

Техника и технология пищевых производств

Food Processing: Techniques and Technology



Национальный, рецензируемый научный журнал, посвященный вопросам пищевой промышленности и включенный в МБД SCOPUS и RSCI на платформе Web of Science.

Миссия: создание, агрегация, поддержка и распространение научно-образовательного контента в области пищевой промышленности, объединение усилий различных категорий исследователей, вузовской и научной интеллигенции, преодоление разрыва между изданиями регионального, национального и

федерального уровней. Журнал призван освещать актуальные проблемы в пищевой и смежных отраслях, продвигать новые перспективные технологии в широкую аудиторию научных и практических работников, преподавателей, аспирантов, студентов, предпринимателей, а также оказывать содействие в подготовке высококвалифицированных специалистов.

В журнале публикуются научные и обзорные статьи, доклады, сообщения,

рецензии, краткие научные сообщения (письма в редакцию), информационные публикации по направлениям: технология пищевых производств; процессы, оборудование и аппараты пищевых производств; гигиена питания; биотехнология; стандартизация, сертификация, качество и безопасность; химия и экология; экономика; автоматизация и информатизация технологических процессов. Подробная информация для авторов и читателей представлена на сайте <http://fptt.ru>.

Главный редактор:

А.Ю. Просеков, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия.

Зам. главного редактора:

А.Н. Петров, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, Видное, Россия;

О.О. Бабич, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия.

Редакционная коллегия:

Е.В. Абакумов, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

И.В. Алтухов, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Молодежный, Россия;

В.В. Бахарев, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия;

С.М. Бычкова, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Пушкин, Россия;

А.Г. Галстян, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия;

И.А. Ганиева, Министр науки и высшего образования Кузбасса, Кемерово, Россия;

И.Ф. Горлов, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, Волгоград, Россия;

Г.М. Гриценко, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск, Россия;

Н.И. Дунченко, Российский государственный аграрный университет – МСХА К.А. Тимирязева, Москва, Россия;

И.А. Евдокимов, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия;

Ж.С. Есимбеков, Университет имени Шакарима города Семей, Семей, Казахстан;

А.В. Заушинцева, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия;

А.П. Каледин, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия;

А.Б. Капранова, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия;

В.Г. Лобанов, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия;

Г.О. Магомедов, Воронежский государственный

университет инженерных технологий, Воронеж, Россия;

О.А. Неверова, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия;

В.Н. Попов, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия;

С.Л. Тихонов, Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия;

О.А. Фролова, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия;

В.Н. Хмелев, Бийский технологический институт, Алтайского государственного технического университета, Бийск, Россия;

Ю.С. Хотимченко, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия;

А.Г. Храпцов, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия;

С.В. Шахов, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия;

И.В. Юдаев, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Пушкин, Россия.

Материалы публикуются на условиях лицензии CC BY 4.0.

Выпускающий редактор А.И. Лосева
Ответственный за выпуск А.А. Кирякова
Литературный редактор А.Ю. Курникова
Литературный редактор (англ. язык) Н.В. Рабкина
Дизайн и компьютерная верстка М.В. Горбунова
Редактор онлайн версии Е.В. Дмитриева

Адрес редакции и издателя: КемГУ, 650000, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Кемерово, Красная, 6, тел.: +7 (3842) 58-80-24, e-mail: fptt98@gmail.com.

Адрес типографии: КемГУ, 650000, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Кемерово, пр. Советский, 73.

Учредитель: КемГУ, 650000, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Кемерово, Красная, 6.

© КемГУ, 2021. © Авторы, 2021.

Дата выхода в свет 29.12.21.

Усл. п. л. 36,25, уч.-изд. л. 30,11. Тираж 500 экз.

Цена свободная. Выходит 4 раза в год.

Подписной индекс по объединенному каталогу «Пресса России» – 41672.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-72313 выдано Роскомнадзор.

The Journal is an open access, double-blind peer-reviewed quarterly journal that encompasses a wide range of food research areas in Russia and neighboring regions.

The journal is accepted by SCOPUS and Web of Science (RSCI).

The Journal's mission is to present, integrate and disseminate the most important results of fundamental and applied research in the food industry of

Russia and the CIS countries. We aim to create scientific content that would reflect the current state of food science in the post-Soviet space.

The Journal is addressed to practicing professionals, scientists, academics, and students.

The Journal publishes the results of original research and review articles on most topics relating to

food industry, including: food production technology; food production processing and equipment; food hygiene; biotechnology; food standardization, certification, quality and safety; chemistry and ecology; economics; automation and informational support of technological processes. For submission instructions, subscription and all other information visit this journal online at <http://fptt.ru/eng>.

Editor-in-Chief

Alexander Yu. Prosekov, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia.

Deputy Editor-in-Chief

Andrey N. Petrov, All-Russia Scientific Research Institute of Canned Food Technology, Vidnoe, Russia;

Olga O. Babich, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

Editorial Board Member

Evgeny V. Abakumov, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

Igor V. Altukhov, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny, Russia;

Vladimir V. Bakharev, Samara State Technical University, Samara, Russia;

Svetlana M. Bychkova, St. Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Russia;

Aram G. Galstyan, All-Russia Dairy Research Institute, Moscow, Russia;

Irina A. Ganieeva, Minister of Science and Higher Education of Kuzbass, Kemerovo, Russia;

Ivan F. Gorlov, Povolzhsky Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products, Volgograd, Russia;

Galina M. Gritsenko, Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia;

Nina I. Dunchenko, Timiryazev Russian State Agrarian University, Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russia;

Ivan A. Evdokimov, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia;

Zhanibek S. Yessimbekov, Shakarim University of Semey, Semey, Kazakhstan;

Alexandra V. Zaushintsena, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia;

Anatoly P. Kaledin, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia;

Anna B. Kapranova, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;

Vladimir G. Lobanov, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia;

Gazibeg O. Magomedov, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;

Olga A. Neverova, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia.

Vasily N. Popov, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;

Sergei L. Tikhonov, Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia;

Olga A. Frolova, Nizhni Novgorod Engineering-economic State University, Knyaginino, Russia;

Vladimir N. Khmelev, Biysk Technological Institute, Altai State Technical University, Biysk, Russia;

Yuri S. Khotimchenko, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia;

Andrey G. Khramtsov, North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia;

Sergey V. Shakhov, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;

Igor V. Yudaev, St. Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Russia.

All articles are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits their use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as appropriate credit is given to the original author(s) and the source.

Executive Editor A.I. Loseva, Publishing Editor A.A. Kiryakova, Script Editor A.Yu. Kurnikova, Script Editor (Eng) N.V. Rabkina, Layout of Journal M.V. Gorbunova, Online Editor E.V. Dmitrieva.

Editorial and publisher: KemSU, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7(3842) 58-80-24, e-mail: fptt98@gmail.com.

Printing Office: KemSU, Sovetskiy Ave. 73, Kemerovo, 650000, Russia.

Founder: KemSU, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia.

© 2021, KemSU. © 2021, Authors

Date of issue December 29, 21.

Printed sheet 36,25 conventional printed sheet 30,11. Circulation 500 cop. Open price.

Issued 4 times a year.

Subscription index for the unified "Russian Press" catalogue – 41672.

The certificate of mass media registration is PI № FS 77-72313 Given by the Roskomnadzor.

Персонализированное питание – залог здорового будущего

В последние годы в науке и практике успехи в сфере рационального питания выходят на новый уровень значимости. Сохраняется тенденция к персонализированному питанию, которая связана с индивидуальным подходом к здоровью каждого человека с учетом физиологических особенностей организма, социально-экономических условий жизни, привычек питания и генетической памяти в целом. По данным аналитиков J'son&Partners Consulting, объем мирового рынка FoodTech достигнет 390 млрд долл. к 2025 г. Сегодня 65 % этого объема приходится на сегмент экологически чистой упаковки, но наиболее динамичными рынками считаются биотехнология и Интернет вещей (IoT).

В настоящее время вопросы индивидуального питания включаются в такое современное научное направление, как нутрициология, т. е. наука о питании (лат. *nutritio* – питание). Она сфокусирована на решении проблемы обеспечения различных групп населения полноценными продуктами. Первая ее ветвь – нутригеномика – изучает влияние пищи на экспрессию генов. Вторая ветвь – нутригенетика – исследует влияние генов на потребление и усвоение различных компонентов пищи. В этом плане функциональные высокотехнологичные продукты приобретают значение при их внедрении на рынок.

Текущее состояние рынка функциональных продуктов питания как во всем мире, так и внутри страны определяется как динамично развивающееся. В перспективе рынок персонализированных продуктов будет активно набирать обороты в России и за рубежом. Многие страны поддерживают производство обогащенных продуктов на государственном уровне. Такие инициативы уже разработаны в Японии, Индии, Китае и других странах.

В начале XXI века в социально-экономических условиях России формирование государственной политики в области здорового питания представляет собой не только современную, но и жизненно важную задачу. Несоответствие питания физиологическим

потребностям организма является угрозой национальной безопасности страны. Рациональное питание способствует усилению защитных реакций организма в ответ на неблагоприятные воздействия внешней среды, сохраняет здоровье и трудоспособность человека. Работники горнорудной, химической и металлургической промышленности, как показали многочисленные исследования, более подвержены профессиональным заболеваниям, в том числе заболеваниям системы кровообращения, органов дыхания, органов пищеварения и онкологическим заболеваниям, чем лица, не работающие во вредных условиях труда.

Кузбасс является первым регионом России, в котором была разработана региональная программа «К здоровью – через питание». Данная программа предполагает широкий спектр мероприятий. Во-первых, это создание и реализация эффективных и экономически обоснованных проектов по обеспечению населения полноценным питанием. Во-вторых, разработка новых продуктов лечебно-профилактического назначения. В-третьих, осуществление мониторинга в области экологии пищевых продуктов и состояния здоровья. Наконец, пропаганда здорового образа жизни, в том числе культуры питания. Отметим, что указанные аспекты актуализируются в рамках государственной Концепции политики здорового питания населения России, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации.

В связи с тяжелыми условиями труда, воздействием вредных производственных факторов и широким распространением профессиональных заболеваний в Кузбассе персонализированное питание значимо для шахтеров. При решении проблемы питания шахтеров необходимо сосредоточиться на профилактике этих заболеваний и повышении активности трудоспособного населения.

Не вызывает сомнений, что за грамотным персонализированным питанием каждого человека – будущее.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-654-663>Original article
Available online at <http://fptt.ru/eng>

Quality and Safety of Game Meat from the Biocenosis of the Beloosipovo Mercury Deposit (part 2)¹

Alexander Yu. Prosekov*, **Olga G. Altshuler**, **Marina G. Kurbanova**Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: September 05, 2021

Accepted in revised form: September 27, 2021

Accepted for publication: September 29, 2021

*e-mail: aprosekov@rambler.ru

© A. Yu. Prosekov, O. G. Altshuler, M. G. Kurbanova, 2021

Abstract.

Introduction. Mercury contamination is one of the most common environmental problems. The research objective was to study the qualitative composition and physicochemical properties of raw game meat obtained from the area near the Beloosipovo mercury deposit in order to define any possible contamination with xenobiotics.

Study objects and methods. The research featured rib eye muscle tissue and soft flesh of elks shot on the hunting farms of the Kemerovo Region aka Kuzbass.

Results and discussion. A complex set of experiments revealed the chemical composition of elk muscle tissue and flesh, as well as the mineral composition of elk muscle tissue. The samples were obtained from different parts of carcasses. The amino acid and fatty acid composition of elk muscle tissue made it possible to describe the biological value, mineral composition, and vitamin profile of elk meat. The physicochemical analysis included toughness, cooking losses, and moisture-retaining capacity, i.e. the properties that ensure juiciness. The research also featured the accumulation of xenobiotics in elk meat samples obtained from the biosinosis near the Beloosipovo mercury deposit.

Conclusion. The slaughter yield of elk meat was 51–53%, which exceeds the average yield of farm cattle meat by 4–6%. The moisture content was 73–78%, while the content of protein was between 20–24% and depended on the anatomical location of the muscle sample; the fat content reached 0.75–1.75%. The mercury accumulation at different storage temperature conditions ranged from 0.004 ± 0.001 to 0.009 ± 0.001 mg/kg, while the maximum allowable concentration of mercury is 0.03 mg/kg.

Keywords. Elk, mercury, biocenosis, meat, chemical composition, functional and technological properties, aging

Funding. The research was conducted on the premises of the Research Equipment Sharing Center of Kemerovo State University (KemSU)^{ROR}, agreement No. 075-15-2021-694 dated August 5, 2021, between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka)^{ROR} and Kemerovo State University (KemSU) (contract identifier RF----2296.61321X0032).

For citation: Prosekov AYu, Altshuler OG, Kurbanova MG. Quality and Safety of Game Meat from the Biocenosis of the Beloosipovo Mercury Deposit (part 2). Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):654–663. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-654-663>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-654-663>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Исследование качества и безопасности мяса диких животных, полученного в условиях биоценоза Белоосиповского ртутного месторождения (часть 2)¹

А. Ю. Просеков*, **О. Г. Альтшуллер**, **М. Г. Курбанова**Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 05.09.2021

Принята после рецензирования: 27.09.2021

Принята в печать: 29.09.2021

*e-mail: aprosekov@rambler.ru

© А. Ю. Просеков, О. Г. Альтшуллер, М. Г. Курбанова, 2021

¹ Prosekov AYu. Migration of mercury in the food chains of the Beloosipovo biocenosis (part 1). Foods and Raw Materials. 2021;9(2):324–334. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-324-334>.

Аннотация.

Введение. Одна из самых распространенных экологических проблем связана с загрязнением окружающей среды соединениями ртути. Целью работы стало исследование качественного состава и физико-химических свойств нетрадиционного мясного сырья, а также изучение степени накопления ксенобиотиков в мясе диких животных, полученных в условиях биоценоза Белоосиповского ртутного месторождения.

Объекты и методы исследования. Мышечная ткань длиннейшей мышцы спины, а также мякоть мяса лосей, добытых ружейным способом егерями в охотничьих хозяйствах Кемеровской области – Кузбасса.

Результаты и их обсуждение. В ходе комплексных исследований был изучен химический состав мышечной ткани и мякоти мяса лоса, а также минеральный состав мышечной ткани лоса, полученной из разных анатомических частей туши животного. Биоэкологическую ценность мяса лоса оценивали по результатам изучения аминокислотного и жирнокислотного состава мышечной ткани, а также минерального и витаминного состава. Были изучены физико-химические показатели мяса лоса, характеризующие его жесткость, потери при тепловой обработке, способность связывать и удерживать влагу, что обеспечивает его сочность. Завершающий этап исследований связан с изучением накопления ксенобиотиков в опытных образцах нетрадиционного мясного сырья, полученного вблизи района Белоосиповского ртутного месторождения.

Выводы. Убойный выход составил 51–53 %, что превышает выход мяса крупного рогатого скота на 4–6 %. Содержание влаги в мясе лоса составило 73–78 %, белка 20–24 %, в зависимости от анатомического расположения мышц, жира 0,75–1,75 %. Динамика накопления изменения ртути в мясе лоса при разных температурных режимах его хранения составляла в пределах от $0,004 \pm 0,001$ до $0,009 \pm 0,001$ мг/кг (при ПДК 0,03 мг/кг).

Ключевые слова. Лось, ртуть, биоценоз, мясо, химический состав, функционально-технологические свойства, выдержка

Финансирование. С использованием (или на оборудовании) Центра коллективного пользования научным оборудованием Кемеровского государственного университета (КемГУ)  в рамках соглашения № 075-15-2021-694 от 05.08.2021, заключенного между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России)  и Кемеровским государственным университетом (уникальный идентификатор контракта RF----2296.61321X0032).

Для цитирования: Просеков А. Ю., Альтшуллер О. Г., Курбанова М. Г. Исследование качества и безопасности мяса диких животных, полученного в условиях биоценоза Белоосиповского ртутного месторождения (часть 2) // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 654–663. (На англ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-654-663>.

Introduction

Environmental pollution has been the main concern of ecologists, doctors, and food manufacturers for the last several decades [1].

Heavy metals and mercury are one of the most widespread and dangerous environmental pollutants. Massive mercury poisoning occurred in the 1950s–1970s as a result of the consumption of fish from mercury-contaminated water sources. The massive character of this phenomenon also triggered extensive research on the effect of mercury on terrestrial ecosystems [2–4].

Short-chain alkyl mercury compounds cause the greatest ecotoxicological hazard. They form strong bonds with sulfur and weaker bonds with nitrogen, oxygen, and halogens. Strong mineral acids break the mercury-carbon bond to form inorganic compounds. Mercury has the highest ionization potential among other chalcophilic elements. Due to this geochemical feature, mercury can be reduced to its atomic form and is highly resistant to oxygen and acids [5]. Mercury is scattered in the earth's crust: its deposits have a natural content of 0.02% [6–8]. In addition to the atomic state, mercury occurs in a bivalent and univalent state [9]. E.B. Swain *et al.* claim that the air usually contains up to 5000 tons of mercury vapor or aerosol, and elemental mercury vapors can remain in the atmosphere for 1–2 years [10]. Reactive ionic forms persist in the atmosphere from several hours to several days [11]. In low-

polluted air, the concentration of mercury is 0.8–1.2 ng/m³. However, near large mercury deposits it can be as high as 240 ng/m³, and near gas deposits – 70 000 ng/m³, while the average content of mercury is 0.5–2.0 ng/m³ [12].

E.G. Pacyna *et al.* and R. Ebinghaus *et al.* proved that anthropogenic impact increases the man-induced component in the biogeochemical cycle, as well as the emigration and redistribution of natural mercury compounds [13, 14]. In nature, mercury compounds are highly volatile and rise in the air quite easily. In addition, mercury compounds are highly soluble in water. Mercury is one of the most toxic elements in the environment, with organic and inorganic mercury being the main forms found in food samples [15].

When dissolved in water, mercury forms strong soluble complex compounds with various organic substances. Methylmercury (MeHg⁺) results from mercury ions Hg²⁺ and methyl radicals CH₃, which can be of different origins, including bacterial. In low salinity water, methylmercury ion HgCH₃⁺ and hydroxymethylmercury CH₃HgOH are the most popular compounds of mercury. In natural water pools, humic and fulvic acids are the most widespread donors of methyl groups, while the content of humic acids in soil is also very high. Mercury methylation depends on the ionization of the abovementioned acids, the optimal pH values for these reactions being 6–8 [16–18].

The Kemerovo Region covers an area of about 95.5 thousand km². It is a large mining, processing, chemical, and agricultural center.

The Kemerovo State University conducted an expedition to the area of the Beloosipovo mercury deposit (Krapivinsky district). The team included scientists of the Institute of Biology, Ecology, and Natural Resources and was led by D.V. Sushchev, Candidate of Biological Sciences. The team established the patterns of mercury accumulation and distribution in various components of the terrestrial ecosystem. They determined the mercury content in soil, herbaceous plants, arthropods, and small mammals, which they harvested in various biotopes near the mercury deposit. A small plant evaporated mercury from ore in the Belaya Osipova river valley in 1969–1975 (<https://www.krapivino.ru/node/15303>).

Based on the e-catalog of geological documents (Russian Federal Geological Fund), specialists from the Kemerovo State University referred the Beloosipovo mercury deposit to the Kuznetsk fault zone. The mineralization here is uneven and scattered. The mercury deposit is estimated as 124 tons, cinnabar (HgS) being the main ore-bearing mineral. The deposit has a hydrothermal low-temperature origin and is located in the zone of deep and echelon faults. Mercury manifests itself here as occasional ore occurrences, points of mineralization, concentrate and geochemical aureoles, etc. Areas of high mercury concentration intersperse with barren ones. The area featured in the present research is part of the Pezas-Beloosipovo mercury ore zone and the Beloosipovo mercury ore deposit [19].

The highest concentration of mercury is 1.5 km north of the mine: soil – 0.72 and 0.96 mg/kg, plants – 0.064 mg/kg, insects – 0.063 mg/kg, rodents – 0.091 mg/kg, insectivores – 0.056 mg/kg. The maximum allowable concentration (MAC) of mercury in soil is 2.1 mg/kg. Therefore, the mercury concentration in the local soil was well within the norm (0.72 and 0.96 mg/kg).

Soil plays an important role in the global biogeochemical cycle of mercury. As it settles on the soil surface, its further route into aquatic ecosystems largely depends on terrestrial ecosystems [20, 21]. In addition to elemental mercury, soil contains inorganic and organic compounds [22]. Inorganic compounds

exist in mobile (water- and acid-soluble), oxide, and sulfide forms.

