 Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Russian Biotechnological University, Moscow, Russia Federation

Abstract. In the context of increasing requirements for food safety and quality, it is important to develop effective methods of protection against microbial contamination. One of the innovative solutions is active packaging with natural antimicrobial additives that prevent the growth of microorganisms on the surface of products. These additives must retain their properties both during production and during further use. The main objective of this study was development of an active packaging film made of biopolymer with the introduction of rosemary essential oil in various concentrations, as well as determination of the antimicrobial, physical, mechanical and barrier properties of the resulting polymer material. The starch-based film was prepared by mechanical mixing of the initial reagents with the introduction of rosemary essential oil with a concentration of 0.5%; 1%; 3%; 5%. The antimicrobial properties of the polymer packaging material were determined by the disk-diffusion method in accordance with MUK 4.2.1890–04 in relation to *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Candida albicans*, and *Aspergillus niger*. To assess the fungal resistance of the materials, the methods of GOST 9.049 (method 1) and GOST 9.048 (method 4) were selected. Determination of vapor permeability using the "PERME W3/030" device according to GOST GB1037. The method for determining the physical and mechanical properties on a tensile testing machine according to GOST 28840–90. It was found that samples of packaging film based on starch with rosemary essential oil have antimicrobial activity against *Candida albicans* at concentrations of 3% and 5%, reducing the number of microorganisms on the film surface. In addition, its physical, mechanical and barrier properties are improved. Analysis of existing studies has shown that rosemary essential oil is an effective natural antimicrobial component. Its use in active starch-based packaging not only prevents the growth of microorganisms such as *Candida albicans*, but also helps improve the physical, mechanical and barrier properties of the packaging film. This makes it a promising solution for ensuring the safety and quality of food products.

Keywords: rosemary essential oil, antimicrobial properties, active packaging, starch-based film, physical and mechanical properties, barrier properties.

Introduction

The issues of food safety and quality are becoming increasingly important, and therefore the development of new and effective methods for protecting products from microbial contamination is a pressing issue. One of the innovative approaches in this area is the use of active packaging, which is based on the use of natural antimicrobial additives to prevent the growth and reproduction of microorganisms on packaged products [1]. An antimicrobial additive included in the polymer must retain its properties both during production and during subsequent use. The main requirements for such additives include ensuring hygienic safety when interacting with food products and maintaining physical and mechanical characteristics. The packaging material must remain strong, flexible and resistant to external influences, including temperature changes, humidity levels and mechanical stress, even in the presence of antimicrobial components [2].

Currently, much work has been done to impart antimicrobial properties to polymers. The list of substances capable of imparting antimicrobial properties to polymeric materials is quite wide, for example, chitosan; carvacrol; eugenol, geraniol, linalool, terpineol and thymol [3].; However, the

use of natural antimicrobial additives, namely essential oils, is particularly successful. Essential oils attract the attention of researchers due to their antimicrobial properties, which allow them to be considered a safe alternative to synthetic ones. These oils contain active components such as terpenes, which have the ability to destroy or suppress the growth of various microorganisms, including bacteria and fungi. The most popular essential oils include tea tree oil, lemongrass, eucalyptus, thyme, lavender and cloves. The properties of rosemary oil are also being actively studied [4].

One of the significant studies in this area is the work of Nafiseh Mohsenabadi, who developed an active film based on corn starch using benzoic acid and chitosan. By encapsulating rosemary essential oil in the created nanogel (benzoic acid + chitosan) CS-BA, starch-carboxymethyl cellulose (CMC) films with improved physicomechanical and antimicrobial properties were obtained. Films containing nanogel demonstrated higher vapor permeability compared to films containing only rosemary essential oil. Interestingly, samples with nanogel showed a gradual inhibitory effect on *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*), while films with free essential oil had an immediate antimicrobial effect, which proves the ability of the nanogel

Для цитирования

Мелессе И.Й., Альхаир А.Я., Щукина Е.А., Кирш И.А., Зайцева А.В. Разработка антимикробных упаковочных материалов с использованием эфирного масла розмарина // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 198–203. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-198-203

For citation

Melesse E.Y., Alkhair A.Y., Shchukina E.A., Kirsh I.A., Zaitseva A.V. Development of antimicrobial packaging materials using rosemary essential oil. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 198–203. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-198-203

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

to reduce the percentage of rosemary essential oil to achieve the same antimicrobial properties. The use of low concentrations of rosemary essential oil allows to reduce the cost of packaging, as well as the effect of essential oil on the organoleptic properties of the food product [5].

Another significant work is the research of Shabanova and Borisova, who studied films based on polylactic acid with the addition of rosemary oil. Their work demonstrated that the addition of essential oil leads to a decrease in the transparency of films, an increase in their humidity and a significant decrease in vapor permeability, which emphasizes its effect on the physical and mechanical properties of materials [6]. This article examines the development of an antimicrobial film based on starch with the addition of rosemary essential oil. The purpose of the work is to evaluate the antimicrobial properties and analyze changes in the physical, mechanical and barrier properties of the films.

Rosemary – belongs to the Lamiaceae family. It is known for its antimicrobial and antioxidant properties, used in medicine to treat various diseases [7]. Rosemary extracts are used in the treatment of Alzheimer's disease, as well as to protect the liver [8, 9]. Analysis of rosemary essential oil using gas chromatography revealed 22 compounds, of which 1,8 – cineole (38.5%), camphor (17.1%), α -pinene (12.3%), limonene (6.23%), camphene (6.00%) and linalool (5.70%) predominate. These compounds make up 97.41% of the total oil composition [10]. Antimicrobial studies have confirmed that rosemary essential oil has antimicrobial properties against microorganisms such as *E. coli*, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens*, *Aeromonas hydrophila*, and *Salmonella choleraesuis* [11]. Several experiments involving the treatment of beef and pork with rosemary essential oil have shown that this oil can inhibit bacterial activity and increase the shelf life of meat [12–14].

The antimicrobial properties of rosemary essential oil are largely due to its active components, such as 1,8-cineole, camphor, and α -pinene. These compounds can disrupt the membranes of microbial cells by interacting with proteins, which leads to the leakage of their internal components. As a result of such changes in cells, the destruction of genetic material occurs, which ultimately causes the death of microorganisms [15–17]. The European Food Safety Authority has approved the daily intake of carnosic and carnosolic acids: 0.09 mg/kg for the elderly and 0.81 mg/kg for children. In food production, rosemary extracts can contain up to 400 mg/kg of these acids [18].

Material and methods

The objects of the study were examination of an antimicrobial additive – rosemary essential oil produced by LLC “PK ASPERA” of the Russian Federation.

The following components were used to develop antimicrobial films with different concentrations (0.5%; 1%; 3%; 5%): starch, glycerin, vinegar and an antimicrobial additive in the form of essential oil. Preparation of the mixture: Preparation of a starch-based composition with the addition of rosemary and the mixture of components was subjected to heat treatment at a temperature of 98 ± 1 °C until a homogeneous state was achieved. Besides, the resulting mass was poured into glass frames, where it hardened. Further, the films were left to completely harden for 3 days at room temperature, after which they were ready for further use. The antimicrobial activity of rosemary essential oil included in the film was assessed using the disk method in accordance with the guidelines MUK 4.2.1890–04. The study was conducted with respect to the following microorganisms: *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* and *Candida albicans*. This method allows determining the ability of essential oil to inhibit the growth and development of various pathogenic microorganisms, which is an important indicator for assessing the effectiveness of the developed material. To assess the fungal resistance of materials, the methods of GOST 9.049 (method 1) and GOST 9.048 (method 4) were selected. Method 1 checks the resistance of the material in conditions unfavorable for the development of spores, assessing the germination of fungi on the surface. Method 4 assesses how moisture and fungi affect the physical and mechanical properties of the material. The studies were conducted using the fungus *Aspergillus niger*. The samples were cleaned of external contaminants and placed in sterile Petri dishes. According to method 1, the samples were sprayed with an aqueous suspension of spores, according to method 4 – they were placed in dishes with an agar medium and also infected with a suspension. Additionally, the method for determining the vapor permeability of materials consists of measuring the amount of water vapor passing through a sample in a certain time, carried out using the PERME W3/030 device according to GOST GB1037. Furthermore, the method for determining the physical and mechanical properties on a tensile testing machine according to GOST 28840–90. Consists of preparing a material sample, testing it on a tensile testing machine, which gradually increases the load. During the test, the maximum load and the corresponding deformations of the sample are recorded. Based on these data, parameters such as temporary resistance and relative elongation are calculated, which allows determining the behavior of the material under load. Finally, Structural and morphological properties of a polymer film. Consists of studying the film surface using an electron microscope.

Results and discussion

Biodegradable starch-based films are shown in Figure 1.

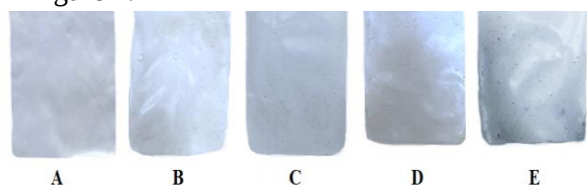


Figure 1. Appearance of experimental samples of obtained materials based on starch with rosemary essential oil. A) K; B) K + P 0.5%; C) K + P 1%; D) K + P 3%; E) K + P 5%

The materials in Figure 1 show a homogeneous structure of the films, which indicates good compatibility of the components used. With an increase in the concentration of rosemary oil, the film darkens and loses transparency, which deteriorates the appearance of the film. Antimicrobial activity was assessed by measuring the inhibition zone, which made it possible to assess the growth level of the test cultures.

Figure 2 shows the results of studies to determine the antimicrobial properties of the obtained materials in relation to *Bacillus subtilis*.

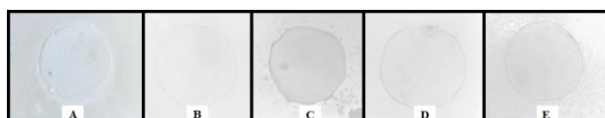


Figure 2. Results of studies to determine the antimicrobial properties of the obtained materials in relation to *Bacillus subtilis* after 2 days A) K; B) K + P 0.5%; C) K + P 1%; D) K + P 3%; E) K + P 5%

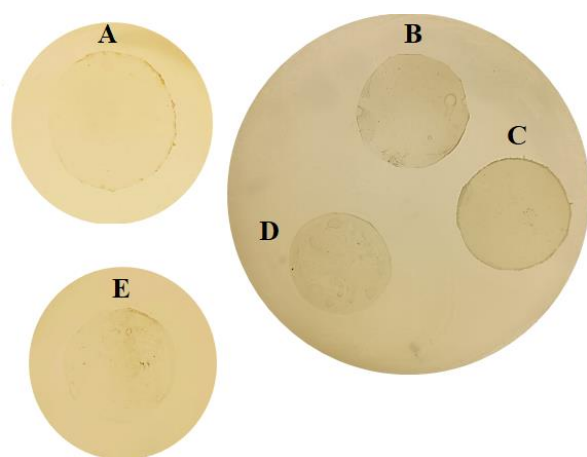


Figure 3. Results of studies to determine the antimicrobial properties of the obtained materials in relation to *Escherichia coli* after 2 days A) K; B) K + R 0.5%; C) K + R 1%; D) K + R 3%; E) K + R 5%

The results of the study showed that rosemary oil does not have antimicrobial properties against *Bacillus subtilis*. When testing this oil, no zone of inhibition was observed around the material, indicating a lack of antimicrobial activity.

The results of the study showed that rosemary oil does not have an antimicrobial effect on *Escherichia coli* (Fig. 3). During testing of the oil, no inhibition zone was observed around the material, indicating a lack of effectiveness in relation to this type of bacteria. This indicates that the components of the oil do not prevent the growth and reproduction of *Escherichia coli*.

Figure 4 shows the results of the experiment to determine the antimicrobial properties of the obtained materials in relation to *Candida albicans*.

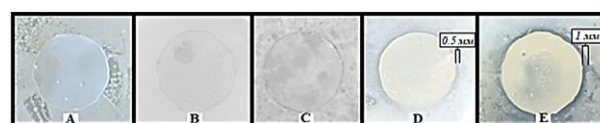


Figure 4. Results of studies to determine the antimicrobial properties of the obtained materials against *Candida albicans* after 4 days A) K; B) K + R 0.5%; C) K + R 1%; D) K + R 3%; E) K + R 5%

The highest concentration of oil demonstrates the largest inhibition zone for the tested *Candida albicans* microorganisms. At an oil concentration of 3%, the inhibition zone is 0.5 mm, and with an increase in concentration to 5%, it increases to 1 mm. These results confirm that with an increase in the concentration of antimicrobial oil, the inhibition zone around the package also increases. Thus, the use of higher concentrations of oil can improve the efficiency of protecting the surface of food products from microbial damage.

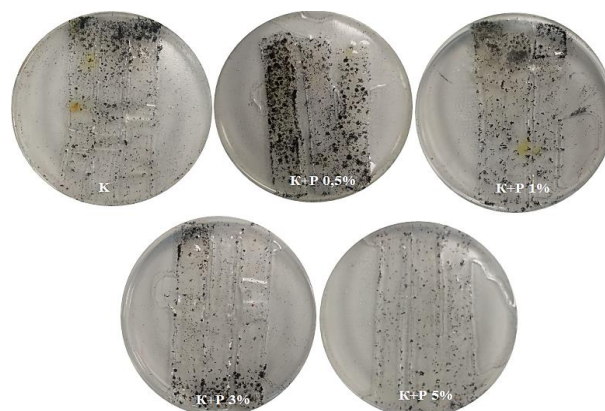


Figure 5. Fungus resistance tests of materials according to Method 1: samples obtained based on starch with different concentrations of rosemary essential oil (0.5; 1; 3; 5%)

Table 1.

Fungus resistance of materials: Results of tests according to Method 1

control sample	The development of fungi covering more than 25% of the test surface is clearly visible to the naked eye	5
starch film with the addition of rosemary essential oil 0.5%	The development of fungi covering more than 25% of the test surface is clearly visible to the naked eye	5
starch film with the addition of rosemary essential oil 1%	The development of fungi covering more than 25% of the test surface is clearly visible to the naked eye	5
starch film with the addition of rosemary essential oil 3%	The development of fungi covering more than 25% of the test surface is clearly visible to the naked eye	5
starch film with the addition of rosemary essential oil 5%	Fungal growth covering less than 25% of the test surface is clearly visible to the naked eye	4

With an increase in the oil concentration, a decrease in fungal growth on the test surface is observed. In the groups with a concentration of 0.5%, 1% and 3%, there is a clear development of fungi covering more than 25% of the surface (score 5). However, with an increase in the concentration to 5%, fungal growth decreases, since fungal damage is less than 25% of the surface (score 4). An increase in the oil concentration helps to reduce fungal growth, which indicates its antifungal properties. For effective fungal control, it is recommended to use higher concentrations of oil.

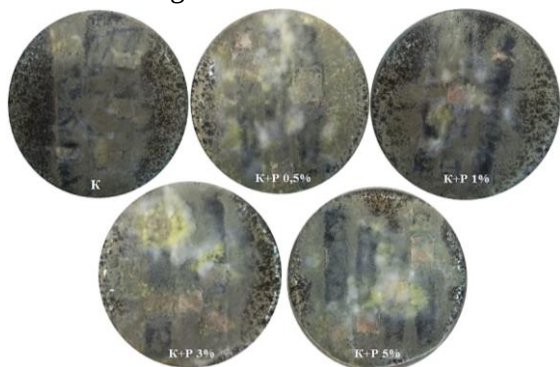


Figure 6. Fungus resistance tests of materials using method 4: samples obtained based on starch with different concentrations of rosemary essential oil (0.5; 1; 3; 5%)

The film completely dissolved due to the activity of fungal cultures, as well as due to the humidity of the nutrient medium. The study of the effect of antimicrobial additives on the physical and mechanical properties of polymeric materials is presented in Table 2

Table 2.
Data on the physical and mechanical properties of films

Composition of starch-based compositions	Breaking stress, σ_p , MPa	Relative elongation at break, ϵ_p , %
control sample	$1,63 \pm 1$	$31,70 \pm 1$
starch film with the addition of rosemary essential oil 0.5%	$1,31 \pm 1$	$31,85 \pm 1$
starch film with the addition of rosemary essential oil 1%	$0,8 \pm 1$	$37,84 \pm 1$
starch film with the addition of rosemary essential oil 3%	$0,72 \pm 2$	$53,21 \pm 1$
starch film with the addition of rosemary essential oil 5%	$0,54 \pm 1$	$56,63 \pm 1$

With an increase in the concentration of rosemary essential oil, the breaking stress undergoes a significant decrease of ~ 3 times, but the relative elongation increases ~ 2 times.