Mercury concentration is known to be much lower in the soils of national parks with their minimal external anthropogenic impact than in the areas affected by human economic activities.

All forms of mercury in soils can be divided into four types:

- 1) water-soluble mercury is described as readily available to plants;
- 2) mercury soluble in an acetate-ammonium buffer solution (pH 4.8) is believed to be conditionally easily available to plants;
- 3) acid-soluble mercury is classified as potentially available to plants;
- 4) alkali-soluble forms of mercury are conditionally associated with mobile humic substances.

The content of mercury in one and the same type of soil can be different as it depends on the adjacent landscapes. For instance, its concentration is lower in separate eluvium than in conjugated transeluvial and super-aquatic soils, which is associated with migration-accumulative processes.

In continental biogeocenoses, mercury concentration increases in the following order: plants > insects > soil microorganisms > herbivorous mammals > carnivorous mammals > macromycetes [23].

In 2018–2021, water samples from the Belaya Osipova exceeded the MAC for mercury by 5–20%. Probably, the groundwater and surface floods are leaching mercury compounds from the deposit. However, the biological diversity proves that such concentrations have no pronounced impact on the local ecosystem. In fact, the concentration of mercury goes down as it moves up the food chains.

The Beloosipovo mercury deposit is surrounded by taiga with its typical flora and fauna, including game animals and birds. Professor A.Yu. Prosekov also commented on the diversity of Beloosipovo flora in his article *Migration of Mercury in the Food Chains of the Beloosipovo Biocenosis*. The local taiga is predominated by Siberian spruce (*Abies sibirica* Ledeb.), aspen (*Populus tremula* L.), birch (*Betula pubescens* Ehrh., *Betula pendula* Roth), and lush herbaceous vegetation up to three meters tall. The rich undergrowth is formed by such

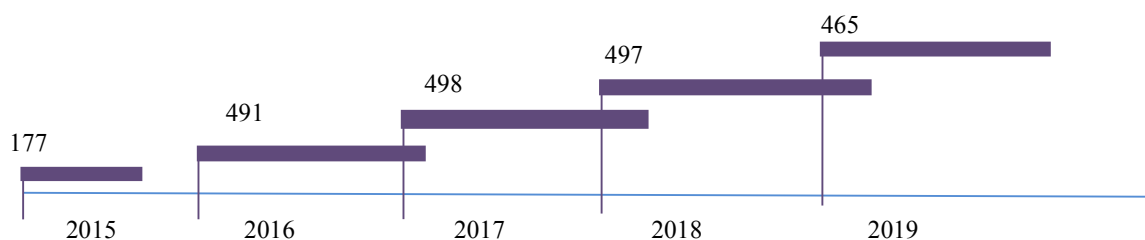


Figure 1. Elk population in the Krapivino district

shrubs as goat willow (*Salix caprea* L.), cranberry bush (*Viburnum opulus* L.), pea shrub (*Caragana arborescens* Lam.), Siberian mountain ash (*Sorbus sibirica* Hedl.), and bird cherry (*Padus avium* Mill.). Some undergrowth areas are represented by sparse shrubbery, which is known to attract wild animals, such as elk.

The list of herbaceous plants includes melancholy thistle (*Cirsium heterophyllum* (L.) Hill.), millet grass (*Milium effusum* L.), dissected hogweed (*Heracleum dissectum* Ledeb.), wild chervil (*Anthriscus sylvestris* (L.) cacalia (*Cacalia hastata* L.), Siberian hawk's beard (*Crepis sibirica* L.), northern wolfsbane (*Aconitum septentrionale* Koelle), meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.), Siberian globeflower (*Trollius asiaticus* L.), and giant fescue (*Festuca gigantea* (L.) Vill.). All these plants serve as food base for taiga fauna.

Forest phytocenoses prevail in the research area, e.g. aspen-birch-fir forest with lush tall grass and occasional Siberian spruces. The growing anthropogenic load makes it necessary to study the patterns of its effect on the local wild animal population. Professor A.Yu. Prosekov described the changes in the elk population in his research *Effect of Forest Coverage on Elk Population in Kuzbass*. Figure 1 illustrates the pattern of elk population in the Krapivino district in 2015–2019 as reported by the Department of Wildlife Protection of the Kemerovo Region (Fig. 1) [24–26].

In 2017, the elk population reached its peak, while the total rise for 2015–2019 was 163%. The area of the hunting grounds in the Krapivino district is 8328 hectares, i.e. 805 hectares of forest per animal, which provides a fairly good forage base [25–27].

Elks (*Alces a. Pfizenmayeri* Zukowski) avoid dense forests. They prefer sparse forests and overgrown clearings, glades, and meadows that are rich in forage. The vast burnt-out areas with young plants are home to a large elk population. Elks spend all seasons in mixed and deciduous forests. In summer, they eat leaves, reaching as far as their considerable height allows them. They feed on tall grasses in burnt-out areas and logging spots. Late in summer, they eat all kinds of mushrooms, even fly agarics – for medicinal purposes. In September, elks start eating shoots and twigs, and by November they almost completely switch to browse forage. Their daily food intake varies from season to season. An adult elk consumes 35 kg of food per day in summer and 12–15 kg in winter, i.e. about seven tons of plant food per year. If elk population increases, they can damage forest nurseries and plantings. Elks use every opportunity to lick salt, sometimes even the salt mix that is used to melt snow on highways [28, 29].

The elk is a game animal, which makes its meat an object of research interest. Its quality and safety depends on the fact whether it accumulates such xenobiotics as mercury. Experimental studies and chance finds prove that 0.1–200 mg of mercury per 1 kg of wet weight can destroy the normal reproduction pattern and life

of warm-blooded animals, depending on numerous factors [30].

Xenobiotic contamination of food raw materials and products usually corresponds with the degree of environmental pollution. Moving along the food chain, contaminants enter human body and cause serious health problems. Food chains are one of the main routes that harmful chemicals take to get into human body. Science knows more than nine million xenobiotics of various nature. According to the Food and Agriculture Organization (FAO) and the World Health Organization (WHO), people consume 80–95% of contaminants with food and 4–7% with drinking water, while 1–2% enters human body from the air through the skin.

The research objective was to study the chemical composition, functional, technological, and physicochemical properties, and the accumulation of xenobiotics in the raw elk meat obtained from the biocenosis of the Beloosipovo mercury deposit.

The goal was to define:

- the anatomical and chemical composition of elk meat from the forests of the Krapivino region in the vicinity of the Beloosipovo mercury deposit;
- the amino acid, fatty acid, and mineral composition of elk meat, as well as its functional and technological properties;
- the degree of accumulation of mercury in meat samples in their native state during storage and after various methods of processing.

Study objects and methods

The research featured muscle tissue from the rib eye area and fat and muscle tissue from the hind legs of three elks (two males, one female) shot by the game wardens in the hunting farms of the Kemerovo Region. The sample description included the sex, body carcass weight, and approximate age of the animals. The selected samples were placed in a chemically neutral package, sealed, and stored at $-20 \pm 2^\circ\text{C}$. The sampling procedure and freshness test followed State Standard 7269-2015. Moisture content was determined according to State Standard 33319-2015; fat – by a Soxhlet extraction device according to State Standard 23042-2015; total protein – by the Kjeldahl method according to State Standard 25011-2017. All the biochemical studies involved modern analytical equipment from the laboratory of the Research Institute of Biotechnology, Kemerovo State University. The list of indicators to be defined included the content of fatty acids, vitamins, and macro- and microelements. The mineral composition of the elk meat was determined using an X-ray fluorescence spectrometer (Carl Zeiss Jena). The amino acid composition was tested with an automatic amino acid analyzer Aracus PMA GmbH, which was approved by directives 98/64/EU and 2000/45/EU. The method presupposed a cation-exchange separation of amino acids with a stepwise pH gradient and a post-column derivatization with ninhydrin. The fatty acid

composition was determined by gas chromatography based on State Standard 55483-2013.

Hydrogen ions (pH) were studied by the potentiometric method, the moisture-binding and moisture-retaining capacity – by centrifugation and pressing. To define the mercury concentration, the muscle tissue samples were dried and subjected to dry ashing by the cold vapor method in a Julia 5K device.

Results and discussion

Three elks were shot in the Krapivinsky district during the hunting period (October – November) of 2017–2020 to assess the possible xenobiotic contamination of meat. Sample 1 weighed 270.0 ± 10.5 kg, sample 2 – 310.0 ± 13.5 kg, and sample 3 – 260.0 ± 10.0 kg. The carcasses weighed 143.40 ± 7.15 kg, 165.20 ± 8.26 kg, and 137.80 ± 6.89 kg, respectively. The slaughter yield was within 51–53%, which exceeded the meat yield from farm cattle (47–50%).

The elk is the largest representative of deer. The elk meat samples were dark red, with coarse fiber and

almost no fat in the muscle tissue. Scarce fat stripes were observed on the neck and chest. The highest fat content was registered in the pelvic cavity and the lumbar area. The fat was white and hard and crumbled at room temperature. The melting point of fat from different parts of the carcass ranged from 47.1 to 48.5°C.

The lymph nodes were oval and varied in size. They were gray-white on the surface, while their peripheral areas were darker, which suggests that the animals were healthy.

The initial sensory analysis included boiling the samples in order to assess the quality of the broth. The broth was transparent and had a typical meaty smell, which indicated the good quality of the meat. The freshness test procedure for game meat included a complex of studies, which consisted of a sensory evaluation, bacterioscopy of deep layers, cooking test and ammonia reaction with Nessler's reagent. The complex analysis confirmed the freshness of the meat samples.

Table 1 shows the anatomical and chemical composition of the elk meat.

Table 1. Morphological and chemical composition of elk meat (n = 3)

Indicator	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Mean value
Anatomical composition, kg				
Muscle tissue	105.39 ± 5.15	121.42 ± 6.08	101.28 ± 5.67	109.36 ± 5.46
Fat	0.86 ± 0.11	1.16 ± 0.09	0.84 ± 0.13	0.95 ± 0.11
Connective tissue	11.23 ± 1.75	13.05 ± 0.96	10.88 ± 1.18	11.72 ± 0.58
Bones and cartilage	25.81 ± 1.99	29.81 ± 1.69	24.82 ± 1.16	26.81 ± 1.60
Chemical composition of rib eye sample, g/100 g				
Moisture	77.85 ± 3.11	78.88 ± 2.94	77.61 ± 3.18	78.14 ± 3.90
Total protein	19.88 ± 0.79	21.56 ± 0.86	19.75 ± 0.78	20.39 ± 0.81
Fat	0.77 ± 0.03	0.82 ± 0.03	0.68 ± 0.02	0.75 ± 0.03
Ash	0.99 ± 0.04	1.23 ± 0.04	1.05 ± 0.04	1.09 ± 0.04
Chemical composition of the average sample of flesh, g/100 g				
Moisture	72.62 ± 2.27	74.14 ± 2.13	73.82 ± 2.04	73.52 ± 3.65
Total protein	23.32 ± 0.85	24.65 ± 1.05	22.91 ± 0.88	23.62 ± 1.18
Fat	1.70 ± 0.06	1.73 ± 0.07	1.80 ± 0.07	1.74 ± 0.08
Ash	1.21 ± 0.05	1.42 ± 0.04	1.34 ± 0.06	1.32 ± 0.06
Other substances	1.31 ± 0.05	1.48 ± 0.05	1.30 ± 0.04	1.36 ± 0.04

Table 2. Amino acid composition of elk meat (rib eye), g/100 g of protein (n = 3)

Amino acid	Content	Amino acid	Content
Essential		Nonessential	
Valine	2.55 ± 0.06	Methionine + Cysteine	2.87 ± 0.08
Isoleucine	3.83 ± 0.11	Hydroxyproline	0.55 ± 0.01
Leucine	3.58 ± 0.10	Glutamine	3.86 ± 0.11
Lysine	4.86 ± 0.24	Proline	0.98 ± 0.02
Methionine	1.75 ± 0.04	Serine	2.62 ± 0.07
Tryptophan	3.96 ± 0.02	Glycine	2.82 ± 0.08
Threonine	3.64 ± 0.10	Alanine	2.77 ± 0.08
Phenylalanine	1.73 ± 0.05	Arginine	3.66 ± 0.11
Total	25.90 ± 0.68	Total	20.13 ± 0.58

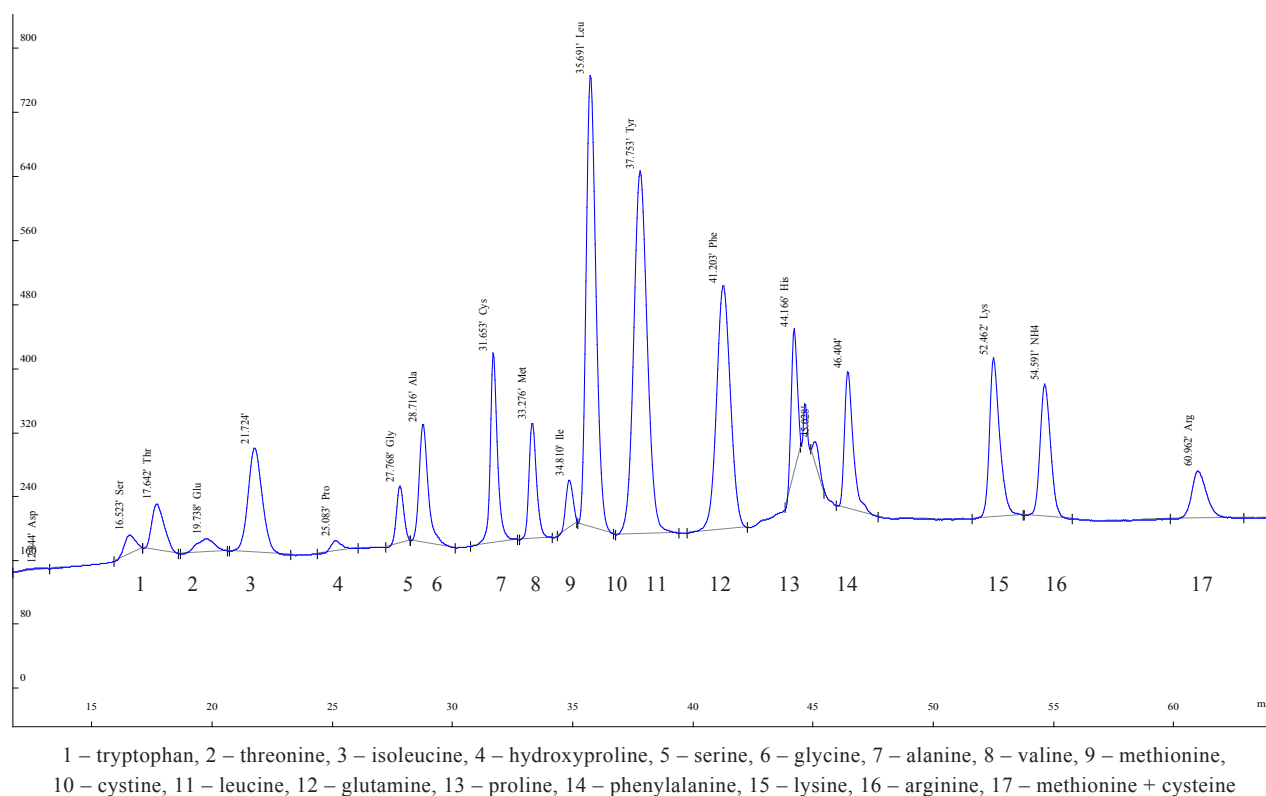


Figure 2. Chromatographic profile of the amino acid composition of elk rib eye

The average morphological composition of elk carcasses was as follows (% of the carcass weight). Muscle tissue predominated, the yield being $73 \pm 2\%$; the content of bones and cartilage was $18 \pm 2\%$, connective tissue – $8 \pm 1\%$, and fat – $0.7 \pm 1\%$. Table 1 shows that the moisture content in the rib eye sample was 78.14 ± 3.90 g/100 g, which exceeded this indicator in the average flesh sample by 5.91%. The samples demonstrated a high protein content of 23.62%, which exceeded that of farm animal meat, e.g. in pork and beef, the mass fraction of protein is 14–15 and 16–17%, respectively. The protein:fat ratio was 1:0.07, while for farm cattle this ratio is 1:0.5. Unlike more traditional raw meat, elk meat has low fat content, which proves its dietary properties and a lower cholesterol profile.

The biological value of meat depends on the main nutrients, in particular, amino and fatty acids. Therefore, the next task was to determine these indicators for the rib eye samples (Tables 2 and 3, Fig. 2).

The total amount of essential amino acids in the elk rib eye samples exceeded the nonessential ones by 23%. The total amino acid level was 46.03 ± 1.38 g per 100 g of protein.

The list of the most abundant essential amino acids started with lysine (4.86 ± 0.24), tryptophan (3.96 ± 0.02), and isoleucine (3.83 ± 0.11). The nonessential amino acids were dominated by glutamine 3.86 ± 0.11 and arginine 3.66 ± 0.11 g/100 g of protein.

The ratio of the essential and nonessential amino acids was high in the rib eye samples: the protein quality index

Table 3. Fatty acid composition of elk rib eye, % (n = 3)

Acid	Content	Acid	Content
Saturated fatty acids		Unsaturated fatty acids	
Lauric	1.09 ± 0.03	Palmitoleic	6.54 ± 0.19
Myristic	0.75 ± 0.02	Oleic	44.02 ± 1.32
Palmitic	26.13 ± 0.74	Linoleic	1.10 ± 0.03
Stearic	5.26 ± 0.15	Linolenic	0.17 ± 0.01
Arachinic	0.09 ± 0.01	Total	51.83 ± 1.55
Total	33.32 ± 0.98		

Table 4. Mineral profile of elk meat, mg/100 g (n = 3)

Micronutrients	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Mean value
Iron	2.91 ± 0.09	2.88 ± 0.08	2.93 ± 0.08	2.90 ± 0.08
Copper	5.48 ± 0.16	6.21 ± 0.18	6.33 ± 0.18	6.01 ± 0.18
Calcium	10.22 ± 0.30	10.31 ± 0.30	11.01 ± 0.35	10.51 ± 0.33
Magnesium	24.55 ± 0.49	24.41 ± 0.47	23.88 ± 0.45	24.28 ± 0.47
Sodium	77.41 ± 1.54	76.88 ± 1.53	77.32 ± 1.54	77.20 ± 1.54
Zink	125.66 ± 2.51	133.45 ± 2.66	129.75 ± 2.19	129.62 ± 2.28
Phosphor	194.43 ± 3.88	194.41 ± 3.88	196.22 ± 3.81	195.02 ± 3.85
Sulfur	195.54 ± 3.91	197.21 ± 3.94	196.51 ± 3.93	196.42 ± 3.95
Potassium	305.22 ± 6.10	307.33 ± 6.14	306.44 ± 6.11	306.33 ± 6.12

Table 5. Physicochemical, functional, and technological properties of elk muscle tissue (n = 3)

Indicator	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Mean value
pH	5.80 ± 0.12	6.00 ± 0.14	6.2 ± 0.16	6.00 ± 0.14
Color intensity, E×1000	375.80 ± 11.10	376.91 ± 10.20	375.00 ± 10.50	375.90 ± 10.47
Moisture-binding capacity, %	74.66 ± 2.23	72.33 ± 2.16	73.11 ± 2.19	73.36 ± 3.50
Moisture-retaining capacity, %	58.62 ± 1.75	59.88 ± 1.79	60.21 ± 1.80	59.57 ± 1.78
Cooking loss, %	20.58 ± 1.21	18.99 ± 1.16	21.01 ± 1.23	20.19 ± 1.20
Rib eye area, cm ² (at ribs 12–13)	31.21 ± 0.93	32.01 ± 0.96	31.80 ± 0.95	31.67 ± 0.95
Shearing strength, kg/cm ²	2.10 ± 0.06	2.59 ± 0.07	2.40 ± 0.07	2.36 ± 0.07

Table 6. Accumulation of mercury in elk muscle tissue during maturation (n = 3)

Exposure time	Mercury concentration, mg/kg of solids			Mean value
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	
At 20 ± 2°C				
Control (fresh meat)	0.004 ± 0.001	0.003 ± 0.002	0.005 ± 0.001	0.004 ± 0.001
2 days	0.006 ± 0.002	0.005 ± 0.001	0.007 ± 0.001	0.006 ± 0.001
At -20 ± 2°C				
5 days	0.005 ± 0.001	0.004 ± 0.001	0.007 ± 0.001	0.005 ± 0.001
10 days	0.007 ± 0.001	0.006 ± 0.001	0.009 ± 0.001	0.007 ± 0.001
15 days	0.009 ± 0.001	0.008 ± 0.001	0.012 ± 0.001	0.009 ± 0.001

(PQI) was 7.2, with a rather high content of tryptophan and a low content of hydroxyproline. For beef, the PQI is 5.0–5.5.

Oleic acid proved to be the most abundant unsaturated fatty acid. It improves human metabolism and immune system; it is good against cholesterol and insulin resistance. Oleic acid occupied 85% of the total amount of unsaturated fatty acids. Palmitic acid topped the list of saturated fatty acids. The total amount of saturated fatty acids in the rib eye sample was $33.32 \pm 0.98\%$, that of unsaturated – $51.83 \pm 1.55\%$.

Minerals also increase the nutritional and biological value of meat. They are important for metabolism, growth, and development. Table 4 shows the mineral composition of the elk meat.

The samples proved to be rich in potassium (306.33 ± 6.12 mg/100 g), sulfur (196.42 ± 3.95 mg/100 g), and phosphorus (195.02 ± 3.85 mg/100 g). Unlike beef and pork, elk meat appeared to contain a lot of potassium,

sodium, magnesium, iron, and phosphorus. For example, elk meat has more potassium than pork and beef by 7 and 10%, sodium – by 24 and 35%, and iron – by 17 and 30%, respectively. Iron with its 2.90 ± 0.08 mg/100 g was the predominant trace element.

The quality of the muscle tissue was tested according to its physicochemical parameters, cooking losses, and moisture-retaining properties, i.e. the properties that defined the juiciness of the meat. Another test measured the pH value, which depended on biochemical changes related to maturation processes and glycogen conversion (Table 5).

The analysis of the functional and technological properties involved moisture-binding capacity ($73.36 \pm 3.50\%$) and water-retaining capacity ($59.57 \pm 1.78\%$). The hydrogen index (pH) of meat varied from 5.8 to 6.2 units, which means that a small amount of lactic acid prevented the development of putrefactive microflora. The water-retaining capacity depends on the ability

of proteins to bind water in various ways, both on the surface and inside. Therefore, it is responsible for juiciness, tenderness, market quality, cooking and freezing losses, etc.

The elk meat samples appeared to be quite tender: the shearing strength was 2.36 ± 0.07 kg/cm², and the cooking losses were only $20.19 \pm 1.20\%$. The size of the rib eye characterizes the fleshing of carcass; this indicator was 31.67 ± 0.95 cm², which meant a relatively high meat production.

The final stage of the research featured the accumulation of xenobiotics, in particular, mercury.

The high toxicity of mercury depends on the type of compound. Various mercury compounds differ in the way they are absorbed, get involved into metabolic processes, and excreted from the body. Mercury is toxic because it interacts with sulfhydryl proteins. By blocking them, mercury changes their properties or inactivates a number of vital enzymes. As it enters the cell, mercury incorporates into the DNA, which can cause hereditary disorders [31].

The brain exhibits a special affinity for methylmercury: its ability to accumulate mercury is almost six times higher than that of other organs. Inorganic mercury compounds disrupt the metabolism of ascorbic acid, calcium, copper, zinc, and selenium. Organic mercury compounds affect the metabolism of proteins, cysteine, ascorbic acid, tocopherols, iron, copper, manganese, and selenium. It takes mercury compounds 70 days to leave human body. Zinc and especially selenium can protect human organism from mercury compounds. Selenium forms a non-toxic selenomercury complex as a result of demethylation of mercury. Ascorbic acid and copper can lower the toxicity of inorganic mercury compounds, while proteins, cysteine, and tocopherols help against organic mercury compounds. The acceptable weekly intake of mercury cannot exceed 0.3 mg. The acceptable daily intake of mercury is 0.0006 mg per 1 kg of body weight [31, 32].

The UN, WHO, and FAO developed the basic indicators of food hygiene based on toxicological criteria:

MAC is the maximum allowable concentration of contaminants in the air, water, and food from the point of view of safety for human health. Daily exposure to MAC for an arbitrarily long time does not trigger diseases or health problems that can be detected by modern research methods in the life of the present and subsequent generations.

ADI is acceptable daily intake that does not affect human health throughout life (mg/kg).

TDI is the tolerable daily intake calculated as ADI multiplied by the average body weight (60–70 kg) that a person can consume daily throughout life without risk to health [33].

The content of mercury in elk muscle samples was determined in fresh meat samples (control), after two days of storage at 20 ± 2 °C, and on storage days 5, 10, and 15 at -20 ± 2 °C (Table 6).

Mercury concentration in the muscle tissue increased with maturation, even at low temperatures. On storage day 15 at -20 ± 2 °C, it increased by approximately 2.25–2.6 times. At room temperature, the rate of mercury concentration in the muscle tissue doubled.

However, mercury concentrations at different temperatures did not exceed the MAC value of 0.03 mg/kg.

On storage day 15 at low temperatures, several samples were thawed and subjected to frying and boiling to determine the mercury content. Boiling decreased the mercury concentration by 22%. However, boiling does not affect the concentration of xenobiotics in mushrooms. In mushrooms, mercury is bound with amino groups of nitrogen-containing compounds, and in meat – with sulfur-containing amino acids. Frying decreased the mercury concentration by 25%; this value could be improved by subjecting the meat to preliminary grinding.

Conclusion

The present research revealed some useful data on the composition and properties of raw elk meat, such as mercury concentration and its patterns during storage.

The slaughter yield was 51–53%, which is significantly higher than for farm cattle (45–47%). The anatomical composition of elk carcass was as follows: muscle tissue – $73 \pm 2\%$, bones and cartilage – $18 \pm 2\%$, connective tissue – $8 \pm 1\%$, fat tissue – $0.7 \pm 1\%$. The moisture content in the rib eye muscle tissue was 78.14 ± 3.90 g/100 g, which exceeded the average flesh sample by 5.91%. The elk meat proved to have a high protein content of 20–24%, while the protein:fat ratio in the flesh sample was 1:0.07, which classifies the elk meat as a dietary product.

The total level of amino acids was 46.03 ± 1.38 g/100 g of protein, while the total amount of essential amino acids in the rib eye tissue exceeded that of nonessential acids by 23%. The total amount of saturated fatty acids in the rib eye sample was $33.32 \pm 0.98\%$, that of unsaturated fatty acids – $51.83 \pm 1.55\%$.

The mineral composition of elk meat was dominated by potassium (306.33 ± 6.12 mg/100 g), sulfur (196.42 ± 3.95 mg/100 g), and phosphorus (195.02 ± 3.85 mg/100 g).

The water-binding capacity was $73.36 \pm 3.50\%$, while the water-retaining capacity was $59.57 \pm 1.78\%$. The pH of the elk meat varied from 5.8 to 6.2 units; the shearing strength was 2.36 ± 0.07 kg/cm². The cooking losses were as low as $20.19 \pm 1.20\%$.

The final set of experiments measured the level of xenobiotics in the elk meat obtained from the biocenosis of the Beloosipovo mercury deposit. The mercury content did not exceed the maximum allowable concentration of 0.03 mg/kg at different temperature conditions. At room temperature storage, the change in the mercury content in muscle tissue was twice as fast as in the frozen samples. Heat treatment decreased the concentration of mercury by 22–25%.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References

1. Sergeeva IYu, Rainik VS, Markov AS, Vechtomova EA. Beverage composition for preventive nutrition: theoretical approach. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(3):356–366. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-356-366>.
2. Kocman D, Horvat M, Kotnik J. Mercury fractionation in contaminated soils from the Idrija mercury mine region. *Journal of Environmental Monitoring*. 2004;6(8):696–703. <https://doi.org/10.1039/b403625e>.
3. Zagury GJ, Neculita C-M, Bastien C, Deschênes L. Mercury fractionation, bioavailability, and ecotoxicity in highly contaminated soils from chlor-alkali plants. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2006;25(4):1138–1147. <https://doi.org/10.1897/05-302R.1>.
4. Wang D, Shi X, Wei S. Accumulation and transformation of atmospheric mercury in soil. *Science of the Total Environment*. 2003;304(1–3):209–214. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00569-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00569-7).
5. Vol'fson FI, Druzhinin AV. Glavneyshie tipy rudnykh mestorozhdeniy [The main types of ore deposits]. Moscow: Nedra; 1975. 391 p. (In Russ.).
6. Laperdina TG. Mercury determination in natural waters. Novosibirsk: Nauka; 2000. 222 p. (In Russ.).
7. Udodenko YuG, Devyatova TA, Gremyachih VA, Komov VT, Tregubov OV. The mercury maintenance in soils of different biotops of the Voronezh reserve. *Regional Environmental Issues*. 2011;(4):105–110. (In Russ.).
8. Udodenko YuG, Devyatova TA, Komov VT, Tregubov OV, Odintsov AN. Mercury concentration in soil and earthworm (*Oligochaeta, Lumbricidae*) of Voronezh state reserve. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2012;(2):209–214. (In Russ.).
9. Gladyshev VP, Levitskaya SA, Filippova LM. Analiticheskaya khimiya rtuti [Analytical chemistry of mercury]. Moscow: Nauka; 1974. 228 p. (In Russ.).
10. Swain EB, Jakus PM, Rice G, Lupi F, Maxson PA, Pacyna JM. Socioeconomic consequences of mercury use and pollution. *Ambio*. 2007;36(1):45–61. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[45:SCOMUA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[45:SCOMUA]2.0.CO;2)
11. Laperdina TG. Opredelenie form rtuti v ob"ektakh okruzhayushchey sredy [Determination of forms of mercury in environmental objects]. *Rtut'. Problemy geokhimii, ehkologii, analitiki: sbornik nauchnykh trudov* [Mercury: geochemistry, ecology, and analytics: collection of research papers]. Moscow: IMGREH; 2005. p. 62–97. (In Russ.).
12. Granovskiy EhI, Khasenova SK, Darishcheva AM. Zagryaznenie rtut'yu okruzhayushchey sredy i metody demerkurizatsii [Mercury Contamination and demerculization techniques]. Almaty: Kazgos INTI; 2001. 98 p. (In Russ.).
13. Pacyna EG, Pacyna JM, Steenhuisen F, Wilson S. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000. *Atmospheric Environment*. 2006;40(22):4048–4063. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.041>.
14. Ebinghaus R, Tripathi RM, Walischlager D, Lindberg SE. Natural and anthropogenic mercury sources and their impact on the air surface exchange of mercury on regional and global scales. In: Ebinghaus R, Turner RR, de Lacerda LD, Vasiliev O, Salomons W, editors. *Mercury contaminated sites*. Berlin, Heidelberg: Springer; 1999. pp. 3–50. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03754-6_1.
15. Majlesi M, Malekzadeh J, Berizi E, Toori MA. Heavy metal content in farmed rainbow trout in relation to aquaculture area and feed pellets. *Foods and Raw Materials*. 2019;7(2):329–338. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-329-338>.
16. Yudovich YaE, Ketris MP. Mercury in coal as a serious environmental problem. *Biosfera*. 2009;1(2):237–247. (In Russ.).
17. Bloom N. Determination of picogram levels of methylmercury by aqueous phase methylation, followed by cryogenic gas chromatography with cold vapor atomic fluorescence detection. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1989;46(7):1131–1140. <https://doi.org/10.1139/f89-147>.
18. Burbacher TM, Rodier PM, Weiss B. Methylmercury developmental neurotoxicity: A comparison of effects in humans and animals. *Neurotoxicology and Teratology*. 1990;12(3):191–202. [https://doi.org/10.1016/0892-0362\(90\)90091-P](https://doi.org/10.1016/0892-0362(90)90091-P).
19. Prosekov AYU. Hydro power plant “Krapivinsky”: current state and possible risks. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2021;(56):54–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2021-56-54-63>.
20. Stein ED, Cohen Y, Winer AM. Environmental distribution and transformation of mercury compounds. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 1996;26(1):1–43. <https://doi.org/10.1080/10643389609388485>.
21. Cristol DA, Brasso RL, Condon AM, Fovargue RE, Friedman SL, Hallinger KK, et al. The movement of aquatic mercury through terrestrial food webs. *Science*. 2008;320(5874):320–335. <https://doi.org/10.1126/science.1154082>.
22. Alekhina NN, Ponomareva EI, Zharkova IM, Grebenshchikov AV. Assessment of functional properties and safety indicators of amaranth flour grain bread. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(2):323–332. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-323-332>.

23. Ermakov VV. Biogennaya migratsiya i detoksikatsiya rtuti [Biogenic migration and detoxification of mercury]. Rtut' v biosfere: ehkologo-geokhimicheskie aspekty: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects: Proceedings of the international symposium]. Moscow: GEOKHI RAN; 2010. p. 5–12. (In Russ.).
24. Prosekov AYU, Domracheva AI. Characteristics of the level of salinity and hunting resources in the Kemerovo region. AgroEcoInfo. 2021;43(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.51419/20211116>.
25. Prosekov AYU. Effect of forest coverage on the dynamics of elk population in some areas of Kuzbass. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. 2020;6(3):163–178. (In Russ.). <https://doi.org/10.37279/2413-1725-2020-6-3-163-178>.
26. Prosekov AYU, Boyko EV. Interrelation of forest biotopes and ungulates of Kuzbass. Use and Protection of Natural Resources of Russia. 2021;165(1):40–43. (In Russ.).
27. Skalon NV, Stepanov PG, Prosekov AYU. Number dynamics of the moose, wolf, and bear in the Kemerovo region from the second half of the 20th century to the beginning of the 21st century. Herald of Tver State University. Series: Biology and Ecology. 2020;57(1):128–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.26456/vtbio135>.
28. Prosekov AYU, Kagan ES, Meshechkin VV. A predictive model of population dynamics of elk in Kemerovo region. The Herald of Game Management. 2020;17(2):100–106. (In Russ.).
29. Shabrov FA. On using data of state forest inventory while assessing productivity of forest hunting ground lands for nutrition of elk (*Alces alces* L.). Vestnik of Kostroma State University. 2014;20(7):79–81. (In Russ.).
30. Komov VT. Soderzhanie rtuti v organakh i tkanyakh ryb, ptits i mlekopitayushchikh evropeyskoy chasti Rossii [Mercury content in the organs and tissues of fish, birds, and mammals of European Russia]. Rtut' v biosfere: ehkologo-geokhimicheskie aspekty: Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects: Proceedings of the international symposium]. Moscow: GEOKHI RAN; 2010. p. 14–18. (In Russ.).
31. Gorbunov AV, Lyapunov SM, Okina OI, Sheshukov VS. Intake assessment of small doses of mercury in the human body with food. Human Ecology. 2017;(10):16–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2017-10-16-20>.
32. Antonenko VV. Otsenka kontaminatsii pishchevykh produktov, proizvedennykh i potrebyaemykh v Kurskoy oblasti [Assessment of contamination of foods produced and consumed in the Kursk region]. Molodezhnaya nauka i sovremennost': materialy 85-oy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov i molodykh uchennykh, posvyashchennoy 85-letiyu KGMU [Youth Science and Modernity: Proceedings of the 85th International research conference of students and young scientists dedicated to the 85th anniversary of Kursk State Medical University]; 2020; Kursk. Kursk: Kursk State Medical University; 2020. p. 309–312. (In Russ.).
33. Tutel'yan V.A. Novye riski i ugrozy v oblasti obespecheniya bezopasnosti pishchevoy produktsii [New risks and threats in the field of food safety]. Meat Technology. 2021;222(6):6–13. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-664-673>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Биотехнологические аспекты подготовки ферментированных сливок для обогащения творожного продукта пробиотическими культурами



А. Г. Бухарев¹, Н. Б. Гаврилова¹,
О. В. Кригер^{2,*}, Н. Л. Чернопольская¹

¹ Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина^{ROR}, Омск, Россия

² Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта^{ROR}, Калининград, Россия

Поступила в редакцию: 26.07.2021

Принята после рецензирования: 20.09.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: olgakruger58@mail.ru

© А. Г. Бухарев, Н. Б. Гаврилова, О. В. Кригер, Н. Л. Чернопольская, 2021

Аннотация.

Введение. Увеличение объемов производства высококачественных и биологически полноценных белковых продуктов является актуальным. Особый интерес представляют продукты для специализированного питания из-за развития в России рынка Фуднет. Цель исследования – разработка биотехнологии творожного продукта, обогащенного пробиотической микрофлорой, для специализированного (спортивного) питания.

Объекты и методы исследования. Молоко коровье, молоко обезжиренное, сливки и ингредиенты: концентрат сывороточных белков Milkiland-WPC 80, цветочная пыльца, глутамин, закваски DVS Danisco Probat 576 и Howaru Bifido ARO-1, а также зерновые культуры (крупа гречневая и овсяная). Применялись физико-химические, органолептические, биохимические и микробиологические методы исследования.

Результаты и их обсуждение. Молочно-белковая основа творожного продукта производилась отдельным способом с помощью творожного сепаратора GEA Westfalia KDB 30. Для ее обогащения пробиотическими культурами исследовали процесс ферментации сливок с м.д.ж. 15 и 20 % двумя видовыми заквасками. Активность пробиотической заквасочной культуры Probat 576 Howaru Bifido выше, чем закваска ARO-1 Howaru Bifido: при использовании сливок с м.д.ж. 15 % в 1,66 раза, 20 % – в 1,73 раза. Выход активной кислотности на критический предел, равный 5,5, произошел за 3 ч при использовании Probat 576, что на 2 ч быстрее, чем у заквасочной культуры ARO-1. В качестве пребиотика изучены зерновые культуры. Результаты математического моделирования свидетельствуют о положительном влиянии гречневой и овсяной муки на процесс ферментации сливок. Овсяная мука наиболее подходящий компонент, т. к. при добавлении гречневой муки повышается окрас продукта, свойственный ее цвету. Это неблагоприятно скажется на визуальном ощущении потребителя. Оптимальная доза внесения овсяной муки должна быть равна 5 %.

Выводы. Разработана биотехнология нового творожного продукта, обогащенного пробиотическими культурами, направленная на расширение ассортимента продуктов для специализированного (спортивного) питания.

Ключевые слова. Молоко, сывороточный белок, ферменты, закваска, зерно, спортивное питание, пребиотик, функциональные ингредиенты

Финансирование. Научная работа выполнялась в рамках государственного заказа Министерства сельского хозяйства Российской Федерации^{ROR} «Разработка высокоэффективных технологий переработки сельскохозяйственной продукции в экологически чистые функциональные продукты детского и спортивного питания».

Для цитирования: Биотехнологические аспекты подготовки ферментированных сливок для обогащения творожного продукта пробиотическими культурами / А. Г. Бухарев [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 664–673. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-664-673>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Fermented Cream for Curd Fortified with Probiotic Cultures: Biotechnological Aspects

Andrew G. Bukharev¹, Natalya B. Gavrilova¹,
Olga V. Kriger^{2,*}, Natalya L. Chernopolskaya¹

¹ P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University^{ROR}, Omsk, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University^{ROR}, Kaliningrad, Russia

Received: July 26, 2021

Accepted in revised form: September 20, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: olgakruger58@mail.ru

© A.G. Bukharev, N.B. Gavrilova, O.V. Kriger, N.L. Chernopolskaya, 2021

Abstract.

Introduction. Contemporary food industry strives to increase the production volume of high-quality and biologically complete protein products. The Foodnet market also raised the demand for functional foods in Russia. The research objective was to develop a new functional curd product fortified with probiotic microflora.

Study objects and methods. The study featured cow's milk, skimmed milk, cream, whey protein concentrate Milkiland-WPC 80, pollen, glutamine, starter cultures DVS Danisco Probat 576 and Howaru Bifido ARO-1, buckwheat flour, and oat flour. The experiment included physicochemical, sensory, biochemical, and microbiological methods.

Results and discussion. The milk-protein base of the curd product was produced in a GEA Westfalia KDB 30 curd separator. The research involved 15 and 20% cream with two different starter cultures. In case of 15% cream, Probat 576 Howaru Bifido appeared to be 1.66 times more active than ARO-1 Howaru Bifido, in case of 20% cream the result was even higher – 1.73 times. Probat 576 also demonstrated a better active acidity, i.e. 5.5 after three hours, which was two hours faster than ARO-1. Mathematical modeling revealed the positive effect of buckwheat and oat flour on the cream fermentation process. Oat flour (5%) was the optimal prebiotic, while buckwheat flour added its color to the final product, thus spoiling its market quality.

Conclusion. The new biotechnology for a curd product fortified with probiotic cultures can expand the range of functional products for sports diet.

Keywords. Milk, whey protein, enzymes, starter culture, grain, sports nutrition, prebiotic, functional ingredients

Funding. The present research was ordered by the Ministry of Agriculture of the Russian Federation^{ROR} as part of project “Development of highly effective technologies for processing agricultural products into environmentally friendly functional products for children and sports nutrition”.