Table 3.

Comparative table of vapor permeability of materials

Composition of compositions based on PE, PP, starch and gelatin	Vapor permeability of polymeric materials 24h, g/cm^2
control sample	3293,5094
starch film with the addition of rosemary essential oil 0.5%	3241,8457
starch film with the addition of rosemary essential oil 1%	3054,9756
starch film with the addition of rosemary essential oil 3%	2775,2578
starch film with the addition of rosemary essential oil 5%	2484,7368

An increase in the concentration of rosemary essential oil leads to a decrease in the vapor permeability of the films. At a concentration of 0.5% rosemary essential oil, vapor permeability decreased by 20%, and at a concentration of 1% rosemary essential oil – by 25%, 3% – 36%, 5% – 50%. When adding essential oil, a significant decrease in vapor permeability is observed, which indicates that the essential oil performs a barrier function, reducing the possibility of water vapor passing through the film.

Conclusion

A comprehensive study was conducted to research and develop antimicrobial coatings based on starch with the addition of an antimicrobial additive of rosemary essential oil for use in food packaging. In the context of increasing requirements for the safety and quality of food products, the use of antimicrobial technologies is becoming especially relevant, which determines the importance of this work. As a result of the studies, it was found that rosemary oil has fungistatic activity. The film demonstrated effectiveness against *Candida albicans*. However, despite the manifestation of antimicrobial activity against *Candida albicans*, effectiveness against other studied microorganisms, such as *Bacillus subtilis* and *Escherichia coli*, was not detected. The obtained data on the physical and mechanical properties of the films showed that with an increase in the concentration of essential oil, a decrease in the strength of the film is observed, but at the same time, its elasticity improves. It is also worth noting that the addition of rosemary oil leads to a decrease in the vapor permeability of the film, which has a positive effect on its ability to protect the contents from moisture and external factors. Analysis of existing studies confirmed the relevance of using rosemary essential oil as a natural antimicrobial component.

References

- 1 Quintavall S., Vicini L. Antimicrobial food packaging in meat industry. *Meat Science*. 2002. vol. 62. no. 3. pp. 373–380. doi: 10.1016/S0309-1740(02)00121-3
- 2 Tveritnikova I.S. et al. Research of multilayer polymer films modified with an antimicrobial component intended for packaging dairy products. 2020. no. 12. (in Russian)
- 3 Shmakova N.S. The Effect of Ultrasound on the Production of Polyethylene Films with Antimicrobial Properties: Dissertation... Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2020. 23 p. (in Russian)
- 4 Alhajar A. et al. Development of an active starch-based packaging material using clove oil extract as an antimicrobial additive. *Storage and Processing of Agricultural Products*. 2023. no. 4. pp. 16–31. doi: 10.36107/spfp.2023.4.474
- 5 Mohsenabadi N. et al. Physical and antimicrobial properties of starch-carboxymethylcellulose film containing rosemary essential oils encapsulated in chitosan nanogel. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. vol. 112. pp. 148–155. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.01.034
- 6 Borisova A.V., Shabanova P.V. Development of Active Biodegradable Packaging Films with Essential Oils. *Materials of the Baltic Sea Forum Conference*, Kaliningrad, September 26 – October 1, 2022. UDC 665.52/545. (in Russian)
- 7 Nieto G., Ros G., Castillo J. Antioxidant and antimicrobial properties of rosemary (*Rosmarinus officinalis*, L.): A review. *Medicines*. 2018. vol. 5. no. 3. p. 98. doi: 10.3390/medicines5030098
- 8 Habtemariam S. The therapeutic potential of rosemary (*Rosmarinus officinalis*) diterpenes for Alzheimer's disease. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2016. p. 2680409. doi: 10.1155/2016/2680409
- 9 Kayashima T., Matsubara K. Antiangiogenic effect of carnosic acid and carnosol, neuroprotective compounds in rosemary leaves. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 2012. vol. 76. pp. 115–119. doi: 10.1271/bbb.110584
- 10 Elyemmi M. et al. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil of wild and cultivated *Rosmarinus officinalis* from two Moroccan localities. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. vol. 23. no. 3. pp. 214–222. doi: 10.12911/22998993/146145
- 11 Angane M. et al. Essential oils and their major components: An updated review on antimicrobial activities, mechanism of action and their potential application in the food industry. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 3. p. 464. doi: 10.3390/foods11030464
- 12 Efenberger-Szmechtyk M., Nowak A., Czyzowska A. Plant extracts rich in polyphenols: Antibacterial agents and natural preservatives for meat and meat products. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2021. vol. 61. no. 1. pp. 149–178. doi: 10.1080/10408398.2020.1722060
- 13 Woo S.H. et al. Inhibitory effect of natural extract mixtures on microbial growth and lipid oxidation of sausages during storage. *Journal of Animal Science and Technology*. 2023. vol. 65. no. 1. p. 225. doi: 10.5187/jast.2022.e92
- 14 Saraiva C. et al. Antimicrobial activity of *Myrtus communis* L. and *Rosmarinus officinalis* L. essential oils against *Listeria monocytogenes* in cheese. *Foods*. 2021. vol. 10. no. 5. p. 1106. doi: 10.3390/foods10051106
- 15 Fung D.Y.C., Taylor S., Kahan J. Effect of butylated hydroxyanisole (BHA) and butylated hydroxytoluene (BHT) on growth and aflatoxin production of *Aspergillus flavus*. *Journal of Food Safety*. 1977. vol. 1. pp. 39–51. doi: 10.1111/j.1745-4565.1977.tb00258.x
- 16 Fareed N., Nisa S., Bibi Y. et al. Green synthesized silver nanoparticles using carrot extract exhibited strong antibacterial activity against multidrug resistant bacteria. *Journal of King Saud University-Science*. 2023. vol. 35. no. 2. p. 102477. doi: 10.1016/j.jksus.2022.102477
- 17 Kaur R. et al. The potential of rosemary as a functional ingredient for meat products—a review. *Food Reviews International*. 2023. vol. 39. no. 4. pp. 2212–2232. doi: 10.1080/87559129.2021.1950173
- 18 Aguilar F. et al. Use of rosemary extracts as a food additive – scientific opinion of the panel on food additives, flavorings, processing aids and materials in contact with food. *EFSA Journal*. 2008. vol. 721. pp. 1–29. doi: 10.2903/j.efsa.2008.721
- 19 El Boukhari R., Fatimi A. Extract of rosemary as food additive: the landmark patents. *Biology and Life Sciences Forum. MDPI*. 2023. vol. 26. no. 1. p. 37. doi: 10.3390/Foods2023-15062
- 20 Qiu K., Wang S., Duan F. et al. Rosemary: Unrevealing an old aromatic crop as a new source of promising functional food additive—A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024. vol. 23. no. 1. p. e13273. doi: 10.1111/1541-4337.13273