For citation: Bukharev AG, Gavrilova NB, Kriger OV, Chernopolskaya NL. Fermented Cream for Curd Fortified with Probiotic Cultures: Biotechnological Aspects. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):664–673. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-664-673>.

Введение

В настоящее время здоровый образ жизни – это общемировой тренд, который обусловлен комплексом социальных, экологических и других факторов, имеющих определенные особенности в каждой стране. 70 % населения в мире и 67 % в России активно следят за своим рационом питания. Популярными и востребуемыми являются продукты здорового питания, к которым относятся специализированные пищевые продукты. Это продукты с заданными потребительскими свойствами, предназначенные для различных категорий населения [1–3].

В России существует тенденция роста числа лиц, занимающихся спортом, что подтверждают данные Росстата. В федеральном проекте «Спорт – норма жизни», который стартовал 1 января 2019 г., отмечено, что физической культурой и спортом занимаются 50,1 млн человек, что составляет 36,8 % населения Российской Федерации. Благодаря государственной поддержке и созданию условий для всех категорий населения, а также лиц, занимающихся профессиональным и любительским спортом, возможно увеличение к 2030 г. количества регулярно

занимающихся спортом до 70 %. В связи с этим следует ожидать резкого повышения спроса населения всех возрастных групп на спортивное питание.

Разработка ассортимента и технологии продуктов для питания спортсменов производится в соответствии с Концепцией спортивного питания Российской Федерации и межгосударственным стандартом ГОСТ 34006-2016 [4].

В странах Европейского союза, Канады, Австралии, Королевства Норвегии и многих других, как и в России, наблюдается перспективное направление – поддержание здорового образа жизни. Это понятие комплексное, в которое входят регулярные занятия физическими упражнениями или любительским и профессиональным спортом, а также здоровое питание. В связи с этим как в России, так и в странах Западной Европы активно развивается процесс научного обоснования и практического создания принципиально нового поколения продуктов здорового питания на молочной основе, обогащенных функциональными ингредиентами. Их основными характеристиками являются: сбалансированный состав, пониженное содержание

жира и легкоусвояемых углеводов, высокое содержание белка, а также пробиотические свойства. Благодаря современным биотехнологическим приемам в комплексе с традиционными методами пищевой технологии можно создавать уникальные по своему составу и свойствам ферментированные молочные и молочносодержащие продукты с контролируемым химическим составом и заданными физиолого-биохимическими свойствами, которые предназначены для специализированного питания [5–7].

Основные направления в производстве продуктов спортивного питания, которые изучаются зарубежными и российскими учеными:

- регулирование состава;
- разработка новых групп пищевых продуктов для индивидуализации спортивного питания в различные периоды тренировочного макроцикла;
- создание функциональных продуктов на молочной основе для питания спортсменов разных квалификаций;
- разработка мелкофасованной продукции в виде порций разового потребления и др. [8–14].

Таким образом, есть все основания для того, чтобы рассматривать молоко и молочные продукты с точки зрения спортивного питания. В настоящее время рынок молочных продуктов специального назначения для питания спортсменов не насыщен. Необходимы разработка и внедрение в практику отечественных специализированных продуктов различной ориентации: высокобелковых, высоко-углеводных, углеводно-минеральных и др. Эти продукты должны отвечать не только вкусу спортсменов, но и современным медико-биологическим требованиям: регулировать массу тела спортсменов, повышать работоспособность во время соревнований, при усиленных тренировках и пр. [15–17].

Проблема увеличения объемов производства высококачественных и биологически полноценных белковых продуктов питания (творог и творожные продукты, сыры и сырные продукты) в настоящее время актуальна, в том числе для специализированного (спортивного) питания. Это связано с развитием в России ключевого сегмента рынка FoodNet (Фуднет) – индивидуального персонализированного питания.

Цель исследования – разработка биотехнологии творожного продукта, обогащенного пробиотической микрофлорой для специализированного (спортивного) питания.

Объекты и методы исследования

Для подготовки молочно-белковой основы, рецептуры творожного продукта и пробиотических культур использовались следующие объекты исследования:

- молоко коровье сырое по ГОСТ 31449-2013;
- молоко обезжиренное-сырье по ГОСТ 31658-2012;
- сливки-сырье по ГОСТ 34355-2017;

– функциональные ингредиенты:

- 1) концентрат сывороточных белков Milkiland-WPC 80 по ГОСТ 53456-2009;
 - 2) цветочная пыльца по ГОСТ 28887-90;
 - 3) глутамин по ГОСТ 33933-2016;
- закваска DVS Danisco Probat 576; ARO-1.
– закваска DVS Danisco Howaru Bifido;
– зерновые культуры:
- 1) крупа гречневая по ГОСТ Р 55290-2012;
 - 2) крупа овсяная по ГОСТ 3032-75.

В научной работе применялись современные методы исследований: физико-химические, органолептические, биохимические и микробиологические. Они реализовались в производственных лабораториях АО «Данон Россия» филиал Молочный комбинат «Чеховский» и испытательной лаборатории «Молоко» Минобрнауки России ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (г. Москва).

Результаты экспериментальных исследований подвергали статистической обработке методами регрессионного и корреляционного анализа, реализованного с помощью стандартных пакетов программ MathCAD-14 Professional и MS Excel. Повторность опытов установлена методами статистического анализа и являлась пятикратной [18].

Выбор оптимальных экспериментальных вариантов осуществляли методом нормирования. Математическое моделирование и определение трехфакторных зависимостей результатов исследований проводилось с использованием современного программного обеспечения Table Curve 3D [19, 20].

Результаты и их обсуждение

Молочно-белковая основа для творожного продукта производилась отдельным способом с применением творожного сепаратора GEA Westfalia KDB 30. Для этого цельное молоко подогревали до 45 ± 5 °C и разделяли сепарированием на обезжиренное молоко и сливки с массовой долей жира 15 и 20 %, которые пастеризовали на различных пастеризационных установках. Технологический процесс позволил увеличить выход нежирной молочно-белковой основы с нежной, однородной и слегка мажущейся консистенцией, а также снизить отход белков в молочную сыворотку.

Далее был исследован процесс ферментации сливок закваской с пробиотическими культурами. Во время экспериментов было произведено четыре опытных выработки ферментированных сливок с м.д.ж. 15 и 20 % с использованием двух видов заквасок Probat 576 и ARO-1. В состав закваски Probat 576 входят следующие штаммы микроорганизмов: *Lactobacillus acidophilus*, *Lactococcus lactis*, *Lactococcus cremoris*, *Lactococcus biovar diacetylactis*, *Leuconostoc mesenteroides cremoris*. Основными штаммами микроорганизмов закваски ARO-1 являются

Таблица 1. Физико-химические показатели сливок с м.д.ж. 15 и 20 %

Table 1. Physicochemical parameters of 15 and 20% cream

Опыт	Массовая доля, %			Титруемая кислотность, °Т	Группа термостойкости	Группа чистоты	Ингибирующие вещества	Плотность, кг/м ³
	Белка	Жиры	СОМО					
№ 1	2,47 ± 0,10	20,0 ± 0,1	28,13 ± 0,10	16	4	1	отсут.	1,013
№ 2	2,57 ± 0,10	20,1 ± 0,1	26,56 ± 0,10	16	4	1	отсут.	1,012
№ 3	2,85 ± 0,10	15,0 ± 0,1	22,75 ± 0,10	16	4	1	отсут.	1,019
№ 4	2,70 ± 0,10	15,0 ± 0,1	21,80 ± 0,10	15	4	1	отсут.	1,020

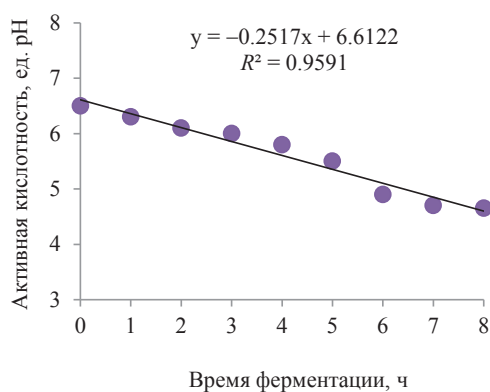


Рисунок 1. Ферментация сливок с м.д.ж.15 % заквасочной культурой ARO-1 Howaru Bifido

Figure 1. Howaru Bifido fermentation of 15% cream with ARO-1

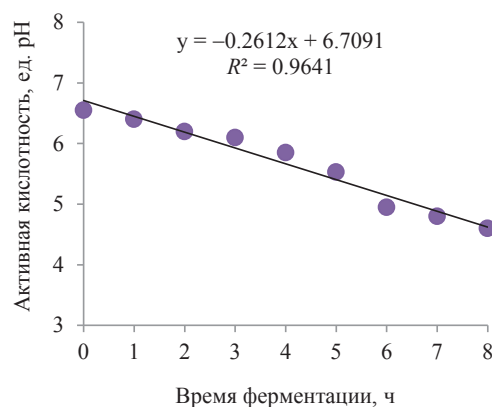


Рисунок 2. Ферментация сливок с м.д.ж. 20 % заквасочной культурой ARO-1 Howaru Bifido

Figure 2. Howaru Bifido fermentation of 20% cream with ARO-1

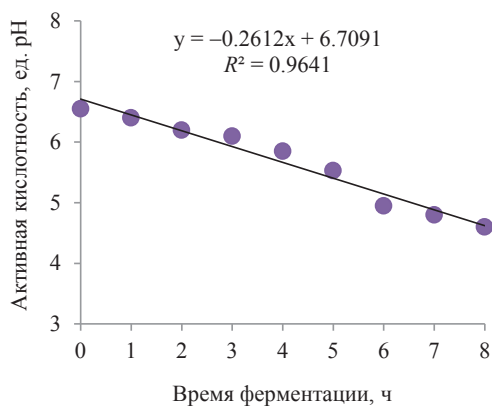


Рисунок 3. Ферментация сливок с м.д.ж. 15 % заквасочной культурой Probat 576 Howaru Bifido

Figure 3. Howaru Bifido fermentation of 15% cream with Probat 576

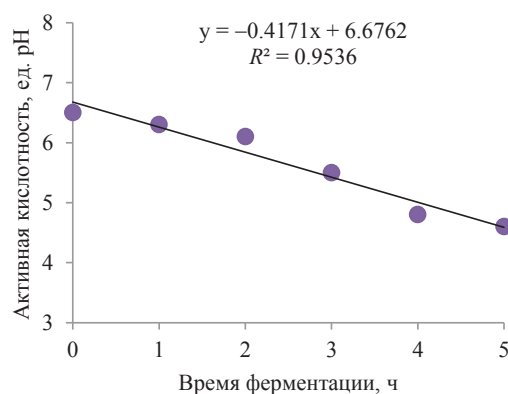


Рисунок 4. Ферментация сливок с м.д.ж. 20 % заквасочной культурой Probat 576 Howaru Bifido

Figure 4. Howaru Bifido fermentation of 20% cream with Probat 576

Streptococcus thermophilus и *Lactobacillus bulgaricus*. К обоим закваскам добавлялась культура Howaru Bifido, включающая в себя штамм микроорганизмов *Bifidobacterium lactis*, для обогащения продукта пробиотическими свойствами и повышения биологической ценности продукта.

Критериальными требованиями изучения процесса ферментации сливок являлись: время, активная кислотность ($\text{pH} = 4,6 \pm 0,5$), чистый сливочный вкус

и слабовязкая консистенция, позволяющая достичь их равномерного распределения в обезжиренном твороге.

Физико-химические показатели сливок, используемых в опытных выработках, приведены в таблице 1.

На рисунках 1–4 приведены графическая иллюстрация и уравнения регрессии, характеризующие динамику кислотонакопления в процессе ферментации

Таблица 2. Органолептические показатели ферментированных сливок

Table 2. Sensory profile of fermented cream

Опыт	Вид сливок	Закваска	Органолептические показатели в баллах
№ 1	Сливки с м.д.ж. 20 %	Probat 576 + Howaru Bifido	15,0
№ 2	Сливки с м.д.ж. 20 %	ARO-1 + Howaru Bifido	14,5
№ 3	Сливки с м.д.ж. 15 %	Probat 576 + Howaru Bifido	14,0
№ 4	Сливки с м.д.ж. 15 %	ARO-1 + Howaru Bifido	13,8

сливок с м.д.ж. 15 и 20 % заквасочными культурами Probat 576 и ARO-1.

Результаты свидетельствуют о том, что активность пробиотической заквасочной культуры Probat 576 Howaru Bifido выше, чем ARO-1 Howaru Bifido: при использовании сливок с м.д.ж. 15 % в 0,4171/0,2517 = 1,66 раза, 20 % в 0,4529/0,2612 = 1,73 раза.

Скорость кислотонакопления с закваской Probat 576 при использовании сливок с м.д.ж. 15 % равна 0,4171 ед. pH/час, 20 % – 0,4529 ед. pH/час. Скорость кислотонакопления с закваской ARO-1 при использовании сливок с м.д.ж. 15 % равна 0,2517 ед. pH/час, 20 % – 0,2612 ед. pH/час.

Анализ полученных данных позволяет считать, что использование заквасочной культуры Probat-576 предпочтительнее, чем ARO-1. При использовании заквасочной культуры Probat-576 время ферментации сливок с м.д.ж. 15 и 20 % заняло 5,1 ч, тогда как при использовании заквасочной культуры ARO-1 на три часа дольше. Выход активной кислотности на критический предел, равный 5,5, произошел за 3 ч при использовании заквасочной культуры Probat-576. Это на 2 ч быстрее, чем у заквасочной культуры ARO-1.

Оценка органолептических показателей ферментированных сливок с м.д.ж. 15 % позволяет отметить их жидкообразную консистенцию, чистый кисломолочный вкус без посторонних привкусов и запахов, цвет белый с кремовым оттенком, равномерный по всей массе. Сливки с м.д.ж. 20 % – слабовязкая, устойчивая консистенция, отсутствие посторонних привкусов и запахов, вкус чистый кисломолочный, цвет белый с кремовым оттенком, равномерный по всей массе. Общая сумма органолептических показателей в баллах представлена в таблице 2.

В качестве пребиотиков, стимулирующих жизнедеятельность пробиотиков из-за их химического состава и пищевой ценности, исследованы два растительных зерновых компонента: гречневая и овсяная крупы. Их характеристика приведена в таблице 3. Зерновые культуры подвергались тонкому измельчению, т. к. в виде муки они хорошо растворяются.

Затем было изучено влияние пребиотических свойств зерновых культур на жизнеспособность

пробиотиков, входящих в закваски. В сливки с м.д.ж. 20 % вводили при тщательном перемешивании муку гречневой и овсяной культуры в количестве 1, 3, 5 и 7 %. В сливки инокулировали закваски. Процесс ферментации сливок осуществляли при температуре $38,0 \pm 1,0$ °C. Результаты исследования микробиологических показателей ферментированных сливок представлены на рисунках 5 и 6.

Для прогнозирования процесса развития пробиотической микрофлоры и выявления взаимоотношений между управляемыми факторами были разработаны двухфакторные математические модели, характеризующие процесс ферментации сливок с различным содержанием пребиотиков. Приведено их трехмерное изображение. При разработке двухфакторных математических моделей использовалась компьютерная программа Table Curve 3D v4. Анализ подвергались экспериментальные данные, приведенные в Excel. Результаты исследований и математические модели представлены на рисунках 7–10.

Анализ результатов математического моделирования свидетельствует о положительном влиянии как гречневой, так и овсяной муки на процесс ферментации сливок. Все исследуемые показатели

Таблица 3. Химический состав и пищевая ценность растительных ингредиентов (100 г)

Table 3. Chemical composition and nutritional value of buckwheat and oat flours (100 g)

Показатель	Значение для муки	
	Гречневой	Овсяной
Пищевая ценность, ккал	328,50	369,00
Массовая доля, %		
жиры	3,30	6,80
белки	12,60	13,00
углеводы	62,10	64,90
влаги, не более	9,00	9,00
Пищевые волокна, %	2,80	4,50
Зола, %	2,50	1,80
Моно- и дисахариды, %	2,60	1,00
Насыщенные жирные кислоты, %	0,68	1,10
Крахмал, %	–	63,50



Рисунок 5. Исследование влияния гречневой муки на динамику развития пробиотиков, входящих в состав заквасок Probat 576 и Howaru Bifido, используемых для ферментации сливок с м.д.ж. 20 %

Figure 5. Effect of buckwheat flour on the development of probiotics in Probat 576 and Howaru Bifido (20% cream)



Рисунок 6. Исследование влияния овсяной муки на динамику развития пробиотиков, входящих в состав заквасок Probat 576 и Howaru Bifido, используемых для ферментации сливок с м.д.ж. 20 %

Figure 6. Effect of oat flour on the development of probiotics in Probat 576 and Howaru Bifido (20% cream)

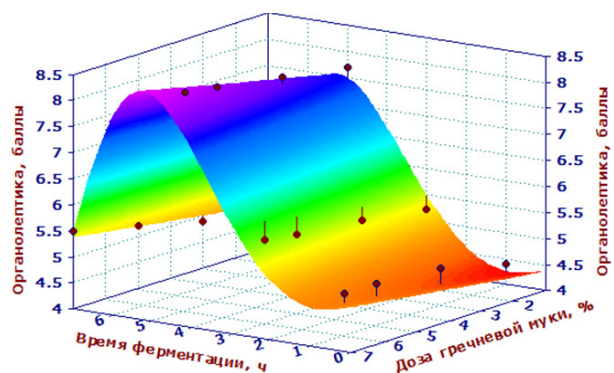


Рисунок 7. Поверхность отклика изменения органолептических показателей в ферментированных сливках с гречневой мукой

Figure 7. Response surface of changes in sensory profile in fermented cream with buckwheat flour

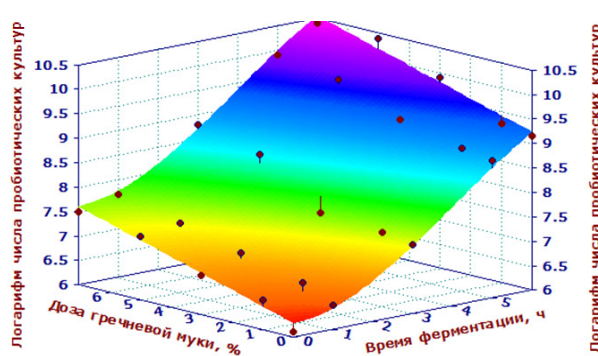


Рисунок 8. Поверхность отклика изменения логарифма общего числа пробиотических культур в ферментированных сливках с гречневой мукой

Figure 8. Response surface of the change in the logarithm of the total number of probiotic cultures in fermented cream with buckwheat flour

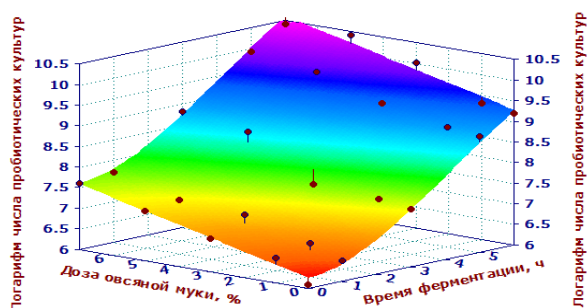


Рисунок 9. Поверхность отклика изменения логарифма числа пробиотических культур в ферментированных сливках с овсяной мукой

Figure 9. Response surface of the change in the logarithm of the number of probiotic cultures in fermented cream with oat flour

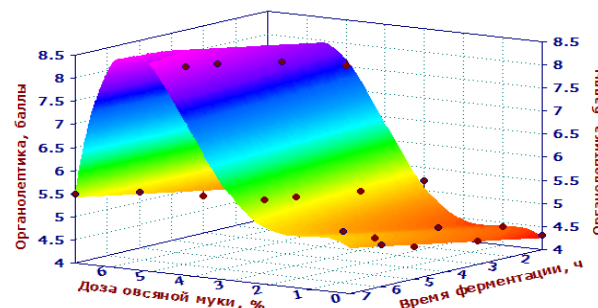


Рисунок 10. Поверхность отклика изменения органолептических показателей в процессе ферментации сливок с овсяной мукой

Figure 10. Response surface of changes in sensory profile during fermentation of cream with oat flour

Таблица 4. Рецепттура нового вида творожного продукта для специализированного (спортивного) питания на 100 кг

Table 4. Formulation for a new functional curd product for sports diet, per 100 kg

Показатели	Рецептура, кг
Творог нежирный	79,7
Сливки ферментированные с м.д.ж. 15 %	6,0
Концентрат сывороточных белков	13,0
Глутамин	0,25
Овсяная мука	0,3
Цветочная пыльца	0,25
Закваска Probat 576	0,25
Закваска HowaruBifido	0,25
Итого	100

с увеличением дозы внесения компонентов возрастали. Однако органолептическая оценка показала, что овсяная мука наиболее подходящий компонент, т. к. при добавлении гречневой муки повышается окрас продукта свойственный ее цвету, что неблагоприятно скажется на визуальном ощущении потребителя. Следует отметить, что оптимальная доза внесения овсяной муки должна быть равна 5 %, т. к. дальнейшее увеличение приводит к снижению балльной экспертной оценки. По мнению экспертов, данное снижение вызвано высокой влагопоглощающей способностью овсяной муки и изменением реологических свойств исследуемого продукта.