Information about authors

Contribution

- | | |
|--|--|
| <p>Emiru Y. Melesse graduate student, industrial design packaging technologies and expertise department, Federal State Budgetary Educational Federal State Budgetary Educational, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, emydms12@gmail.com
  https://orcid.org/0000-0002-0871-787X</p> <p>Ali Y. Alkhair senior lecturer, industrial design packaging technologies and expertise department, Federal State Budgetary Educational Federal State Budgetary Educational, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, alkhairali@gmail.com
  https://orcid.org/0000-0002-9518-7781</p> <p>Ekaterina A. Shchukina student, industrial design packaging technologies and expertise department, Federal State Budgetary Educational Federal State Budgetary Educational, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, katya_shchukina2003@mail.ru
  https://orcid.org/0009-0008-3834-0904</p> <p>Irina A. Kirsh Dr. Sci. (Chem.), professor, industrial design packaging technologies and expertise department, Federal State Budgetary Educational Federal State Budgetary Educational, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, irina-kirsh@ya.ru
  https://orcid.org/0000-0003-3370-4226</p> <p>Anna V. Zaitseva student, industrial design packaging technologies and expertise department, Federal State Budgetary Educational Federal State Budgetary Educational, Volokolamskoye Shosse, 11, Moscow, 125080, Russia, fairy.tail.1872@mail.ru
  https://orcid.org/0009-0001-7822-7577</p> | <p>proposed a scheme of the experiment and organized production trials</p> <p>wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism</p> <p>review of the literature on an investigated problem</p> <p>consultation during the study</p> <p>conducted an experiment, performed computations</p> |
|--|--|

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Разработка антимикробных упаковочных материалов с использованием эфирного масла розмарина

Аннотация. В условиях растущих требований к безопасности и качеству пищевых продуктов особую актуальность приобретает разработка эффективных методов защиты от микробного загрязнения. Одним из инновационных решений является активная упаковка с натуральными антимикробными добавками, препятствующими размножению микроорганизмов на поверхности продуктов. Такие добавки должны сохранять свои свойства как в процессе производства, так и при последующем использовании. Основная цель данного исследования заключалась в разработке активной упаковочной плёнки на основе биополимера с внедрением эфирного масла розмарина в различных концентрациях, а также в определении антимикробных, физико-механических и барьерных свойств полученного полимерного материала. Плёнку на основе крахмала получали методом механического перемешивания исходных реагентов с введением эфирного масла розмарина в концентрациях 0,5 %; 1 %; 3 %; 5 %. Антимикробные свойства полимерного упаковочного материала определяли методом диско-диффузии в соответствии с МУК 4.2.1890–04 в отношении *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Candida albicans*. Для оценки устойчивости материалов к воздействию грибов были выбраны методы ГОСТ 9.049 (метод 1) и ГОСТ 9.048 (метод 4). Определение паропроницаемости проводили на приборе «PERME W3/030» согласно ГОСТ GB1037. Определение физико-механических свойств осуществляли на разрывной машине по ГОСТ 28840–90. **Результаты исследования** показали, что образцы упаковочной плёнки на основе крахмала с эфирным маслом розмарина обладают антимикробной активностью в отношении *Candida albicans* при концентрациях 3 % и 5 %, что выражается в снижении количества микроорганизмов на поверхности плёнки. Кроме того, улучшаются её физико-механические и барьерные свойства. Анализ существующих исследований показал, что эфирное масло розмарина является эффективным природным антимикробным компонентом. Его применение в активной упаковке на основе крахмала не только препятствует росту таких микроорганизмов, как *Candida albicans*, но и способствует улучшению физико-механических и барьерных свойств упаковочной плёнки. Это делает его перспективным решением для обеспечения безопасности и качества пищевых продуктов.

Ключевые слова: эфирное масло розмарина, антимикробные свойства, активная упаковка, плёнка на основе крахмала, физико-механические свойства, барьерные свойства.

Имру Й. Мелесе аспирант, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, emydms12@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-0871-787X>

Екатерина А. Щукина студент, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, katya_shchukina2003@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-3834-0904>

Анна В. Зайцева студент, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, fairy.tail.1872@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0001-7822-7577>

Али Я. Альханр старший преподаватель, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, alkheerali@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9518-7781>

Ирина А. Кириш д.х.н., профессор, кафедра промышленного дизайна, технологии упаковки и экспертизы, Российский биотехнологический университет, Волоколамское шоссе, 11, Москва, 125080, Россия, irina-kirsh@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3370-4226>

Физико-химические особенности очистки природного и техногенного рассола в производстве кальцинированной соды

Ксения Р. Дубровина	¹	kseniadubrovina98@gmail.com	
Тимур Р. Шакиров	¹	timur.shakirov1993@mail.ru	 0000-0002-1292-3545
Алексей И. Хацринов	¹	khatsrin@mail.ru	 0000-0002-0623-1411
Алсу З. Сулейманова	²	alsu-sulejmanova@ya.ru	
Светлана В. Водопьянова	³	vod-sveta@ya.ru	 0000-0001-5594-2626

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, 68, Казань, Российская Федерация, 420015

Аннотация. Промышленное производство соды в России реализовано аммиачным способом по методу Сольве. Ежегодный выпуск товарного бикорбоната натрия достигает 2 млн т. Основной ключевой стадией производства соды является очистка рассола. Рассмотрены проблемы использования основного сырья в производстве соды. Приведены методики экспериментов. Цель работы заключалась в рассмотрении физико-химических особенностей и процессов очистки хлоридных рассолов техногенного и природного происхождения. При решении поставленных задач использовались следующие методы: химический состав исходных проб и растворов (рассолов) анализировался системой капиллярного электрофореза «Капель-205»; минеральный состав нерастворимого в воде остатка изучался с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Clever C-31 и рентгенографическим количественным фазовым анализом на дифрактометре PowDiX 600 Adwin. По результатам экспериментов получены следующие данные, характеризующие физико-химическое влияние CaSO_4 на очистку техногенного и природного хлоридных рассолов. Содово-каустический метод очистки сырого рассола эффективнее всего проводить при температуре менее 12°C , так как при этой температуре остаточное содержание ионов кальция и магния в рассоле наименьшее. Техногенные рассолы (пластовые воды), содержащие большое количество хлорида натрия, могут служить ценным сырьем для производства кальцинированной соды. Механизм образования твердой фазы представлен образованием и ростом аморфных зародышей вследствие роста по граням кристаллизации. Второй фазой является коагуляция частиц с образованием крупных рыхлых агрегатов. Дальнейшие исследования будут продолжены по исследованию взаимной растворимости системы $\text{CaCO}_3\text{-Mg(OH)}_2\text{-NaCl}$.

Ключевые слова: рассол, пластовая вода, хлорид натрия, каменная соль, соли кальция, соли магния, очистка, кальцинированная сода.

Physico-chemical features of purification of natural and technogenic brine in the production of soda ash

Ksenia R. Dubrovina	¹	kseniadubrovina98@gmail.com	
Timur R. Shakirov	¹	timur.shakirov1993@mail.ru	 0000-0002-1292-3545
Aleksey I. Khatsrinov	¹	khatsrin@mail.ru	 0000-0002-0623-1411
Alsu Z. Suleimanova	²	alsu-sulejmanova@ya.ru	
Svetlana V. Vodopyanova	³	vod-sveta@ya.ru	 0000-0001-5594-2626

¹ Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015

Abstract. Industrial production of soda in Russia is implemented by the ammonia method according to the Solvay method. The annual output of commercial sodium bicarbonate reaches 2 million tons. The main key stage of soda production is brine purification. The article considers the problems and highlights the areas of research. Experimental techniques are presented. The aim of the work was to consider the physicochemical characteristics and processes of purification of chloride brines of technogenic and natural origin. The following methods were used to solve the set problems: the chemical composition of the initial samples and solutions (brines) was analyzed by the Kapel-205 capillary electrophoresis system; the mineral composition of the water-insoluble residue was studied using a Clever C-31 X-ray fluorescence spectrometer and X-ray quantitative phase analysis on a PowDiX 600 Adwin diffractometer. Based on the results of the experiments, the following data were obtained characterizing the physicochemical effect of CaSO_4 on the purification of technogenic and natural chloride brines. The soda-caustic method of purifying raw brine is most effectively carried out at a temperature below 12°C , since at this temperature the residual content of calcium and magnesium ions in the brine is the lowest. Technogenic brines (formation waters) containing a large amount of sodium chloride can serve as a valuable raw material for the production of soda ash. The mechanism of solid phase formation is represented by the formation and growth of amorphous nuclei due to growth along crystallization faces. The second phase is particle coagulation with the formation of large loose aggregates. Further studies will be continued on the study of the mutual solubility of the $\text{CaCO}_3\text{-Mg(OH)}_2\text{-NaCl}$ system.