В процессе исследования для подбора оптимального состава и содержания функциональных компонентов в готовой продукции была разработана рецепттура творожного продукта (табл. 4).

После проведения опытных выработок по заданной рецептуре были получены физико-химические, микробиологические и органолептические показатели. Физико-химические показатели творожного продукта представлены в таблице 5.

Выводы

1. Изучен процесс подготовки ферментированных сливок, определена массовая доля жира сливок и вид заквасочных культур для ферментации: сливки с

Таблица 5. Химический состав творожного продукта для специализированного (спортивного) питания

Table 5. Chemical composition of curd product for specialized (sports) nutrition

Показатели	Рецептура
Массовая доля, %	
Влага, мас%	75,6
Белки, мас%	17,9
Жир, мас%	1,5
Углеводы, мас%	5,0

м.д.ж 20 % Probat 576 и Howaru Bifido в соотношении 1,0:1,0. Общее количество пробиотических микроорганизмов составило не менее $4,5 \times 10^9$ КОЕ/г, в том числе бифидобактерий не менее $1,5 \times 10^7$ КОЕ/г.

2. Определена степень влияния зерновых культур на процесс ферментации сливок. На основе математического моделирования установлено, что овсяная мука в количестве 5,0 % от общего содержания сливок в творожном продукте благоприятно влияет на развитие пробиотических микроорганизмов и рекомендуется для использования в качестве пребиотика.

3. Разработана биотехнология нового вида творожного продукта «Сила спортсмена» для специализированного (спортивного) питания. Проведена промышленная апробация биотехнологии нового продукта на молочном предприятии АО «Данон Россия» филиал «Чеховский» (Московская область). Научная новизна биотехнологии творожного продукта отражена в патенте на изобретение РФ № 2728442.

Критерии авторства

А. Г. Бухарев – проведение экспериментальных исследований. Н. Б. Гаврилова – разработка концепции исследований. О. В. Кригер – анализ экспериментальных данных. Н. Л. Чернопольская – математический анализ и выводы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Таблица 6. Результаты исследований количества пробиотических микроорганизмов на конец испытания в процессе хранения творожного продукта

Table 6. Total count of probiotic microorganisms during storage

Исследуемый показатель	НД на метод исследования	Целевое значение	Фактический результат
Общее количество пробиотических микроорганизмов, КОЕ/г, не менее, в том числе:	ГОСТ 32923-2014	Не менее 2×10^9	$4,5 \times 10^9$
<i>L. acidophilus</i> , КОЕ/г, не менее	ГОСТ 32923-2014	Не менее 1×10^8	$2,5 \times 10^8$
<i>B. lactis</i> , КОЕ/г, не менее		Не менее 1×10^6	$1,5 \times 10^7$

Contribution

A.G. Bukharev was responsible for the experimental research. N.B. Gavrilova developed the research concept. O.V. Kriger analyzed the experimental data. N.L. Chernopolskaya

performed the mathematical analysis and made the conclusions.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Список литературы

1. Филиппова О. Н., Рахманов Р. С. Оценка связи между работоспособностью спортсменов и витаминно-минеральной насыщенностью организма // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6.
2. Гаврилова Н. Б., Щетинин М. П., Молибога Е. А. Современное состояние и перспективы развития производства специализированных продуктов для питания спортсменов // *Вопросы питания*. 2017. Т. 86. № 2. С. 100–106.
3. Захарова Л. М., Горбунчикова М. С. Технологические особенности производства синбиотического кисломолочного продукта // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51. № 1. С. 17–28. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-17-28>.
4. Гаврилова Н. Б., Чернопольская Н. Л., Бухарев А. Г. Творожный продукт для специализированного (спортивного) питания // *Молочная промышленность*. 2020. № 12. С. 14–16.
5. Эффективность использования аминокислот с разветвленной цепью (BCAA) в питании спортсменов-единоборцев / Э. Н. Трушина [и др.] // *Вопросы питания*. 2019. Т. 88. № 4. С. 48–56. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10041>.
6. Gavrilova N., Chernopolskaya N., Kononov S. Substantiated screening of functional ingredients for extended shelf life of fermented milk products. Proceedings of the International Scientific Conference: The Fifth Technological Order: Prospects for the Development and Modernization of the Russian Agro-Industrial Sector. Omsk, 2019. P. 9–12. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.200113.128>.
7. Гаврилова Н. Б., Щетинин М. П., Чернопольская Н. Л. Научно-экспериментальное обоснование рецептуры специализированного продукта для питания спортсменов, обогащенного пробиотическими микроорганизмами // *Вопросы питания*. 2017. Т. 86. № 5. С. 22–28.
8. Valenta R., Dorofeeva Yu. A. Sport nutrition: The role of macronutrients and minerals in endurance exercises // *Foods and Raw Materials*. 2018. Vol. 6. № 2. P. 403–412. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-2-403-412>.
9. What drives athletes toward dietary supplement use: objective knowledge self-perceived competence? Cross-sectional analysis of professional team-sport players from Southeastern Europe during the competitive season / D. Sekulic [et al.] // *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019. Vol. 16. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0292-9>
10. Chappell A., Simper T., Helms E. Nutritional strategies of British professional and amateur natural bodybuilders during competition preparation // *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019. Vol. 16. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0302-y>.
11. Modifications to the nutrition for sport knowledge questionnaire (NSQK) and abridged nutrition for sport knowledge questionnaire (ANSQK) / G. L. Trakman [et al.] // *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019. Vol. 16. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0293-8>.
12. Comparison of ingesting a food bar containing whey protein and isomalto-oligosaccharides to carbohydrate on performance and recovery from an acute bout of resistance-exercise and sprint conditioning: An open label, randomized, counterbalanced, crossover pilot study / T. J. Grubic [et al.] // *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019. Vol. 16. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0301-z>.
13. The combination of sport and sport-specific diet is associated with characteristics of gut microbiota: An observational study / L.-G. Jang [et al.] // *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019. Vol. 16. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0290-y>.
14. Impact of cow's milk intake on exercise performance and recovery of muscle function: A systematic review / J. M. A. Alcantara [et al.] // *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019. Vol. 16. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0288-5>.
15. Biotechnology of specialized product for sports nutrition / N. Chernopolskaya [et al.] // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019. Vol. 8. № 4. P. 40–45.
16. Кисломолочные продукты как составляющая функционального питания / З. С. Зобкова [и др.] // *Молочная промышленность*. 2019. № 2. С. 44–46.
17. Чернопольская Н. Л., Гаврилова Н. Б. Биотехнология специализированного пищевого продукта на основе молока для питания спортсменов // *Пищевая промышленность*. 2019. № 10. С. 20–24. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10140>.

18. Выгодчикова И. Ю. Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 4. С. 105–116.
19. Особенности использования белкового концентрата из зерен овса в технологии получения творожного продукта для спортивного питания / Е. В. Каширских [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49. № 3. С. 345–355. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-345-355>.
20. Лисин П. А., Воронова Т. Д., Молибога Е. А. Методология проектирования продуктов питания с заданными свойствами и составом. Омск: Омский ГАУ, 2015. 142 с.

References

1. Filippova ON, Rakhmanov RS. Evaluation of association between exercise performance of sportsmen and vitamin-minerals saturation of their organisms. *Modern problems of science and education*. 2014;(6). (In Russ.).
2. Gavrilova NB, Shchetinin MP, Moliboga EA. Modern state and prospects of the development of production of specialized foodstuffs for athletes. *Problems of Nutrition*. 2017;86(2):100–106. (In Russ.).
3. Zakharova LM, Gorbunchikova MS. A new synbiotic fermented dairy product: Technological production features. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(1):17–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-17-28>.
4. Gavrilova NB, Chernopolskaya NL, Bukharev AG. Curd product for specialized (sports) nutrition. *Dairy Industry*. 2020;(12):14–16. (In Russ.).
5. Trushina EN, Vybornov VD, Riger NA, Mustafina OK, Solntseva TN, Timonin AN, et al. The efficiency of branched chain aminoacids (BCAA) in the nutrition of combat sport athletes. *Problems of Nutrition*. 2019;88(4):48–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10041>.
6. Gavrilova N, Chernopolskaya N, Konovalov S. Substantiated screening of functional ingredients for extended shelf life of fermented milk products. *Proceedings of the International Scientific Conference: The Fifth Technological Order: Prospects for the Development and Modernization of the Russian Agro-Industrial Sector*; 2019; Omsk. Atlantis Press; 2019. p. 9–12. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.200113.128>.
7. Gavrilova NB, Shchetinin MP, Chernopolskaya NL. Experimental and scientific formulation development of a specialized (sport) product, enriched with probiotic microorganisms. *Problems of Nutrition*. 2017;86(5):22–28. (In Russ.).
8. Valenta R, Dorofeeva YuA. Sport nutrition: The role of macronutrients and minerals in endurance exercises. *Foods and Raw Materials*. 2018;6(2):403–412. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-2-403-412>.
9. Sekulic D, Tahiraj E, Maric D, Olujic D, Bianco A, Zaletel P. What drives athletes toward dietary supplement use: objective knowledge self-perceived competence? Cross-sectional analysis of professional team-sport players from Southeastern Europe during the competitive season. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019;16(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0292-9>.
10. Chappell A, Simper T, Helms E. Nutritional strategies of British professional and amateur natural bodybuilders during competition preparation. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019;16(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0302-y>.
11. Trakman GL, Brown F, Forsyth A, Belski R. Modifications to the nutrition for sport knowledge questionnaire (NSQK) and abridged nutrition for sport knowledge questionnaire (ANSKQ). *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019;16(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0293-8>.
12. Grubic TJ, Sowinski RJ, Nevares BE, Jenkins VM, Williamson SL, Reyes AG, et al. Comparison of ingesting a food bar containing whey protein and isomaltoligosaccharides to carbohydrate on performance and recovery from an acute bout of resistance-exercise and sprint conditioning: An open label, randomized, counterbalanced, crossover pilot study. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019;16(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0301-z>.
13. Jang L-G, Choi G, Kim S-W, Kim B-Y, Lee S, Park H. The combination of sport and sport-specific diet is associated with characteristics of gut microbiota: An observational study. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019;16(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0290-y>.
14. Alcantara JMA, Sanchez-Delgado G, Martinez-Tellez B, Labayen I, Ruiz JR. Impact of cow's milk intake on exercise performance and recovery of muscle function: A systematic review. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2019;16(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0288-5>.
15. Chernopolskaya N, Gavrilova N, Rebezov M, Dolmatova I, Zaitseva T, Somova Yu, et al. Biotechnology of specialized product for sports nutrition. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019;8(4):40–45.
16. Zobkova ZS, Fursova TP, Zenina DV, Gavrilina AD, Shelaginova IR. Fermented milk products as a component of functional nutrition. *Dairy Industry*. 2019;(2):44–46. (In Russ.).
17. Chernopolskaya NL, Gavrilova NB. Biotechnology of specialized food product based on milk for athletes' nutrition. *Food Industry*. 2019;(10):20–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10140>.
18. Vygodchikova IYu. Estimating the parameters of a multiple linear regression model according to the minimax criterion. *Journal of Applied Informatics*. 2015;10(4):105–116. (In Russ.).

19. Kashirskih EV, Babich OO, Kriger OV, Ivanova SA. Oat protein concentrate as part of curd product for sport nutrition. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(3):345–355. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-345-355>.
20. Lisin PA, Voronova TD, Moliboga EA. Metodologiya proektirovaniya produktov pitaniya s zadannymi svoystvami i sostavom [Methodology for designing food products with specified properties and composition]. Omsk: P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University; 2015. 142 p. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-674-689>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Влияние жировых продуктов на качественные характеристики, пищевую ценность и хранимостпособность печенья

**Е. А. Демченко^{ID}, Т. В. Савенкова^{ID}, И. И. Мизинчикова*^{ID}**Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова^{ROR}, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 28.07.2021

Принята после рецензирования: 21.09.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: Mizinchikova.II@rea.ru

© Е. А. Демченко, Т. В. Савенкова, И. И. Мизинчикова, 2021

Аннотация.

Введение. Влияние на качество и пищевую ценность печенья оказывают виды сырья. Цель работы – установление влияния жировых продуктов на качественные характеристики и хранимостпособность печенья.

Объекты и методы исследования. Маргарин, кондитерский жир, заменитель молочного жира, пальмовое масло, масло подсолнечное, масло подсолнечное высокоолеиновое и экспериментальные образцы печенья, приготовленные с их применением. Общепринятые и стандартные методы исследований органолептических, физико-химических и структурно-реологических показателей сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.

Результаты и их обсуждение. Разработаны рецептуры печенья со сбалансированным макрокомпонентным составом. Пищевая ценность 100 г печенья, приготовленного с использованием твердых жировых продуктов: белок – 7,5 г, жир – 17,8 г (в том числе насыщенные жирные кислоты – 9 г), углеводы – 65 г (в том числе добавленные сахара – 18 г), калорийность – 445 ккал. В рецептурах с жидкими растительными маслами увеличено количество сухого молока и добавленных сахаров, вносимых в виде сиропа и патоки. Пищевая ценность 100 г печенья, приготовленного с использованием жидких растительных масел: белок – 7,0 г, жир – 18,0 г (в том числе насыщенные жирные кислоты – 3 г), углеводы – 64,5 г (в том числе добавленные сахара – 20 г), калорийность – 450 ккал. Замена твердых жировых продуктов на жидкие растительные масла позволяет снизить содержание насыщенных жирных кислот с 8–9 до 2–3 г/100 г печенья. При этом возрастает риск окислительной порчи печенья в процессе хранения. Отмечено, что в процессе хранения в течение 207 суток изменение органолептических показателей более выражено в печенье, приготовленном с использованием пальмового масла и кондитерского жира, в сравнении с печеньем, приготовленным с использованием маргарина и заменителя молочного жира.

Выводы. Установленный срок годности печенья с использованием масла подсолнечного и подсолнечного высокоолеинового – 2 месяца; печенья с заменителем молочного жира, маргарином, пальмовым маслом и кондитерским жиром – 6 месяцев. С целью повышения стойкости жидких растительных масел к окислению перспективны исследования по введению различных эмульгаторов и антиоксидантов, способных образовывать связи с белками и крахмальными фракциями муки в процессе приготовления печенья.

Ключевые слова. Печенье, жировые продукты, растительное масло, срок годности, органолептические характеристики, хранение

Для цитирования: Демченко Е. А., Савенкова Т. В., Мизинчикова И. И. Влияние жировых продуктов на качественные характеристики, пищевую ценность и хранимостпособность печенья // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 674–689. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-674-689>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Effects of Oils and Fats on the Quality Characteristics, Nutritional Value, and Storage Capacity of Cookies

**Elena A. Demchenko^{ID}, Tatiana V. Savenkova^{ID},
Inessa I. Mizinchikova*^{ID}**Plekhanov Russian University of Economics^{ROR}, Moscow, Russia

Received: July 28, 2021

Accepted in revised form: September 21, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



Abstract.

Introduction. The quality profile and nutritional values of cookies depend on the raw material. The research objective was to study the effect of oils and fats on the quality characteristics and storage capacity of cookies.

Study objects and methods. The study involved such types of oils and fats as margarine, confectionery fat, milk fat substitute, palm oil, sunflower oil, and high oleic sunflower oil. It was based on standard methods of sensory, physicochemical, structural, and rheological analyses.

Results and discussion. The experimental formulations relied on contemporary dilatory recommendations, consumer acceptability, and traditionality of sensory indicators. The mass fraction of fat was limited to $\leq 18\%$; added sugars – to $\leq 22\%$; salt – to $\leq 0.3\%$. For each type of oil and fat, as set of experiments was performed to define the optimal technological emulsion and dough parameters. Other aspects involved the patterns of moisture transfer, indicators of oxidative spoilage, fatty acid composition, sensory properties, physicochemical and microbiological indicators, storage capacity, etc. The samples with vegetable oils instead of fat had a lower content of saturated fatty acids, which fell from 8–9 to 2–3 g/100 g. However, the risk of oxidative spoilage increased significantly. On storage day 104, the content of linoleic acid in the samples with sunflower oil decreased from 62.0 to 60.4%, while the samples with high oleic sunflower oil maintained the same level of linoleic acid. The samples with confectionery fat and palm oil demonstrated the lowest rate of oxidative processes, while those with margarine and milk fat substitute had the best sensory profile after storage.

Conclusion. The cookies with sunflower oil and high oleic sunflower oil appeared to have a shelf life of two months, while for those with milk fat substitute, margarine, palm oil, and confectionery fat it was six months. Further research should focus on various emulsifiers and antioxidants capable of forming bonds with proteins and starch fractions of flour, which could increase the resistance of liquid vegetable oils to oxidation.

Keywords. Biscuits, fatty products, vegetable oil, shelf life, organoleptic characteristics, storage

For citation: Demchenko EA, Savenkova TV, Mizinchikova II. Effects of Oils and Fats on the Quality Characteristics, Nutritional Value, and Storage Capacity of Cookies. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):674–689. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-674-689>.

Введение

Современные медицинские данные указывают на взаимосвязь питания с распространением социально-значимых неинфекционных заболеваний. К ним относятся избыточная масса тела, ожирение, сахарный диабет II типа, подагра и сердечно-сосудистые заболевания. Рост заболеваемости коррелируется с чрезмерным потреблением калорий за счет жиров, простых углеводов, поваренной соли и меню с уменьшенным количеством витаминов и пищевых волокон [1–4].

Важным сегментом российского рынка пищевой продукции являются кондитерские изделия. Душевое потребление кондитерских изделий россиянами составляет 25 кг/в год (рис. 1). Наиболее востребованной категорией являются мучные кондитерские изделия. В структуре их производства лидером является печенье [5–8]. Популярность печенья объясняется его привлекательными вкусовыми качествами, ценовой доступностью и широким ассортиментом. Физиологическая ценность традиционных сортов сахарного печенья невелика: большое количество добавленных сахаров (до 30 %), жиров (до 30 %), соли, высокая энергоёмкость (430–500 ккал), незначительное количество белков (5–10 %), пищевых волокон, витаминов и микроэлементов (рис. 2) [9–13].

Современная государственная политика Российской Федерации ориентирована на человека и его здоровье [14–16]. Вопросы качества и безопасности продуктов питания находятся под постоянным и пристальным вниманием. Основная задача, стоящая в плане решения правительственных программ развития пищевой промышленности, – организация выпуска продуктов здорового питания. В Стратегии повышения качества пищевой продукции Российской Федерации до 2030 года с

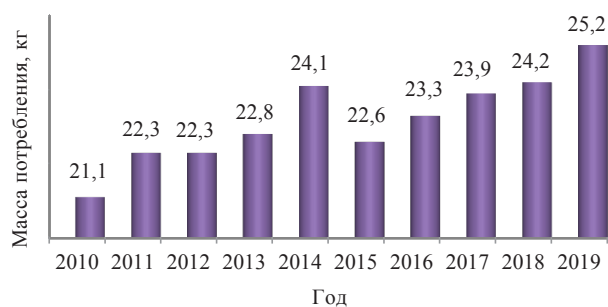


Рисунок 1. Динамика потребления кондитерских изделий россиянами, кг в год/чел.