Keywords: brine, formation water, sodium chloride, rock salt, calcium salts, magnesium salts, purification, soda ash.

Для цитирования

Дубровина К.Р., Шакиров Т.Р., Хацринов А.И., Сулейманова А.З., Водопьянова С.В. Физико-химические особенности очистки природного и техногенного рассола в производстве кальцинированной соды // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 204–211. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-204-211

For citation

Dubrovina K.R., Shakirov T.R., Khatsrinov A.I., Suleymanova A.Z., Vodopyanova S.V. Physico-chemical features of purification of natural and technogenic brine in the production of soda ash. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 204–211. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-204-211

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

Введение

Кальцинированная сода является многотоннажным продуктом химической промышленности и служит незаменимым сырьем для стекольной, мыловаренной, металлургической и военной промышленности. Кальцинированную соду в основном получают аммиачным способом по методу Сольве.

Однако аммиачный способ производства фактически достиг предела своего технологического совершенствования и, несмотря на ряд достоинств (легкость добычи и дешевизна исходного сырья, непрерывность производственного процесса, высокое качество конечного продукта) характеризуется крупными недостатками: низкое использование исходного сырья (натрия до 70%), большое количество отходов (8–12 м³ жидких и 250 кг твердых отходов на 1 т продукции). Все это усугубляется тем, что аммиачно-содовые заводы относятся к категории экологически вредных предприятий, из-за значительного количества хлор-кальциевых стоков, образующих так называемые «белые моря» и наносящие вред окружающей среде [1–5].

Одним из сырьевых источников получения кальцинированной соды является хлоридный рассол, получаемый скважинным растворением каменной соли. Для содовой промышленности данный способ добычи является экономически более выгодным по сравнению с традиционным получением концентрированных рассолов из твердой каменной соли.

Следует отметить, что запасы «богатой» природной каменной соли истощаются и существует необходимость в поиске альтернативных источников рассолов хлорида натрия.

Крупными сырьевыми источниками техногенных рассолов, содержащих хлорид натрия, являются предприятия нефтехимической отрасли. В процессе добычи нефти попутно извлекаются пластовые воды. Пластовые воды по вещественному составу представлены преимущественно хлоридом натрия с минерализацией от 80 до 300 г/л. Также в её составе могут присутствовать H₂S, Fe₂O₃ и легкие углеводороды. В процессе нефтехимической переработки нефти образуется абгазный HCl. Улавливание и нейтрализацию проводят в щелочном скруббере, при этом образуются стоки хлорида натрия с минерализацией около 280–310 г/л. Валовый ежегодный объем получаемых техногенных рассолов более 3 млн т при добыче и более [6–11].

Таким образом, проблема утилизации многотоннажных техногенных рассолов создает значительную угрозу для окружающей среды ввиду образования стоков и фильтратов,

содержащих хлорид натрия. Таким образом в работе, авторами рассмотрены физико-химические исследования содово-каустического способа очистки природных и техногенных рассолов с целью дальнейшего использования их в производстве кальцинированной соды.

Материалы и методы

Технологические испытания и аналитические исследования проводились на кафедре «Технологии неорганических веществ и материалов» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

В исходных образцах и промежуточных продуктах, рассолах определялось содержание следующих компонентов: нерастворимый остаток, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻. Данные химического состава были рассчитаны на солевой состав согласно методике [4]. Аналитические исследования проводились системой капиллярного электрофореза «Капель-205» и титрованием. Плотность рассолов определяли на плотномере Anton Paar DMA 4501. Твердые водонерастворимые соединения изучались с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Clever C-31 и рентгенографическим количественным фазовым анализом на дифрактометре PowDiX 600 Adwin.

Методика очистки. Рассол очищается от ионов кальция и магния, переводя их в нерастворимые соединения (CaCO₃ и Mg(OH)₂) с добавлением растворов соды и щелочи [8, 13].

В работе проведены исследования по влиянию условий растворения на степень перехода в раствор SO₄²⁻, Ca²⁺. По расчетному количеству для получения сырого рассола, внесли каменную соль и воду. Растворение проводили при 25 °С, продолжительность перемешивания составляла 60 минут. При данных условиях получен сырой рассол плотностью 1,193 г/см³ и общим содержанием NaCl 306 г/л. Рассол анализировался на содержание сульфатов и ионов кальция титриметрическим методом. Количество Ca²⁺ = 0,24%, SO₄²⁻ = 0,81%. Переход CaSO₄ из твердой каменной соли в рассол составил 12,93%.

Коэффициентом перехода можно считать 1,29.

Результаты

В работе изучены следующие объекты исследования: пластовая вода и каменная соль Яр-Бишкадакского месторождения.

По химическому составу исследуемые объекты в качестве основного компонента содержали в своем составе хлорид натрия. Пластовая вода содержит NaCl – 243,54 г/л, CaSO₄ – 17,06 г/л, MgCO₃ – 3,63 г/л, содержание K⁺, Br⁻, Sr²⁺ составляет менее 0,5 г/л. Каменная соль Яр-Бишкадакского месторождения содержала NaCl – 91,15%, CaSO₄ – 8,12%, SiO₂ – 0,73%.

Сырой рассол, полученный скважинным растворением или после нефтедобычи (нефтепереработки), содержит вредные примеси солей кальция и магния. Данные соединения приводят к загрязнению целевого продукта и уменьшению степени конверсии гидрокарбоната натрия. Вследствие жестких требований по составу уделено особое внимание к чистоте рассола,

регламентирующего содержание ионов по ТУ 2152–008–00204872–2012 (таблица 1).

Очистка рассола хлорида натрия от примесей описывается системой $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ в зависимости от температуры [4, 8]. Фазовая диаграмма системы построена в диапазоне температур $-30 \div 100^\circ\text{C}$ (рисунок 1).

Таблица 1.

Физико-химические показатели рассолов каменной соли

Table 1.

Physicochemical parameters of rock salt brines

Рассол Brine	Рассол сырой Raw brine	Рассол очищенный Purified brine
Массовая концентрация Mass concentration		
Хлоридов в пересчете на NaCl , г/дм ³ , не менее Chlorides in terms of NaCl , g/dm ³ , not less than	306,00	302,00
Суммы кальция и магния в пересчете на Ca^{2+} , г/дм ³ , не более Calcium and magnesium amounts in terms of Ca^{2+} , g/dm ³ , not more than	–	0,07
Кальция в пересчете на Ca^{2+} , г/дм ³ , не более Calcium in terms of Ca^{2+} , g/dm ³ , not more than	1,50	–
Магния в пересчете на Mg^{2+} , г/дм ³ , не более Magnesium in terms of Mg^{2+} , g/dm ³ , not more than	0,30	–
Углекислого натрия, г/дм ³ , не более Sodium carbonate, g/dm ³ , not more than	–	0,80
Сульфатов в пересчете на SO_4^{2-} , г/дм ³ , не более Sulfates in terms of SO_4^{2-} , g/dm ³ , not more than	4,00	4,00
Аммиака в пересчете на NH_4^+ , г/дм ³ , не более Ammonia in terms of NH_4^+ , g/dm ³ , not more than	5,00	5,00

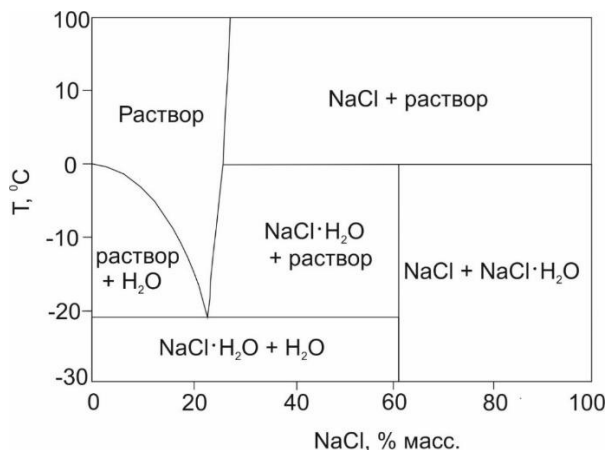


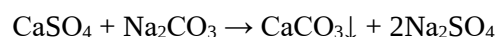
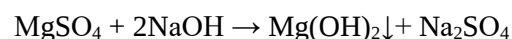
Рисунок 1. Диаграмма растворимости NaCl в зависимости от температуры и его массового содержания в рассоле

Figure 1. Diagram of NaCl solubility depending on temperature and its mass content in brine

Свойства хлорида натрия зависят от температуры, имеющее значение при технологических расчетах. Особый интерес представляют термическое расширение и изотермическое сжатие NaCl . При нагревании из-за ангармоничности тепловых колебаний ионов Na^+ и Cl^-

в кристаллической решетке хлорида натрия происходит увеличение среднего равновесного расстояния между частицами, что приводит к заметному возрастанию линейных размеров и общего объема кристалла.