Figure 1. Dynamics of confectionery consumption by Russians, 1 kg/year/person

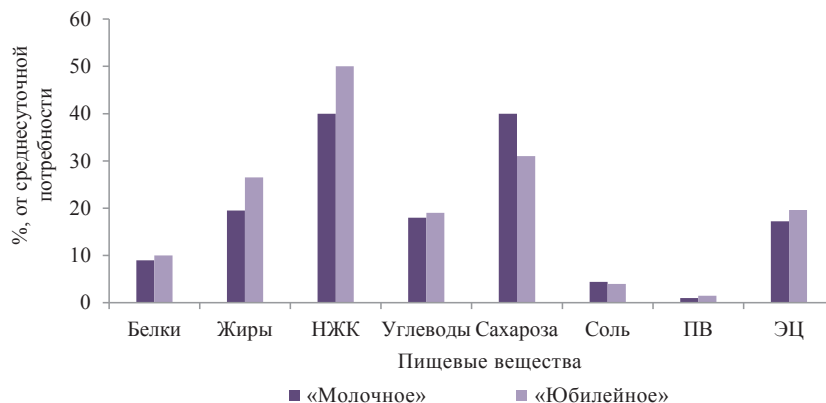


Рисунок 2. Удовлетворение среднесуточной потребности взрослого человека в пищевых веществах при потреблении 100 г сахарного печенья*

Figure 2. 100 g of sugar cookies* vs. average daily diet (adults)

* на примере типичных представителей данной группы изделий: сахарное печенье «Молочное» и «Юбилейное» (рецептуры № 78 и 103) [9]

*sugar cookies “Molochnoye” and “Yubileinoe” (formulations No. 78 and 103) [9]

целью пропаганды здорового питания разработаны и утверждены МР 2.2.0122-18.2.3. «Гигиена питания. Цветовая индикация на маркировке пищевой продукции в целях информирования потребителей. Методические рекомендации». В соответствии с ними на упаковку продукции наносится цветовая индикация: зеленая, желтая и красная. Выбор цвета зависит от уровня содержания в продукте критически значимых пищевых веществ: соли, сахара, жира (в том числе насыщенных жирных кислот (НЖК)).

Документ поддерживается ВОЗ, активно обсуждается в технических комитетах по стандартизации Комиссии Кодекс Алиментариус с целью внедрения на территории стран, входящих в ВТО [17–19]. С учетом установленных диапазонов по критически значимым пищевым веществам проанализирован существующий ассортимент печенья, представленный в действующем сборнике рецептов [9]. Установлено, что из 44 рецептов сахарного печенья:



Рисунок 3. Современные требования к жировым продуктам

Figure 3. Current requirements for oilsand fats

– в 26 рецептурах количество добавленного сахара $\geq 22\%$ (высокий уровень – красная индикация);
 – в 16 рецептурах количество жира $\geq 18\%$ (высокий уровень – красная индикация);
 – в 44 рецептурах количество НЖК $> 5\%$ (высокий уровень – красная индикация);

– в 41 рецептуре количество поваренной соли $> 0,3\%$ (средний уровень – желтая индикация).

В качестве жирового компонента при производстве сахарного печенья используют:

- сливочное масло (5 рецептов);
- кондитерский жир (9 рецептов);
- маргарин (28 рецептов);
- смесь сливочного масла и маргарина (2 рецептуры).

Рецептуры с использованием жидких растительных масел в сборнике отсутствуют.

Жировые продукты – важный компонент рациона. При правильном выборе они играют значимую роль в обеспечении здорового питания (табл. 1, рис. 3) [20, 21]. При производстве печенья жиры оказывают доминирующее значение на формирование качества продукции и ее хранимоспособность (табл. 2) [22, 23].

Представленные данные свидетельствуют об обоснованности моделирования рецептурного состава печенья с учетом последних исследований и разработок в области здорового питания.

Таблица 1. Рекомендации ВОЗ по потреблению жировых продуктов

Table 1. WHO recommendations on oils and fats consumption

Наименование	% от калорийности
Общий жир	15–30
Насыщенные жирные кислоты	менее 10
Полиненасыщенные жирные кислоты	6–10
ПНЖК семейства омега 6	5–8
ПНЖК семейства омега 3	1–2
Трансизомеры жирных кислот	менее 1
Мононенасыщенные жирные кислоты	10

Таблица 2. Функционально-технологические свойства жировых продуктов и их влияние на качественные характеристики теста и печенья

Table 2. Functional and technological properties of oils and fats and their effect on the quality characteristics of dough and cookies

– аэрирование и эмульгирование; – образование водонепроницаемого слоя; – влияние на пластичность, адгезию, растекание при выпечке	} влияние на тесто
– повышение рассыпчатости; – формирование внешнего вида, вкуса и аромата; – стабильность в хранении; – пищевые характеристики	} влияние на готовую продукцию

Таблица 3. Характеристика жировых продуктов

Table 3. Characteristics of oils and fats

Жировые продукты	Состав	Метод изготовления
ПМ	Масло пальмовое рафинированное дезодорированное отбеленное	
ЗМЖ	Рафинированные дезодорированные растительные масла в натуральном и модифицированном виде (пальмовое и его фракции, подсолнечное, соевое и/или пальмоядровое и его фракции); Антиокислитель: концентрат смеси токоферолов	Переэтерификация
КЖ	Рафинированные дезодорированные растительные масла в натуральном и модифицированном виде, эмульгатор: соевый лецитин; Антиокислитель: концентрат смеси токоферолов	Купажирование фракционированных и натуральных растительных масел
Маргарин	Рафинированные дезодорированные растительные масла в натуральном и модифицированном виде (в том числе соевое), вода, эмульгатор: моно- и триглицериды жирных кислот; Антиокислитель: концентрат смеси токоферолов	Купажирование фракционированных и натуральных растительных масел
Масло подсолнечное	Масло подсолнечное рафинированное дезодорированное	
ВОМ	Масло подсолнечное высокоолеиновое рафинированное дезодорированное	

Объекты и методы исследования

В исследованиях использовались жировые продукты: маргарин, кондитерский жир (КЖ), заменитель молочного жира (ЗМЖ) и пальмовое масло (ПМ), а также жидкие растительные масла: подсолнечное и подсолнечное высокоолеиновое (ВОМ), применение которых ограничено (табл. 3). Органолептические показатели готовой продукции определяли по ГОСТ 24901-2014 и ГОСТ 5897-90. Массовую долю влаги – методом высушивания навески в сушильном шкафу по ГОСТ 5900-2014. Намокаемость печенья – по увеличению массы изделия при погружении в воду при температуре 20 °С на определенное время (2 мин) по ГОСТ 10114-80. Определение перекисного числа по МИ 2586-2000, индукционный период

жировой фракции печенья – по ГОСТ 31758-2012 (ISO 6886:2006). Жирнокислотный состав жировой фракции печенья – по ГОСТ 30418-96. Вязкость эмульсии – на ротационном вискозиметре (Haake Roto Visco), плотность эмульсии определяли по отношению массы пробы к ее объему. Активность воды определяли на анализаторе AquaLab 4TE (Decagon Devices, США) методом зеркально охлаждаемого датчика точки росы. Исследования проводились в трех-четырёхкратной повторности и статистически обрабатывались. В экспериментальной части приведены средние значения показателей.

Результаты и их обсуждение

Начальным этапом оптимизации нутриентного состава продукции является разработка базовых

Таблица 4. Базовые модули сахарного печенья сбалансированные по макрокомпонентному составу

Table 4. Basic modules of sugar cookies balanced by macrocomponent composition

Наименование сырья и полуфабрикатов	Массовая доля сухих веществ, %	Расход сырья, кг			
		Печенье на твердых жирах		Печенье на растительном масле	
		В натуре	В сухих веществах	В натуре	В сухих веществах
Мука пшеничная в.с.	85,50	676,33	578,26	638,38	545,81
ПМ, ЗМЖ, КЖ/Маргарин	99,90 (82,00)	170,00 (209,66)	169,83 (171,92)	–	–
Масло подсолнечное	99,85	–	–	172,00	172,00
Сахар-песок	99,85	143,66	143,44	118,05	117,87
Инвертный сироп	80,00	25,40	20,32	58,41	46,73
Патока	78,00	–	–	39,83	31,07
Солодовый экстракт	75,00	43,20	32,40	29,12	21,84
Яичный порошок	94,00	14,46	13,59	–	–
Молоко сухое цельное	96,00	2,96	2,84	25,97	24,93
Лецитин соевый	99,90	3,59 (1,5)	3,59 (1,5)	3,80	3,80
Соль	96,50	2,88	2,78	2,59	2,50
Сода питьевая	50,00	4,00	2,00	4,00	2,00
Аммоний	0	3,27	0,00	3,30	0,00
Кислота лимонная	91,20	–	–	0,55	0,50
Итого	–	1089,75 (1127,32)	969,05	1096,00	969,05
Выход	95,00	1000,00	950,00	1000,00	950,00
Характеристика печенья по содержанию критически значимых пищевых веществ					
			Цветовая индексация		Цветовая индексация
Добавленный сахар		18,0		20,0	
Жир		18,0		18,0	
в т. ч. НЖК		8–9		2–3	
трансизомеры		менее 0,36		менее 0,2	
Соль		менее 0,3		менее 0,3	
Пищевая и энергетическая ценность 100 г печенья					
Белки, г		7,5		7,0	
Жиры, г		17,8		18,0	
Углеводы, г		65,0		64,5	
Энергетическая ценность, ккал/кДж		445/1863		450/1884	

модулей, сбалансированных по макрокомпонентному составу [24–26]. С учетом современных рекомендаций по питанию, потребительской приемлемости и традиционности органолептических показателей формализованы требования к печенью. Они заключаются в ограничении массовой доли жира – не более 18 %, добавленных сахаров – не более 22 %, соли – не более 0,3 % [16–18].

С учетом установленных диапазонов по критически значимым пищевым веществам разработаны базовые модули сахарного печенья. В том числе на жидких растительных маслах, применение которых позволит снизить содержание НЖК в печенье (табл. 4).

В работе исследованы жировые продукты как традиционно используемые в производстве сахарного печенья, так и жидкие растительные масла. Характеристика жировых продуктов приведена в таблицах 1, 5 и 6.

Показатели окислительной стабильности (перекисное число, индукционный период) позволяют прогнозировать сохранность готовых изделий в процессе хранения [27, 28]. Более низкие значения индукционного периода подсолнечных масел свидетельствуют о риске окислительной порчи

печенья в процессе хранения. Полученные данные учтены при составлении программы испытаний по обоснованию сроков годности печенья.

Замена твердых жировых продуктов на жидкие растительные масла позволит увеличить содержание полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), в том числе α -линоленовой жирной кислоты семейства ω -3.

Важным аспектом работы являются исследования, направленные на разработку и оптимизацию технологий. Твердые жировые продукты применяют в пластицированном виде, что повышает равномерность их распределения между частицами муки в виде тончайших пленок. Применение жидких растительных масел сопряжено со сложностями: они плохо удерживаются тестом и готовым изделием [29, 30]. Для минимизации этого в базовом модуле увеличено количество сухого молока и сахаров, вносимых в виде сиропа и патоки, исключен яичный порошок и добавлена лимонная кислота. Отработаны приемы, позволяющие оптимизировать технологию приготовления эмульсии (рис. 4 и 5).

Жиры, вводимые в тесто в виде эмульсии, более стойки к окислительным процессам [31, 32]. Исследования структурно-реологических характе-

Таблица 5. Показатели жировых продуктов

Table 5. Indicators Characteristics of oils and fats

Показатели	ПМ	ЗМЖ	КЖ	Маргарин	Масло подсолнечное	ВОМ
Содержание трансизомеров жирных кислот, % не более	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0
Температура плавления, °С	33–39	33–36	30–34	27–34	от –19 до –16	4–7
Перекисное число, ммоль акт. кисл./кг	0,1	1,0	1,0	1,3	2,0	2,0
Индукционный период, ч	10,4	6,8	12,0	8,8	2,0	4,4

Таблица 6. Жирнокислотный состав жировых продуктов

Table 6. Fatty acid composition of oils and fats

Жирная кислота	Обозначение	Жирнокислотный состав, %					
		ПМ	ЗМЖ	КЖ	Маргарин	Масло подсолнечное	ВОМ
Каприловая	8:0	0,02	0,03		0,02		
Каприновая	10:0	0,02	0,03		0,02		
Лауриновая	12:0	0,26	0,33	0,29	0,22		
Миристиновая	14:0	1,04	0,90	1,04	0,94		
Пальмитиновая	16:0	43,10	35,70	42,43	39,03	9,0	6,6
Пальмитолеиновая	16:1	0,20	0,17	0,18	0,18		
Стеариновая	18:0	4,39	4,59	4,45	4,40	5,6	5,7
Олеиновая	18:1	39,95	36,78	40,29	38,93	22,7	74,7
Линолевая	18:2	10,11	19,64	10,44	14,48	62,5	13,0
Линоленовая	18:3	0,22	0,88	0,20	0,95		
Арахидиновая	20:0	0,38	0,38	0,38	0,39		
Гондоиновая	20:1	0,17	0,26	0,18	0,23		
Бегеновая	22:0	0,07	0,21	0,07	0,11		
Лигноцериновая	24:0	0,08	0,12	0,07	0,08		
НЖК		49,3	42,3	48,7	44,0	14,5	12,3
МНЖК		40,3	37,2	40,6	39,5	22,7	74,7
ПНЖК		10,3	20,5	10,8	15,5	62,5	13,0

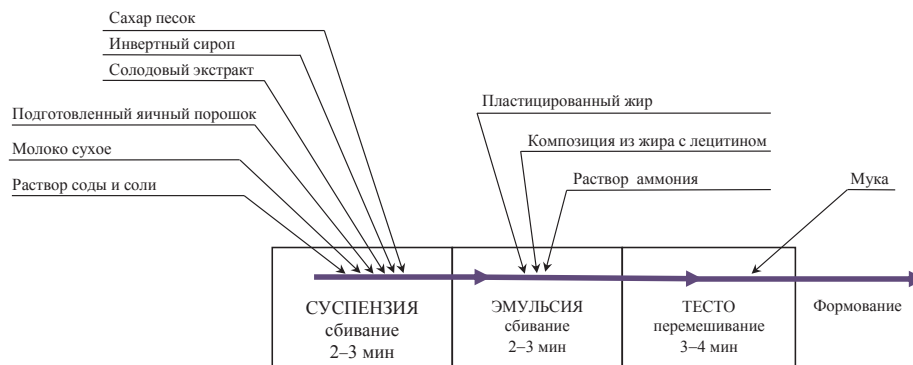


Рисунок 4. Технологическая схема приготовления теста для печенья на твердых жирах

Figure 4. Process scheme for dough with solid fats

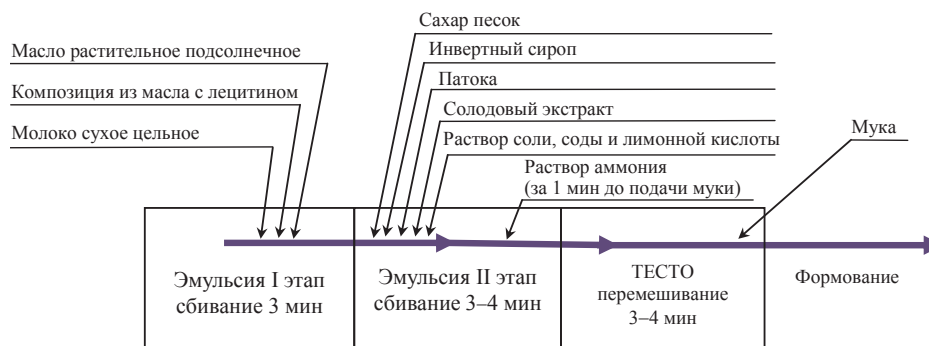


Рисунок 5. Технологическая схема приготовления теста для печенья на жидких растительных маслах

Figure 5. Process scheme for dough with vegetable oils

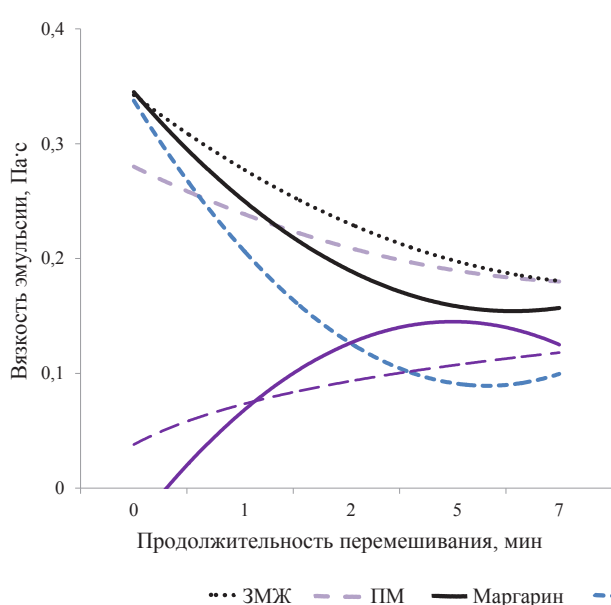


Рисунок 6. Динамика изменения вязкости эмульсии

Figure 6. Emulsion: viscosity pattern

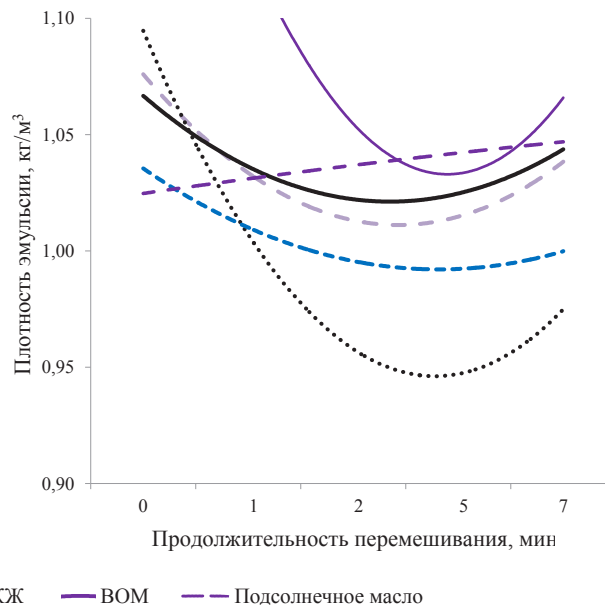


Рисунок 7. Динамика изменения плотности эмульсии

Figure 7. Emulsion: density pattern

ристик эмульсии позволяет оценить функционально-технологические свойства жировых продуктов и оптимизировать технологические параметры (рис. 6 и 7).

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

– с увеличением времени сбивания вязкость эмульсии с использованием твердых жировых продуктов уменьшается. Наиболее выраженное уменьшение вязкости происходит при использовании КЖ. При использовании жидких растительных масел вязкость эмульсии незначительно возрастает;

– динамика изменения плотности свидетельствует о том, что сначала эмульсия насыщается воздухом, а затем оседает. Насыщение воздухом при использовании КЖ и маргарина происходит в меньшем объеме. При этом масса остается стабильной большой промежуток времени. Меньшая чувствительность маргарина к колебаниям технологических параметров объясняется наличием в его составе эмульгатора: моно- и триглицериды жирных кислот, которые обеспечивают получение более тонкой дисперсии частиц жира и их большую стабильность. Быстрый переход эмульсии от сбитого состояния к уплотнению при использовании ЗМЖ свидетельствует о необходимости строгого соблюдения технологических режимов. Вязкость и плотность эмульсии на ПМ меняется в узком диапазоне, а ее структура характеризуется включением большого числа крупных пузырьков воздуха. Установленные закономерности могут быть использованы при оптимизации технологических параметров применительно к конкретным производственным условиям.

Готовое тесто характеризуется однородной, пластичной и несколько крошащейся структурой. При использовании жидких растительных масел пластичность теста повышается. После вылежки в течение 5 мин тесто с помощью тестораскаточной машины раскатывалось в пласт толщиной 4 мм. Из него вырубались тестовые заготовки и укладывались на противни. Выпечку печенья осуществляли при температуре 180 °С в течение 8–9 мин. Печенье охлаждали при комнатной температуре в течение

30 мин. Упаковывали в термосвариваемые пакеты из непрозрачной полипропиленовой пленки.

Физико-химические показатели печенья, приготовленного с использованием различных жировых продуктов, представлены в таблице 7.

При использовании жидких растительных масел плотность печенья с ВОМ выше, структура изделий несколько жестче, пористость менее равномерная. При использовании твердых жировых продуктов максимальная плотность отмечена в печенье с КЖ, минимальная – в печенье с ЗМЖ. Структура печенья с КЖ – мелкопористая, несколько жесткая, с незначительной салитостью, а с использованием ЗМЖ – очень мелкопористая, несколько мягкая. При использовании ПМ структура печенья менее однородная и с крупными порами, при использовании маргарина – рассыпчатая, однородная и мелкопористая (рис. 8).

Упакованная продукция закладывалась на хранение для проведения исследований в течение предполагаемого срока годности. Хранение изделий осуществлялось при температуре 18 ± 5 °С и относительной влажности не более 75 %.

В данной работе хранимоспособность рассматривается как способность печенья оставаться неизменным по значениям исходных показателей состава и свойств в течение срока годности.