Очистку сырого рассола от ионов кальция и магния проводили содово-каустическим «мокрым» методом.



Осадки карбоната кальция и гидроксида магния отделяются от рассола с помощью осаждения и фильтрации, а также удаляются другие механические примеси.

На стадии рассолоочистки температуру рассола поддерживают не выше 22°C .

Результаты влияния температуры на остаточное содержание ионов кальция и магния в рассоле, полученном из пластовых вод нефтяных месторождений, во время процесса очистки, представлены в таблице 2 и показывают следующее: присутствует незначительное содержание ионов кальция и магния, а также сульфат ионов.

Таблица 2.

Влияние температуры на процесс получения очищенного рассола

Table 2.

The influence of temperature on the process of obtaining purified brine

Температура, °C Temperature, °C	Рассол техногенный Technogenic brine				Рассол природный Natural brine			
	Ca ²⁺ , %		Mg ²⁺ , %		Ca ²⁺ , %		Mg ²⁺ , %	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
12	2,81	0,020	0,65	*	0,79	*	0,17	*
20		0,021		0,011		0,007		*
45		0,043		0,014		0,009		0,001
75		0,064		0,026		0,019		0,001

Примечание: * – ион не обнаружен, значение ниже порога обнаружения

Note: * – ion not detected, value below detection threshold

Сопоставление остаточного содержания ионов кальция и магния в рассоле при различных температурах показывает, что температура ниже 20 °C значительно влияет на процесс очистки. При температуре 12 °C содержание ионов кальция уменьшается с 2,81 до 0,02%, а ионов магния – с 0,65 до 0% (таблица 2).

Эффективность очистки указывает на то, что более низкие температуры могут способствовать более эффективному удалению ионов кальция и магния из рассола.

Для получения сырого рассола из каменной соли использовались различные соотношения Т:Ж. Растворение пробы в дистиллированной воде проводили в течении одного часа при постоянном перемешивании при комнатной температуре. Затем полученную суспензию отфильтровали от нерастворимого остатка.

Как видно из таблицы 3, чтобы максимально извлечь в раствор хлорид натрия, необходимо поддерживать соотношение Т:Ж = 1:2,5. При данном соотношении в рассоле

Таблица 3.

Влияние Т:Ж на химический состав полученного рассола

Table 3.

The effect of T:F on the chemical composition of the resulting brine

Т:Ж	Плотность, г/см ³ Density	Состав жидкой фазы, г/л Состав жидкой фазы, г/л				
		Na ⁺	Cl ⁻	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻
1:2,0	1,19458	89,5	144,0	2,3	0,2	2,3
1:2,5	1,19678	96,6	152,9	2,4	0,2	2,2
1:2,8	1,18187	89,6	144,0	2,0	0,2	2,7

Очистку рассола, полученного из каменной соли, проводили различными методами. Результаты очистки рассола представлены в таблице 4, которые позволяют оценить эффективность методов очистки.

Очистка рассола может проводиться с использованием различных методов, включая содово-каустический и содово-известковый.

Таблица 4.

Очистка рассола от солей кальция и магния

Table 4.

Purification of brine from calcium and magnesium salts

Метод очистки Purify method	Плотность рассола, г/см ³ Brine density	Ca ²⁺ , %	Mg ²⁺ , %	SO ₄ ²⁻ , %
Содово-каустический Soda-caustic	1,1912	0,016	0	0,21
Содово-известковый Soda-lime	1,1960	0,018	0	0,22

Каменная соль на большинстве месторождений содержит примеси ангидрита в виде сульфата кальция. Во время добычи каменной соли в рассол хлорида натрия переходит сульфат кальция.

Переход сульфата кальция из твердой каменной соли в рассол имеет прямую зависимость от плотности рассола. На рисунке 2 представлена растворимость сульфата кальция в растворах хлорида натрия при 25 °C.

Наименьшее содержание CaSO₄ отмечено в производном рассоле с концентрацией более 280 г/л.

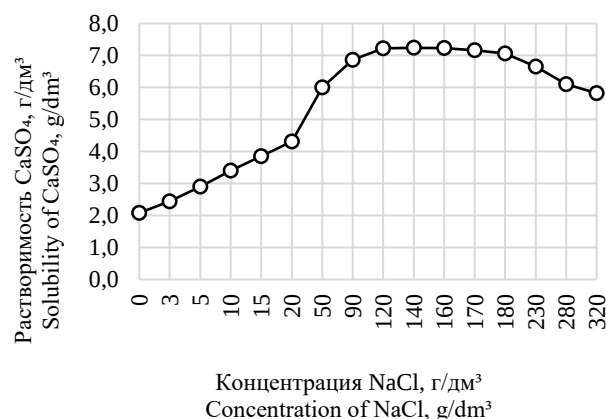


Рисунок 2. Растворимость сульфата кальция в растворах хлорида натрия при 25 °C

Figure 2. Solubility of calcium sulfate in sodium chloride solutions at 25 °C

Переход сульфата кальция можно предотвратить на стадии добычи рассола, путем добавления в раствор выщелачивания – соды. Ввод соды в раствор выщелачивания составил 0,4%. При данной концентрации переход иона кальция в раствор практически не происходит, содержание менее 0,01%.

Обсуждение

Проводится детальный анализ полученных данных в сопоставлении с данными литературы, что служит обоснованием выводов и заключений авторов.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных экспериментов получены данные, характеризующие физико-химическое влияние на очистку техногенного и природного рассола.

Содово-каустический метод очистки наиболее эффективен при температуре 12°C, что приводит к минимальному остаточному содержанию ионов кальция и магния в рассоле.

Техногенные рассолы с высоким содержанием хлорида натрия могут быть использованы как

сырье для производства кальцинированной соды, что подчеркивает их экономическую ценность.

Перемешивание рассола способствует интенсификации процесса кристаллизации и повышению эффективности очистки, создавая турбулентную диффузию и уменьшая расклинивающее давление.

Образование и рост аморфных зародышей, а также коагуляция частиц приводят к образованию крупных рыхлых агрегатов, что важно для понимания процесса очистки.

Намечены дальнейшие исследования по взаимной растворимости системы $\text{CaCO}_3\text{-Mg(OH)}_2\text{-NaCl}$, что может привести к более глубокому пониманию процессов, происходящих в системе.

Благодарности

Авторы выражают благодарность всему коллективу кафедры Технологии неорганических веществ и материалов ФГБОУ ВО «КНИТУ» за выполненные аналитические исследования по работе.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института нефти, химии и нанотехнологии ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Литература

- 1 Мартынов М.М. Метод определения химического состава // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2023. Т. 66. Вып. 5. С. 123–125. doi: 10.6060/2012.01.01
- 2 Загидуллин Р.Н., Сабитов К.Б., Мухаметов А.А. Перспективы развития производства кальцинированной соды по малоотходной технологии // Химическая промышленность. 2013. № 5. С. 7–12.
- 3 Молчанов В.И., Панасенко В.А., Марков Н.В. и др. Термодинамика процесса карбонизации в содовом производстве // Труды НИОХИМ. Харьков, 2001. Т. 72. С. 10–21.
- 4 Фурман А.А., Шрайбман С.С. Приготовление и очистка рассола. М.: Химия, 1966. 232 с.
- 5 Сироткин О.С., Сироткин Р.О. Химия. Учебник. М.: КНОРУС, 2023. 364 с.
- 6 Куленцан А.Л., Марчук Н.А. Анализ основных видов продукции химического производства // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2019. Т. 62. Вып. 11. С. 156–160. doi: 10.6060/ivkkt.20196211.6106
- 7 Колпакова Н.С. Оценка деятельности химических корпораций на рынке кальцинированной соды России // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2021. Т. 10. № 4. С. 48–52.
- 8 Ахметов Т.Г., Ахметова Р.Т., Гайсин Л.Г. Химическая технология неорганических веществ. Кн. 1. СПб.: Лань, 2021. 688 с.
- 9 Шатов А.А. Производство кальцинированной соды – от прошлых к новым технологиям // Научное обозрение. Фундаментальные и прикладные исследования. 2017. № 1. С. 3–43.
- 10 Лановецкий С.В., Нисина О.Е., Косвинцев О.К. Разработка технологии получения рассолов хлорида натрия из галитовых отходов // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. Вып. 1. С. 74–82. doi: 10.6060/ivkkt.20246701.6909
- 11 Шугаев И.Р., Кудашева И.А. Оптимизация технологии получения хлористого натрия из отхода производства кальцинированной соды // Современные технологии в образовании и промышленности: от теории к практике: сб. материалов II внутривуз. науч.-практ. конф. (Стерлитамак, 25 апреля 2018 г.). Уфа: Полиграфия, 2018. С. 42–44.
- 12 Касьянов В.К., Аверина Ю.М., Меньшиков В.В. и др. Методы переработки дистиллерной жидкости как отхода производства кальцинированной соды аммиачным способом // Sciences of Europe. 2018. № 8-1(28). С. 12–15.
- 13 Ахметов Т.Г., Ахметова Р.Т., Гайсин Л.Г. Химическая технология неорганических веществ. Кн. 2. СПб.: Лань, 2021. 536 с.
- 14 Chu F., Jon Ch., Yang L., Du X. CO2 absorption characteristics in ammonia solution inside the structured packed column // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. Vol. 55. № 12. P. 3696–3709. doi: 10.1021/acs.iecr.5b03614
- 15 Старкова А.В., Махоткин А.Ф. Гетерогенные процессы хемосорбции аммиака и диоксида углерода водными растворами аммиака // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25. № 6. С. 38–43. doi: 10.55421/1998-7072_2022_25_6_38

- 16 Нисина О.Е., Лановецкий С.В., Косвинцев О.К. и др. Исследование процесса извлечения примеси сульфата кальция из галитовых отходов различного происхождения // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. Вып. 4. С. 101–107. doi: 10.6060/ivkkt.20226504.6483
- 17 Поварова Л.В. Анализ методов очистки нефтесодержащих сточных вод // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2018. № 1. С. 189–205.
- 18 Кольцов В.Б., Кондратьева О.В. Очистные сооружения. В 2 ч. Ч. 2: учебник и практикум. М.: Юрайт, 2016. 314 с.
- 19 Жусупова Л.А., Тимурлан А. Методы очистки сточных вод от нефтепродуктов // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 5-9(25). С. 123–129.
- 20 Навесов Ш., Еримбетова А., Изтлеуов Г. и др. Исследование процесса фильтрования сточных вод машиностроительного производства // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 1-3(21). С. 138–142.
- 21 Usmani M.A., Khan I., Bhat A.H. et al. Current trend in the application of nanoparticles for waste water treatment and purification: a review // Current Organic Synthesis. 2017. Vol. 14. № 2. P. 206–226.
- 22 Sannino D., Vaiano V., Rizzo L. Progress in nanomaterials applications for water purifications // Nanotechnologies for Environmental Remediation: Applications and Implications. 2017. P. 1–24.
- 23 Banerjee S., Gautam R.K., Gautam P.K. et al. Recent trends and wastewater treatment: nanotechnological approach for water purification // Materials Science and Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. 2017. P. 1745–1779.
- 24 Тюрина Е.В. Технология очистки сточных вод на нефтяных промыслах // Наследие И.М. Губкина: интеграция образования, науки и практики в нефтегазовой сфере: мат. междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. С.Г. Горшенина. Саратов: Амирит, 2018. С. 231–235.
- 25 Реховская Е.О., Нагибина И.Ю., Студенкова А.К. и др. Совершенствование технологической схемы очистки сточной воды от нефтепродуктов на предприятии теплоэнергетики // Актуальные вопросы энергетики. 2021. Т. 3. № 1. С. 135–140.
- 26 Дубровина К.Р., Шакиров Т.Р., Сулейманова А.З. и др. Возможность возвращения в цикл улавливания хлороводорода каустической содой концентрированием его и полного выделения товарного хлорида натрия // Вестник технологического университета. 2024. Т. 27. Вып. 8. С. 82–86. doi: 10.55421/1998-7072_2024_27_8_82
- 27 Нажарова Л.Н., Шакиров Т.Р. Особенности растворения каменной соли месторождений Российской Федерации // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. Вып. 9. С. 51–55.
- 28 Хацринов А.И., Дубровина К.Р., Хакимова З.М. и др. Технология очистки пластовой воды в лабораторных условиях для производства соды // Вестник технологического университета. 2023. Т. 26. Вып. 12. С. 103–106. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_12_103
- 29 Полосеева О.А. Физико-химические методы исследования и техника лабораторных работ. СПб.: Лань, 2023. 108 с.
- 30 Стоянова А.Д., Конькова Т.В. Физико-химические основы технологии обезвреживания жидких техногенных отходов: учеб. пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 228 с.
- 31 Нисина О.Е., Лановецкий С.В., Косвинцев О.К. и др. Исследование процесса извлечения примеси сульфата кальция из галитовых отходов различного происхождения // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. № 4. С. 101–107.
- 32 Bilginer A., Canbek O., Turhan Erdoğan S. Activation of blast furnace slag with soda production waste // Journal of Materials in Civil Engineering. 2020. Vol. 32. № 1. 04019316. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002987
- 33 Khajuria A., Atienza V.A., Chavanich S. et al. Accelerating circular economy solutions to achieve the 2030 agenda for sustainable development goals // Circular Economy. 2022. Vol. 1. № 1. 100001. doi: 10.1016/j.cec.2022.100001

References

- 1 Martynov M.M. Method for Determining Chemical Composition. Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical Technology. 2023. vol. 66. no. 5. pp. 123–125. doi:10.6060/2012.01.01
- 2 Zagidullin R.N., Sabitov K.B., Mukhametov A.A. Prospects for the Development of Soda Ash Production Using Low-Waste Technology. Chemical Industry. 2013. no. 5. pp. 7–12. (in Russian)
- 3 Molchanov V.I., Panasenkov V.A., Markov N.V. et al. Thermodynamics of the Carbonation Process in Soda Production. Kharkov: NIOKHIM, 2001. vol. 72. pp. 10–21. (in Russian)
- 4 Furman A.A., Shraibman S.S. Preparation and purification of brine. Moscow: Chemistry, 1966. 232 p. (in Russian)
- 5 Sirotkin O.S., Sirotkin R.O. Chemistry. Textbook. Moscow: KNORUS, 2023. 364 p. (in Russian)
- 6 Kulenzan A.L., Marchuk N.A. Analysis of the main types of chemical production products. News of Universities. Chemistry and Chemical Technology. 2019. vol. 62. no. 11. pp. 156–160. doi:10.6060/ivkkt.20196211.6106 (in Russian)
- 7 Kolpakova N.S. Assessment of the activities of chemical corporations in the soda ash market of Russia. Bulletin of the Siberian Institute of Business and Information Technology. 2021. vol. 10. no. 4. pp. 48–52. (in Russian)
- 8 Akhmetov T.G., Akhmetova R.T., Gaisin L.G. Chemical technology of inorganic substances. Book 1. St. Petersburg: Lan, 2021. 688 p. (in Russian)
- 9 Shatov A.A. Production of soda ash: from past to new technologies Scientific review. Fundamental and applied research. 2017. no. 1. pp. 3–43. (in Russian)