Предполагаемый срок годности печенья с использованием жидких растительных масел – 3 месяца. Периодичность исследования рассчитывалась с учетом предполагаемого срока годности продукции и коэффициента резерва (1,15) по 5-ти контрольным точкам (рис. 9).

В результате исследования сохранности печенья на жидких растительных маслах установлено, что микробиологические показатели продукции на всех этапах хранения (точки 1–5) соответствуют требованиям ТР ТС 021/2011. Ни в одном из исследуемых образцов не были обнаружены патогенные микроорганизмы, в т. ч. сальмонеллы (в 25 г продукта) и бактерии группы кишечных палочек (в 1,0 г продукта). Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и

Таблица 7. Физико-химические показатели печенья, приготовленного с использованием различных жировых продуктов

Table 7. Physical and chemical parameters of cookies with various oils and fats

Показатели		Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Намокаемость, %	Активность воды, ед
Вид жирового продукта	Масло подсолнечное	7,7	0,532	131	0,492
	ВОМ	7,5	0,670	125	0,490
	ЗМЖ	6,2	0,598	118	0,486
	КЖ	7,0	0,673	118	0,471
	ПМ	7,5	0,631	120	0,427
	Маргарин	5,7	0,628	121	0,420



Рисунок 8. Внешний вид печенья, приготовленного с использованием различных жировых продуктов

Figure 8. Appearance of cookies with various oils and fats



Рисунок 9. Структурная схема исследований печенья со сроком годности 3 месяца

Figure 9. Block diagram of the research: cookies after three months of storage

плесеней соответствует установленным нормам в течение всего периода исследований.

Исследования процессов влагопереноса свидетельствуют о том, что показатели массовой доли влаги и активности воды изменяются в направлении уменьшения в допустимых пределах (табл. 8).

В результате исследований жирнокислотного состава установлено, что содержание линолевой кислоты в жировой фракции печенья с подсолнечным маслом уменьшилось с 62,0 до 60,4 %. В то время как в печенье, приготовленном с использованием ВОМ, осталось практически неизменным (табл. 9).

Высокое содержание олеиновой ($\approx 75\%$) и низкое содержание линолевой ($< 15\%$) кислот обуславливают низкую скорость окислительных процессов в печенье с ВОМ. Это подтверждается динамикой изменения показателей окислительной порчи жировой фракции печенья (табл. 10).

Низкие значения индукционного периода в точке 5 свидетельствуют о необходимости корреляции предполагаемого срока годности в сторону уменьшения.

В результате исследований органолептических показателей в динамике хранения установлено их соответствие требованиям национальных стандартов РФ для аналогичной продукции. При этом отмечено, что изменение дескрипторов «вкус» и «запах» в точке 5 близко к критическому (рис. 10) [33].

Установлено, что хранение печенья в течение 90 суток оказывает регрессивное влияние на органолептические показатели и показатели окислительной стабильности. В связи с этим рекомендуемый срок годности печенья на растительных маслах – 2 месяца.

Предполагаемый срок годности печенья с использованием твердых жировых продуктов – 6 месяцев. Периодичность исследования рассчитывалась с учетом предполагаемого срока годности продукции и коэффициента резерва (1,15) по 8-ми контрольным точкам: точка 1 – свежесделанное печенье; точка 2 – 30 суток хранения; точка 3 – 60 суток хранения; точка 4 – 90 суток хранения; точка 5 – 120 суток хранения;

Таблица 8. Результаты исследований процессов влагопереноса в динамике хранения

Table 8. Moisture transfer processes during storage

Показатель	Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM
	Срок хранения, сутки									
	Свежевыработанное		30		60		90		104	
Влажность, %	7,7	7,5	7,5	7,2	7,0	7,1	6,9	7,1	6,8	6,9
Активность воды, ед.	0,492	0,490	0,487	0,493	0,490	0,480	0,489	0,483	0,478	0,480

Таблица 9. Изменение жирнокислотного состава жировой фракции печени в процессе хранения

Table 9. Fatty acid composition during storage

Жирная кислота	Обозначение	Жировая фракция печени, %			
		Свежевыработанное		90 суток хранения	
		Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM
Пальмитиновая	16:0	9,3	6,8	9,5	7,4
Стеариновая	18:0	6,6	5,1	6,7	4,9
Олеиновая	18:1	22,7	74,5	23,3	74,3
Линолевая	18:2	62,0	13,1	60,4	13,2
НЖК		15,9	11,9	16,2	12,3
МНЖК		22,7	74,5	23,3	74,3
ПНЖК		62,0	13,1	60,4	13,4

Таблица 10. Показатели окислительной порчи жировой фракции печени в процессе хранения

Table 10. Oxidative spoilage during storage

Показатели	Жировая фракция печени, %									
	Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM	Масло подсолнечное	BOM
	Срок хранения, сутки									
	Свежевыработанное		30		60		90		104	
Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	2,0	1,3	1,8	1,5	2,6	1,8	3,4	2,0	2,5	1,6
Индукционный период, ч	2,3	4,8	—	—	—	—	—	—	0,3	0,8

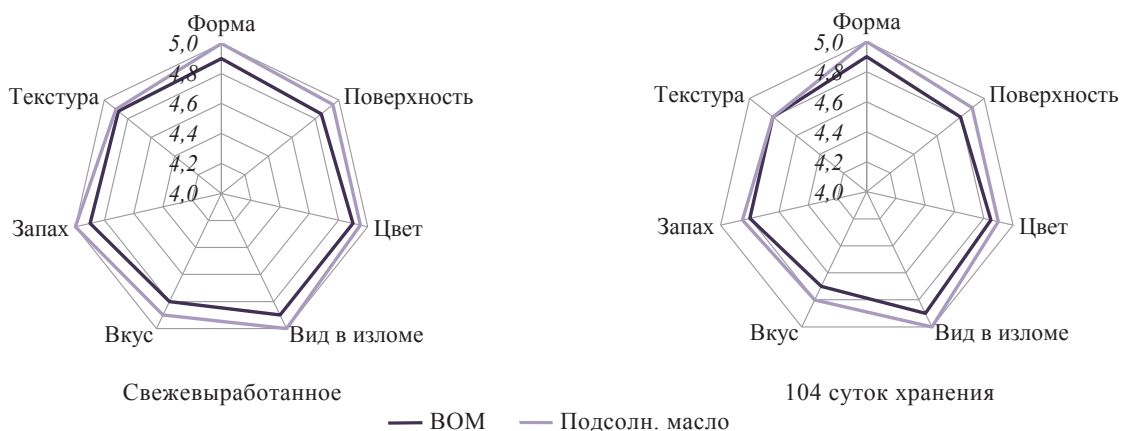


Рисунок 10. Профилограмма органолептической оценки образцов печени свежесделанной и в конце срока годности

Figure 10. Sensory evaluation of fresh and expiring samples

Таблица 11. Результаты исследований процессов влагопереноса в динамике хранения

Table 11. Moisture transfer during storage

Срок хранения, сутки	Показатели	ПМ	ЗМЖ	КЖ	Маргарин
Свежевыработанное	Влажность, %	7,5	6,2	7,0	5,7
	Активность воды, ед.	0,427	0,486	0,471	0,420
30	Влажность, %	7,0	6,3	7,1	5,8
	Активность воды, ед.	0,410	0,490	0,475	0,425
60	Влажность, %	7,2	6,1	7,0	5,8
	Активность воды, ед.	0,415	0,480	0,468	0,423
90	Влажность, %	7,3	6,0	7,2	5,6
	Активность воды, ед.	0,409	0,483	0,465	0,415
120	Влажность, %	7,1	6,1	6,8	5,6
	Активность воды, ед.	0,415	0,478	0,460	0,413
150	Влажность, %	7,0	6,0	6,7	5,5
	Активность воды, ед.	0,408	0,477	0,462	0,410
180	Влажность, %	6,9	5,8	6,7	5,5
	Активность воды, ед.	0,400	0,470	0,465	0,412
207	Влажность, %	7,0	5,8	6,6	5,3
	Активность воды, ед.	0,408	0,465	0,463	0,410

Таблица 12. Изменение жирнокислотного состава жировой фракции печенья в процессе хранения

Table 12. Fatty acid composition during storage

Жирная кислота	Обозначение	Жировая фракция печенья, %							
		Срок хранения, сутки							
		Свежевыработанное		180		Свежевыработанное		180	
		ЗМЖ	Маргарин	ЗМЖ	Маргарин	ПМ	КЖ	МП	КЖ
Масляная	4:0	0,2	0,1	–	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Капроновая	6:0	0,03	–	–	–	–	0,04	–	–
Каприловая	8:0	0,1	–	–	–	–	0,3	–	0,1
Каприновая	10:0	1,0	–	0,5	–	–	1,2	–	–
Лауриновая	12:0	0,5	–	–	–	0,1	0,2	–	–
Миристиновая	14:0	1,1	0,9	0,5	1,0	1,0	1,1	0,8	1,1
Пальмитиновая	16:0	36,5	41,1	34,5	41,0	43,2	43,2	44,8	43,7
Пальмитолеиновая	16:1	0,3	–	–	–	–	0,2	–	0,4
Маргариновая	17:0	0,1	–	–	–	–	0,1	–	–
Стеариновая	18:0	5,1	8,4	7,5	5,4	8,0	4,6	4,8	5,0
Элаидиновая	18:1 trans	0,5	0,2	0,7	–	0,1	–	–	–
Олеиновая	18:1	32,8	34,7	36,6	38,1	36,5	36,6	38,1	37,3
Линоэлаидиновая	18:2 trans	0,1	0,1	–	–	10,7	11,5	11,4	12,0
Линолевая	18:2	19,9	13,9	19,4	14,2	0,1	0,2	–	–
Линоленовая	18:3	–	–	–	–	–	–	–	–
Арахидиновая	20:0	0,3	–	0,3	–	0,3	0,3	–	0,3
Гондоиновая	20:1	0,8	0,5	–	0,2	–	0,2	–	–
НЖК		44,93	50,5	43,3	47,5	52,7	51,14	50,5	50,2
МНЖК		33,9	35,2	36,6	38,3	36,5	37,0	38,1	37,7
ПНЖК		19,9	13,9	19,4	14,2	10,7	11,5	11,4	12,0

точка 6 – 150 сток хранения; точка 7 – 180 суток хранения (конец срока годности); точка 8 – 207 суток хранения (конец срока годности с учетом коэффициента резерва).

В результате исследования сохранности печенья, приготовленного с использованием твердых жировых

продуктов, установлено, что микробиологические показатели продукции на всех этапах хранения (точки 1–8) соответствуют требованиям ТР ТС 021/2011. Ни в одном из исследуемых образцов не были обнаружены патогенные микроорганизмы, в т. ч. сальмонеллы (в 25 г продукта) и бактерии группы кишечных палочек

Таблица 13. Показатели окислительной порчи жировой фракции печени в процессе хранения

Table 13. Oxidative spoilage during storage

Срок хранения, сутки	Показатели	ПМ	ЗМЖ	КЖ	Маргарин
Свежевыработанное	Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	0,7	1,0	0,8	1,4
	Индукционный период, ч	51,0	34,0	53,6	26,8
30	Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	1,3	1,5	1,5	1,8
60	Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	1,3	1,8	1,3	1,4
90	Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	1,4	1,6	1,3	1,3
120	Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	1,2	1,3	1,2	1,6
150	Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	1,3	1,5	1,3	1,8
180	Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	1,5	1,8	1,4	2,0
	Индукционный период, ч	41,0	24,0	46,0	23,0
207	Перекисное число, ммоль акт. кисл/кг	0,7	1,2	1,0	0,7

(в 1,0 г продукта). Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и плесеней соответствуют установленным нормам в течение всего периода исследований.

Исследования процессов влагопереноса свидетельствуют о том, что показатели массовой доли влаги и активности воды изменяются в направлении уменьшения в допустимых пределах (табл. 11).

В результате исследований жирнокислотного состава установлено, что за шесть месяцев хранения существенных изменений в составе НЖК жировой фракции печени не отмечено. Изменения произошли в количественном составе насыщенных и мононенасыщенных жирных кислот (табл. 12).

Низкая скорость окислительных процессов отмечена в печени, приготовленном с использованием КЖ > ПМ > ЗМЖ и маргарин. Это подтверждается динамикой изменений показателей окислительной

порчи жировой фракции печени в процессе хранения (табл. 13).

На протяжении всего периода исследований в изделиях с КЖ и ПМ подъемы показателя перекисного числа жировой фракции происходили несколько позже и на меньшем уровне. Окислительные реакции протекали с меньшими скоростями, по сравнению с изделиями, приготовленными с использованием ЗМЖ и маргарина.

В результате исследований органолептических показателей в динамике хранения установлено их соответствие требованиям национальных стандартов РФ для аналогичной продукции: ухудшение органолептических показателей не превышает 0,5 балла по каждому дескриптору (ГОСТ 24901-2014) (рис. 11).

Изменение органолептических характеристик печени с ПМ и КЖ более выражено и затрагивает

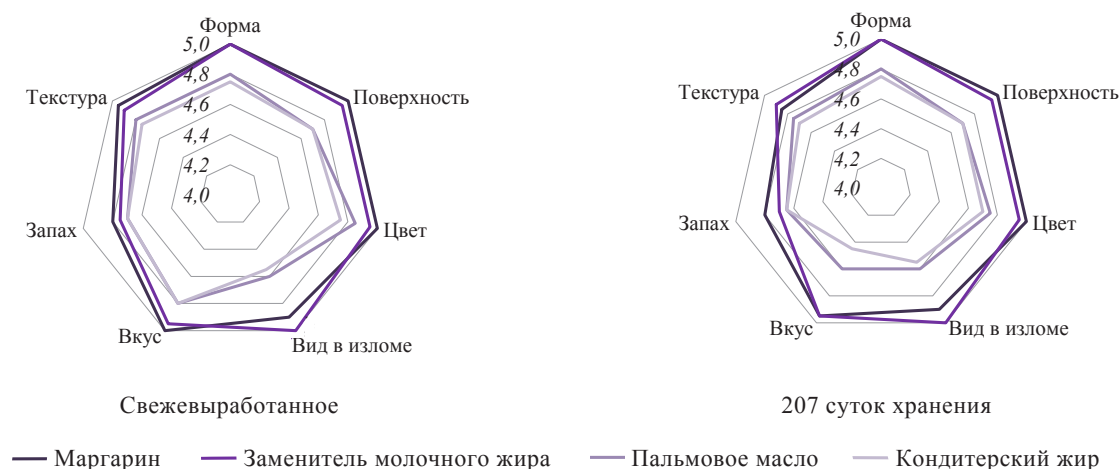


Рисунок 11. Профилограмма органолептической оценки образцов печени свежевываротонного и в конце срока годности

Figure 11. Sensory evaluation of fresh and expired samples

степень рассыпчатости и восприятие вкуса. В то время как при использовании маргарина полнота вкуса и аромата печенья хорошо выражена. Текстура печенья с использованием ЗМЖ в процессе хранения становится более хрупкой и рассыпчатой, вкус и аромат выраженный.

Выводы

Разработаны базовые модули сахарного печенья, сбалансированные по макрокомпонентному составу, в том числе с использованием жидких растительных масел. С учетом установленных диапазонов по критически значимым пищевым веществам приготовленное печенье на жидких растительных маслах характеризуется средним уровнем содержания добавленных сахаров и жира, низким уровнем содержания соли и трансизомеров, а также низким уровнем содержания насыщенных жирных кислот. Для повышения эффективности использования жидких растительных масел необходимы исследования по введению различных эмульгаторов и антиоксидантов, применение которых позволит повысить стойкость масел к окислению и способность образовывать связи с белками и крахмальными фракциями муки. На основании комплекса исследований установлен срок годности сахарного печенья и его зависимость от вида используемого жирового компонента. Срок годности печенья с использованием жидких растительных масел – 2 месяца. Срок годности печенья с использованием твердых жировых продуктов – 6 месяцев.

Используемые сокращения

КЖ – кондитерский жир	НЖК – ненасыщенные жирные кислоты
ЗМЖ – заменитель молочного жира	МНЖК – мононенасыщенные жирные кислоты
ПМ – пальмовое масло	ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты
ВОМ – высокоолеиновое масло	

Критерии авторства

Е. А. Демченко – руководство исследованием, описание полученных экспериментальных данных и написание рукописи. Т. В. Савенкова – разработка концепции и консультация в ходе эксперимента, редактирование рукописи. И. И. Мизинчикова – обработка и анализ полученных данных, литературный обзор, подготовка и оформление статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

E.A. Demchenko supervised the research, described the experimental data, and wrote the manuscript. T.V. Savenkova developed the research, provided consultation, and proofread the manuscript. I.I. Mizinchikova processed and analyzed the data obtained, reviewed available publications, and formatted the article.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список литературы

1. Review of nutrition and human health research. Medical Research Council, 2017. 80 p.
2. Генеральная Ассамблея провозгласила период до 2025 года Десятилетием действий ООН по проблемам питания. URL: <https://news.un.org/ru/story/2016/04/1282941/> (дата обращения: 20.06.2021).
3. Глобальный план действий по профилактике неинфекционных заболеваний и борьбе с ними на 2013–2020 гг. Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2014. 107 с.
4. Мартинчик А. Н., Батулин А. К., Камбаров А. О. Анализ ассоциации структуры энергии рациона по макронутриентам и распространения избыточной массы тела и ожирения среди населения России // Вопросы питания. 2020. Т. 89. № 3. С. 40–53. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10028>.
5. Анализ рынка кондитерских изделий в России в 2015–2019 гг., оценка влияния коронавируса и прогноз на 2020–2024 гг. Tebiz Group, 2021. 283 с.
6. Довыденко В. А. Пищевая промышленность в России: анализ и перспективы развития // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2019. Т. 40. № 12–1. С. 176–181.
7. Пищевая промышленность. Аналитическая справка. ВНИИ Труда, 2019. 95 с.
8. Сальникова О. В. Рожкова Л. В. Основные направления развития экспорта кондитерской продукции в России // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Экономические науки. 2018. Т. 7. № 1. С. 56–64. <https://doi.org/10.21685/2309-2874-2018-1-7>.
9. Рецептуры на печенье. М.: Хлебпродинформ, 1987. 247 с.
10. Тутельян В. А. Химический состав и калорийность российских продуктов питания. М.: ДеЛи плюс, 2012. 284 с.
11. Новые решения на рынке мучных кондитерских изделий. URL: <https://ssnab.ru/news/vse-novosti-i-statii/muchnye-konditerskie-izdeliya/novye-resheniya-na-rynke-muchnykh-konditerskikh-izdeliy/> (дата обращения: 20.06.2021).

12. Актуальность создания специализированных кондитерских изделий для питания детей старше трех лет / С. Ю. Мистенева [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50. № 2. С. 282–295. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-282-295>.
13. Резниченко И. Ю., Щеглов М. С. Сахарозаменители и подсластители в технологии кондитерских изделий // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50. № 4. С. 576–587. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-576-587>.
14. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 15.01.2020 № 8 «Об утверждении Стратегии формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года». URL: <http://docs.cntd.ru/document/564215449> (дата обращения: 10.03.2021).
15. Бурляева Е. А., Камбаров А. О., Никитюк Д. Б. Изменение структуры питания населения России за 100 лет // *Клиническое питание и метаболизм*. 2020. Т. 1. № 1. С. 17–26. <https://doi.org/10.17816/clinutr21188>.
16. Попова А. Ю., Тутельян В. А., Никитюк Д. Б. О новых (2021) Нормах физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации // *Вопросы питания*. 2021. Т. 90. № 4. С. 6–19. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19>.
17. Роспотребнадзор расширяет применение цветовой маркировки «Светофор» для пищевых продуктов и безалкогольных напитков. URL: https://rospotrebnadzor.ru/about/info/news/news_details.php?ELEMENT_ID=12028 (дата обращения: 20.06.2021).
18. Корнен Н. Н., Викторова Е. П., Евдокимова О. В. Методологические подходы к созданию продуктов здорового питания // *Вопросы питания*. 2015. Т. 84. № 1. С. 95–99.
19. McClements D. J. *Future foods: How modern science is transforming the way we eat*. Springer, 2019. 395 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12995-8>.
20. Briggs M. A., Petersen K. S., Kris-Etherton P. M. Saturated fatty acids and cardiovascular disease: replacements for saturated fat to reduce cardiovascular risk // *Healthcare*. 2017. Vol. 5. № 2. <https://doi.org/10.3390/healthcare5020029>.
21. Современные тенденции развития производства жировых продуктов: наука, технологии, бизнес / А. П. Нечаев [и др.]. М.: Авторская книга, 2016. 382 с.
22. Кондратьев Н. Б. Оценка качества кондитерских изделий. Повышение сохранности кондитерских изделий. М.: Перо, 2015. 250 с.
23. Солдатова Е. А., Мистенева С. Ю., Савенкова Т. В. Условия и критерии обеспечения хранимоспособности кондитерских изделий // *Пищевая промышленность*. 2019. № 5. С. 82–85. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10078>.
24. Оптимизация рецептуры бисквитного полуфабриката / Е. А. Маринина [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50. № 1. С. 44–51. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-44-51>.
25. Optimisation of functional sausage formulation with konjac and inulin: Using D-Optimal mixture design / F. Safaei [et al.] // *Foods and Raw Materials*. 2019. Vol. 7. № 2. P. 177–184. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-177-184>.
26. Ibrahim G. E., Bahgaat W. K., Hussein A. M. S. Egyptian kishk as a fortificant: Impact on the quality of biscuit // *Foods and Raw Materials*. 2021. Vol. 9. № 1. P. 164–173. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-164-173>.
27. Канеш К. Раджа. Жиры в пищевой промышленности. СПб.: Профессия, 2016. 646 с.
28. Новикова Е. В., Черевко А. И. *Энциклопедия питания*. Том 6. Процессы, происходящие в продуктах при обработке. М.: КноРус, 2021. 536 с.
29. Мэнли Д. Мучные кондитерские изделия с рецептурами. СПб.: Профессия, 2012. 720 с.
30. Влияние функционально-технологических свойств растительных жировых продуктов на качественные характеристики печенья / С. Ю. Мистенева [и др.] // *Вестник МГТУ*. 2020. Т. 23. № 3. С. 268–279. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-3-268-279>.
31. Влияние антиоксидантов в нативной и мицеллированной формах на сроки годности эмульсионного жирового продукта / А. П. Нечаев [и др.] // *Вопросы питания*. 2020. Т. 89. № 5. С. 101–109. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10070>.
32. Основные критерии качества молочно-жировых эмульсионных продуктов / А. С. Мамонтов [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. 2016. Т. 43. № 4. С. 36–42.