- 10 Lanovetsky S.V., Nishina O.E., Kosvintsev O.K. Development of technology for producing sodium chloride brines from halite waste. *News of universities. Chemistry and chemical technology*. 2024. vol. 67. no. 1. pp. 74–82. doi:10.6060/ivkkt.20246701.6909 (in Russian)
- 11 Shugaepov I.R., Kudasheva I.A. Optimization of the technology for obtaining sodium chloride from soda ash production waste. *Modern technologies in education and industry: from theory to practice: collection of materials of the II intra-university scientific and practical conference (Sterlitamak, April 25, 2018)*. Ufa: Publishing house of OOO "Polygraphy", 2018. pp. 42–44. (in Russian)
- 12 Kasyanov V.K., Averina Yu.M., Menshikov V.V., Strelnikova A.S. Methods for processing distillate liquid as a waste from soda ash production by the ammonia method. *Sciences of Europe*. 2018. no. 8-1(28). pp. 12–15. (in Russian)
- 13 Akhmetov T.G., Akhmetova R.T., Gaisin L.G. *Chemical technology of inorganic substances. Book 2*. St. Petersburg: Lan, 2021. 536 p. (in Russian)
- 14 Chu F., Jon Ch., Yang L., Du X. CO₂ absorption characteristics in ammonia solution inside the structured packed column. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016. vol. 55. no. 12. pp. 3696–3709. doi: 10.1021/acs.iecr.5b03614
- 15 Starkova A.V., Makhotkin A.F. Heterogeneous processes of ammonia and carbon dioxide chemisorption by aqueous ammonia solutions. *Bulletin of the Technological University*. 2022. vol. 25. no. 6. pp. 38–43. doi: 10.55421/1998-7072_2022_25_6_38 (in Russian)
- 16 Nishina O.E., Lanovetskiy S.V., Kosvintsev O.K., Kulikov M.A. Study of the process of extracting calcium sulfate impurity from halite waste of various origins. *News of universities. Chemistry and chemical technology*. 2022. vol. 65. no. 4. pp. 101–107. doi: 10.6060/ivkkt.20226504.6483 (in Russian)
- 17 Povarova L.V. Analysis of methods for treating oil-containing wastewater. *Science. Technology. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2018. no. 1. pp. 189–205. (in Russian)
- 18 Koltsov V.B., Kondratieva O.V. *Treatment facilities in 2 parts. Part 2. Textbook and practical course*. Moscow: Yurait Publishing House, 2016. 314 p. (in Russian)
- 19 Zhusupova L.A., Timurlan A. Methods of wastewater treatment from oil products. *Current scientific research in the modern world*. 2017. no. 5-9(25). pp. 123–129. (in Russian)
- 20 Navesov Sh., Erimbetova A., Izileuov G., Baibatyrova B. et al. Investigation of the process of filtering wastewater from mechanical engineering production. *Current scientific research in the modern world*. 2017. no. 1-3(21). pp. 138–142. (in Russian)
- 21 Usmani M.A., Khan I., Bhat A.H., Pillai R.S., Ahmad N., Mohamad Haafiz M.K., Oves M. Current trend in the application of nanoparticles for waste water treatment and purification: a review. *Current Organic Synthesis*. 2017. vol. 14. no. 2. pp. 206–226. doi:10.2174/1570179413666161229151830
- 22 Sannino D., Vaiano V., Rizzo L. Progress in nanomaterials applications for water purifications. *Nanotechnologies for Environmental Remediation: Applications and Implications*. 2017. pp. 1–24. doi:10.1007/978-3-319-53162-5_1
- 23 Banerjee S., Gautam R.K., Gautam P.K., Jaiswal A., Chattopadhyaya M.C. Recent trends and wastewater treatment: nanotechnological approach for water purification. *Materials Science and Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. 2017. pp. 1745–1779. doi:10.4018/978-1-5225-1798-6.ch069
- 24 Tyurina E.V. Technology for wastewater treatment in oil fields. In: *Heritage of I.M. Gubkin: integration of education, science and practice in the oil and gas sector. Materials of the international scientific and practical conference*. Ed. by S.G. Gorshenin. Saratov: OOO "Amirit", 2018. pp. 231–235. (in Russian)
- 25 Rekhovskaya E.O., Nagibina I.Yu., Studenkova A.K. et al. Improvement of the technological scheme for wastewater treatment from oil products at a thermal power enterprise. *Current issues of energy*. 2021. vol. 3. no. 1. pp. 135–140. (in Russian)
- 26 Dubrovina K.R., Shakirov T.R., Suleymanova A.Z., Khatsrinov A.I. Possibility of returning to the hydrogen chloride capture cycle with caustic soda by concentrating it and completely isolating commercial sodium chloride. *Bulletin of the Technological University*. 2024. vol. 27. no. 8. pp. 82–86. doi:10.55421/1998-7072_2024_27_8_82 (in Russian)
- 27 Nazharova L.N., Shakirov T.R. Features of rock salt dissolution from deposits of the Russian Federation. *Bulletin of the Technological University*. 2020. vol. 23. no. 9. pp. 51–55. (in Russian)
- 28 Khatsrinov A.I., Dubrovina K.R., Khakimova Z.M., Suleymanova A.Z., Vodopyanova S.V. Technology for purification of formation water in laboratory conditions for soda production. *Bulletin of the Technological University*. 2023. vol. 26. no. 12. pp. 103–106. doi:10.55421/1998-7072_2023_26_12_103 (in Russian)
- 29 Polomeeva O.A. *Physico-chemical research methods and laboratory work techniques*. St. Petersburg: Lan, 2023. 108 p. (in Russian)
- 30 Stoyanova A.D., Konkova T.V. *Physico-chemical foundations of the technology for neutralizing liquid man-made waste. Textbook*. Vologda: Infra-Engineering, 2023. 228 p. (in Russian)
- 31 Nishina O.E., Lanovetsky S.V., Kosvintsev O.K. et al. Study of the process of extracting calcium sulfate impurity from halite waste of various origins. *News of universities. Chemistry and chemical technology*. 2022. vol. 65. no. 4. pp. 101–107. doi:10.6060/ivkkt.20226504.6483 (in Russian)
- 32 Bilginer A., Canbek O., Turhan Erdoğan S. Activation of blast furnace slag with soda production waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020. vol. 32. no. 1. p. 04019316. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002987
- 33 Khajuria A., Atienza V.A., Chavanich S. et al. Accelerating circular economy solutions to achieve the 2030 agenda for sustainable development goals. *Circular Economy*. 2022. vol. 1. no. 1. p. 100001. doi: 10.1016/j.cec.2022.100001

Сведения об авторах

Ксения Р. Дубровина ассистент, аспирант, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, kseniadubrovina98@gmail.com

Тимур Р. Шакиров к.т.н., доцент, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, timur.shakirov1993@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1292-3545>

Алексей И. Хацрин д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, khatsrin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0623-1411>

Алсу З. Сулейманова заведующая лабораторией, старший преподаватель, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, alsu-sulejmanova@ya.ru

Светлана В. Водопьянова к.х.н., доцент, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, vod-sveta@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5594-2626>

Вклад авторов

обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Ksenia R. Dubrovina assistant, postgraduate student, technology of in-organic substances and materials department, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, kseniadubrovina98@gmail.com

Timur R. Shakirov Cand. Sci. (Tech.), associate professor, technology of in-organic substances and materials department, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, timur.shakirov1993@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1292-3545>

Aleksey I. Khatsrinov Doc. Sci. (Tech.), professor, head of department, technology of in-organic substances and materials department, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, khatsrin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0623-1411>

Alsu Z. Suleimanova head of laboratory, senior lecturer, technology of in-organic substances and materials department, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, alsu-sulejmanova@ya.ru

Svetlana V. Vodopyanova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, Department of technology of in-organic substances and materials, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, vod-sveta@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5594-2626>

Contribution

review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2026
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2026

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-vsu.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, 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 подписи, не должен превышать: для работ, имеющих общее значение 5–20 страниц текста, для кратких сообщений до 3 стр.

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 10 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., Belozarov 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).