References

1. Review of nutrition and human health research. Medical Research Council; 2017. 80 p.
2. General'naya Assambleya provozglasila period do 2025 goda Desyatiletim deystviy OON po problemam pitaniya [UN Decade of Action on Nutrition 2016–2025]. [cited 2021 Jun 20]. Available from: <https://news.un.org/ru/story/2016/04/1282941/>.
3. Global action plan for the prevention and control of noncommunicable diseases 2013–2020. Geneva: World Health Organization; 2014. 107 p. (In Russ.).

4. Martinchik AN, Baturin AK, Kambarov AO. Analysis of the association of diet energy from macronutrients and prevalence of overweight and obesity among the Russian population. *Problems of Nutrition*. 2020;89(3):40–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10028>.
5. Analiz rynka konditerskikh izdeliy v Rossii v 2015–2019 gg., otsenka vliyaniya koronavirusa i prognoz na 2020–2024 gg. [Analysis of the confectionery market in Russia in 2015–2019, assessment of the impact of coronavirus and forecast for 2020–2024]. Tebiz Group; 2021. 283 p. (In Russ.).
6. Dovydenko VA. Food industry in Russia: Analysis and development prospects. *Sciif. Questions of Students Science*. 2019;40(12–1):176–181. (In Russ.).
7. Pishchevaya promyshlennost'. Analiticheskaya spravka [Food industry. Analytical reference]. All-Russian Research Institute of Labor; 2019. 95 p. (In Russ.).
8. Sal'nikova OV, Rozhkova LV. Main directions of development of confectionary products export in Russia. *University Proceedings. Volga Region. Economic Sciences*. 2018;7(1):56–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2309-2874-2018-1-7>.
9. Retseptury na pechen'e [Cookies formulations]. Moscow: Khlebprouinform; 1987. 247 p. (In Russ.).
10. Tutel'yan VA. Khimicheskiy sostav i kaloriynost' rossiyskikh produktov pitaniya [Chemical composition and caloric content of Russian food]. Moscow: DeLi plus; 2012. 284 p. (In Russ.).
11. Novy'e resheniya na ry'nke muchny'x konditerskix izdelij [New solutions in the pastry market]. [cited 2021 Jun 20]. Available from: <https://ssnab.ru/news/vse-novosti-i-stati/muchnye-konditerskie-izdeliya/novyie-resheniya-na-rynke-muchnykh-konditerskikh-izdeliy/>.
12. Misteneva SYu, Savenkova TV, Demchenko EA, Shcherbakova NA, Gerasimov TV. Rationale for targeted confectionery products for children over three years old. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(2):282–295. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-282-295>.
13. Reznichenko IYu, Shcheglov MS. Sugar substitutes and sweeteners in confectionery technology. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(4):576–587. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-576-587>.
14. Prikaz Ministerstva zdravooxraneniya RF ot 15.01.2020 № 8 "Ob utverzhdenii Strategii formirovaniya zdorovogo obraza zhizni naseleniya, profilaktiki i kontrolya neinfekcionny'x zabolevanij na period do 2025 goda" [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation of January 15, 2020, No. 8 "On approval of the Strategy for the formation of a healthy lifestyle for the population, prevention, and control of non-communicable diseases through 2025"]. [cited 2021 Jun 20]. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/564215449>.
15. Burlyaeva EA, Kambarov AO, Nikityuk DB. Changes in the nutritional structure of the population of Russia for 100 years. *Clinical nutrition and metabolism*. 2020;1(1):17–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/clinutr21188>.
16. Popova AYU, Tutel'yan VA, Nikityuk DB. On the new (2021) norms of physiological requirements in energy and nutrients of various groups of the population of the Russian Federation. *Problems of Nutrition*. 2021;90(4):6–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-4-6-19>.
17. Rospotrebnadzor rasshiraet primeneniye czvetovoj markirovki «Svetofor» dlya pishhev'x produktov i bezalkogol'ny'x napitkov [Rospotrebnadzor is expanding the use of color coding for food and non-alcoholic beverages]. [cited 2021 Jun 20]. Available from: https://rospotrebnadzor.ru/about/info/news/news_details.php?ELEMENT_ID=12028.
18. Kornen NN, Viktorova EP, Evdokimova OV. Methodological approaches to the creation of healthy food. *Problems of Nutrition*. 2015;84(1):95–99. (In Russ.).
19. McClements DJ. Future foods: How modern science is transforming the way we eat. Springer; 2019. 395 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12995-8>.
20. Briggs MA, Petersen KS, Kris-Etherton PM. Saturated fatty acids and cardiovascular disease: replacements for saturated fat to reduce cardiovascular risk. *Healthcare*. 2017;5(2). <https://doi.org/10.3390/healthcare5020029>.
21. Nechaev AP, Semenova PA, Lavrova AV, Gorshunova KD, Zajceva LV, Tutel'yan VA. Sovremennyye tendencii razvitiya proizvodstva zhirovy'x produktov: nauka, texnologii, biznes [Modern trends in the development of the production of fatty products: science, technology, and business]. Moscow: Avtorskaya kniga; 2016. 382 p. (In Russ.).
22. Kondrat'ev NB. Ocenka kachestva konditerskix izdelij. Povy'shenie soxranosti konditerskix izdelij [Assessment of the quality of confectionery. Improving the preservation of confectionery]. Moscow: Pero; 2015. 250 p. (In Russ.).
23. Soldatova EA, Misteneva SYu, Savenkova TV. Conditions and criteria for ensuring the storage ability of confectionery. *Food Industry*. 2019;5(5):82–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10078>.
24. Marinina EA, Sadygova MK, Kirillova TV, Kanevskaya IYu. Optimization formulation of semi-finished sponge cake. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(1):44–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-44-51>.
25. Safaei F, Abhari K, Khosroshahi NK, Hosseini H, Jafari M. Optimisation of functional sausage formulation with konjac and inulin: Using D-Optimal mixture design. *Foods and Raw Materials*. 2019;7(2):177–184. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-177-184>.

26. Ibrahim GE, Bahgaat WK, Hussein AMS. Egyptian kishk as a fortificant: Impact on the quality of biscuit. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(1):164–173. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-164-173>.
27. Kanesh K. Radzha. Zhiry` v pishhevoj promy`shlennosti [Fats in food industry]. St. Petersburg: Professiya; 2016. 646 p. (In Russ.).
28. Novikova EV, Cherevko AI. E`nciklopediya pitaniya. Tom 6. Processy`, proisxodyashhie v produktax pri obrabotke [Encyclopedia of Nutrition. Volume 6. Processes in products during processing]. Moscow: KnoRus; 2021. 536 p. (In Russ.).
29. Me`nli D. Muchny`e konditerskie izdeliya s recepturami [Flour confectionery and their formulations]. St. Petersburg: Professiya; 2012. 720 p. (In Russ.).
30. Misteneva SYu, Savenkova TV, Demchenko EA, Shcherbakova NA, Gerasimov TV. Effect of functional and technological properties of vegetable shortenings on qualitative characteristics of biscuit. *Vestnik of MSTU*. 2020;23(3):268–279. (In Russ.). <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-3-268-279>.
31. Nechaev AP, Samoylov AV, Bessonov VV, Nikolaeva YuV, Tarasova VV, Pilipenko OV. Influence of antioxidants in native and micelled forms on the shelf life of the emulsion fat product. *Problems of Nutrition*. 2020;89(5):101–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10070>.
32. Mamontov AS, Starovoytova KV, Tereshchuk LV, Tarlyun MA. Main quality criteria for milk-and-fat emulsion products. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2016;43(4):36–42. (In Russ.).

Качество и оптимальный срок лежкости капусты белокочанной позднего срока созревания

М. И. Иванова^{ID}, Е. В. Янченко*^{ID}, А. В. Янченко^{ID}, И. И. Вирченко^{ID}



Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства, Верей, Россия

Поступила в редакцию: 06.04.2021

Принята после рецензирования: 25.06.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: elena_0881@mail.ru

© М. И. Иванова, Е. В. Янченко, А. В. Янченко, И. И. Вирченко, 2021

Аннотация.

Введение. Послеуборочная сохраняемость капусты непродолжительна. Поэтому в марте – апреле возникает дефицит ее продукции из-за низкой лежкости и неправильного определения оптимальных сроков реализации. Цель исследования – установить качественные показатели и оптимальный срок лежкости капусты белокочанной позднего срока созревания для дальнейшей разработки технологической схемы конвейера реализации кочанов.

Объекты и методы исследования. 11 позднеспелых сортов образцов капусты белокочанной. Почва под опытами аллювиальная луговая, фон удобрений – $N_{150}P_{150}K_{180}$. Объединенную пробу закладывали в хранилище в деревянные контейнеры емкостью 200–250 кг, в которых послойно размещали 25 предварительно взвешенных и маркированных кочанов. Продукцию хранили в холодильной камере при температуре от 0 до +1 °С и относительной влажности воздуха 90–95 % до 7 месяцев в зависимости от сортаобразца. В конце периода хранения учитывали выход товарной продукции, убыль массы, потери от болезней, в т. ч. по видовому составу.

Результаты и их обсуждение. Наибольший выход продукции после хранения получен у гибридов Герцогиня F_1 (80,4 %), Килатон F_1 (78,6 %) и Бомонд Агро F_1 (77,7 %). Построение криволинейной зависимости общих потерь продукции от сроков хранения позволило выявить оптимальные сроки лежкости (до 5–6 месяцев). Выход товарной продукции положительно тесно связан с содержанием сухого вещества в кочанах ($r = 0,81$), положительно среднее – с содержанием аскорбиновой кислоты ($r = 0,52$), моносахаров ($r = 0,55$) и нитратов ($r = 0,55$). Убыль массы имела отрицательную среднюю связь с содержанием сухого вещества ($r = -0,55$), аскорбиновой кислоты ($r = -0,49$) и нитратов ($r = -0,59$).

Выводы. Оптимальный срок хранения для большинства сортов и гибридов капусты белокочанной – 4–5 месяца. Рентабельное хранение кочанов гибридов отечественной селекции Бомонд Агро F_1 , Герцогиня F_1 , Идиллия F_1 и Килатон F_1 , демонстрирующих значимые результаты импортозамещения, возможно до 5–6 месяцев. Это позволяет обеспечить потребление россиянами капусты белокочанной в зимне-весенний период. Для бесперебойного снабжения населения капустой белокочанной в течение круглого года следует проводить испытания перспективных позднеспелых гибридов с лежкостью кочанов до 7 месяцев.

Ключевые слова. Капуста белокочанная, сорт, гибрид, качество, сохраняемость, потери, болезнеустойчивость, лежкость

Финансирование. Работа выполнена на базе Всероссийского научно-исследовательского института овощеводства – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО) в рамках плана НИР 0595-2019-0069 «Разработать технологическую схему конвейера реализации сортов и гибридов капусты белокочанной».

Для цитирования: Качество и оптимальный срок лежкости капусты белокочанной позднего срока созревания / М. И. Иванова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 690–700. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-690-700>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Quality and Optimal Shelf Life of Late Season Green Cabbage

Maria I. Ivanova^{ID}, Elena V. Yanchenko*^{ID},
Aleksey V. Yanchenko^{ID}, Ivan I. Virchenko^{ID}

All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing, Vereya, Russia

Received: April 06, 2021

Accepted in revised form: June 25, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021

*e-mail: elena_0881@mail.ru



© M.I. Ivanova, E.V. Yanchenko, A.V. Yanchenko, I.I. Virchenko, 2021

Abstract.

Introduction. Green cabbage has a short shelf life. As a result, it becomes scarce by March and April, often due to miscalculated sell-by-date. The research objective was to establish qualitative indicators and optimal shelf life of late season green cabbage.

Study objects and methods. The study featured eleven late season varieties of green cabbage grown in alluvial meadow soil using $N_{150}P_{150}K_{180}$ as fertilizer. The samples (25 cabbage heads) were put in layers into wooden containers with a capacity of 200–250 kg each and stored at $0...+1^{\circ}C$ and a relative humidity of 90–95% for 7 months. By the end of storage, the samples were tested for the yield of marketable products, weight loss, diseases, etc.

Results and discussion. The highest yield belonged to Gertsoginya F_1 (80.4%), Kilaton F_1 (78.6%), and Beaumont Agro F_1 (77.7%). The optimal shelf life did not exceed 5–6 months. The yield of commercial products depended on the solid matter content ($r = 0.81$) and, to a lesser degree, on the average content of ascorbic acid ($r = 0.52$), monosaccharides ($r = 0.55$), and nitrates ($r = 0.55$). The weight loss had a negative mean relationship with the content of solids ($r = -0.55$), ascorbic acid ($r = -0.49$), and nitrates ($r = -0.59$).

Conclusion. The optimal shelf life for most varieties and hybrids of green cabbage proved to be 4–5 months, whereas for Beau Monde Agro F_1 , Gertsoginya F_1 , Idilliya F_1 , and Kilaton F_1 , it was 5–6 months. Further research might reveal hybrids with longer shelf life.

Keywords. White cabbage, variety, hybrid, quality, preservation, losses, disease resistance, keeping quality

Funding. The research was performed on the premises of the All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Farming, branch of the Federal Research Center of Vegetable Farming as part of project No. 0595-2019-0069 “New technological scheme for varieties and hybrids of green cabbage”.

For citation: Ivanova MI, Yanchenko EV, Yanchenko AV, Virchenko II. Quality and Optimal Shelf Life of Late Season Green Cabbage. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):690–700. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-690-700>.

Введение

Растущее в последние годы потребление свежих овощей увеличилось, поэтому возросла потребность рынка в них. Свежие овощи привлекают потребителей и удовлетворяют их стремление к новым натуральным и полезным для здоровья продуктам с минимальной переработкой или отсутствием дополнительной обработки перед употреблением [1].

Капуста белокочанная (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *alba*) используется как сырье для перерабатывающей промышленности, а также в традиционной медицине и в пище. Из-за ее доступности на местных рынках и предпочтений потребителей она является важным источником фитонутриентов в рационе человека. Капуста содержит фитохимические вещества, такие как глюкозинолаты, полифенолы и витамины, а также обладает противораковым, антиоксидантным, противовоспалительным и кардиозащитным эффектом [2–8].

Во всех категориях хозяйств Российской Федерации большая доля производства овощной продукции приходится на капусту белокочанную – самую распространенную из всех разновидностей капусты. Она является главным компонентом в борщевой группе овощей [9, 10].

Однако сохраняется капуста хуже других овощей, поэтому в марте – апреле возникает дефицит ее продукции. Основной причиной, снижающей выход товарной продукции, являются инфекционные болезни, вредоносность которых может превышать 30 %. В большинстве случаев заболеваемость растений капусты белокочанной фитопатогенами происходит в период вегетации, во время уборки и закладки на хранение, а развитие болезней продолжается в течение всего периода хранения. Также поражению фитопатогенами способствуют внесение высоких доз азотных удобрений в период роста растений, неизбежные механические повреждения при обработках, уборке и транспортировке, выращивание восприимчивых к болезням сортов и гибридов капусты белокочанной. Сложный видовой состав, высокая экологическая пластичность и адаптация фитопатогенов к питательному субстрату создают трудности при создании болезнеустойчивых сортов и гибридов капусты белокочанной, диагностике заболеваний и организации защитных мероприятий. Устойчивость капусты к болезням в период хранения определяется сортом или гибридом. Для снижения потерь овощной продукции от болезней в период хранения значение имеет соблюдение и контроль оптимального режима

хранения с учетом групп спелости и физиологического состояния кочанов капусты белокочанной [8, 10].

Высокопродуктивные гибриды капусты белокочанной могут реализовать свой генетический потенциал по продуктивности, качеству и пригодности к длительному хранению только при оптимальном уровне минерального питания [11–13].

Сельхозпроизводители выращивают высокоинтенсивные гибриды зарубежной селекции и применяют самые современные агротехнологии, что обеспечивает высокий уровень урожайности. В России в последние годы созданы новые гибриды капусты белокочанной различных сроков созревания с целью разработки конвейера поступления продукции, не уступающей зарубежной, а даже превосходящей по вкусовым и биохимическим показателям [14]. Однако они недостаточно известны в овощеводческих хозяйствах.

Цель исследования – установить качественные показатели и оптимальный срок лежкости капусты белокочанной позднего срока созревания для дальнейшей разработки технологической схемы конвейера реализации кочанов.

Объекты и методы исследования

Полевые и лабораторные исследования проводили во ВНИИО – филиале ФГБНУ ФНЦО (N 55°36' E 38°1') в 2015–2019 гг. Объектами исследования служили 11 позднеспелых сортов и гибридов капусты белокочанной:

- Бомонд Агро F₁ (ЗАО Агрохолдинг «Поиск», ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства», ООО «Селекционная станция имени Н. Н. Тимофеева»);
- Престиж F₁ (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева);
- Квартет F₁ (ФГБНУ «ВНИИ риса», ООО «Селекционная станция имени Н. Н. Тимофеева»);
- Орион F₁ (ФГБНУ «ВНИИ риса», ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, ООО «Селекционная станция имени Н. Н. Тимофеева»);
- Триумф F₁ (ООО «Селекционная станция имени Н. Н. Тимофеева», ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева);
- Герцогиня F₁ (ЗАО Агрохолдинг «Поиск»);
- Идиллия F₁ (ЗАО Агрохолдинг «Поиск», ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства»);
- Килатон F₁ (Syngenta Seeds B.V., Нидерланды);
- Приморочка и Южанка 31 (ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства»);
- Дмитровский F₁ (ЗАО Агрохолдинг «Поиск», ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства»).

Сорта и гибриды, предназначенные для длительного хранения, выращивали по общепринятой технологии в условиях Нечерноземной зоны РФ.

Почва опытного участка относится к типу аллювиальных луговых насыщенных почв: среднесуглинистая, окультуренная и влагоемкая.

Глубина пахотного слоя составляет 27 см, глубина залегания грунтовых вод более 2 м, pH – 5,5–6,1. Содержание гумуса – 3,5–3,8 %, общего азота – 0,19–0,24 %, нитратного азота – 2–2,8 мг/100 г, подвижного фосфора – 17,6–19,1 мг/100 г, обеспеченность калием – 7–8,2 мг/100 г. Агротехника – общепринятая для Нечерноземной зоны РФ, фон – N₁₅₀ P₁₅₀ K₁₈₀.

Погодные условия в годы проведения исследования характеризовались по-разному: вегетационный период 2015 г. отличался теплой и дождливой погодой в мае – июле, теплым и сухим августом, а также обильными дождями в первой декада сентября; вегетационный период 2016 г. отмечен как жаркий и влажный; весна 2017 г. была прохладная, лето теплое, август и сентябрь жаркими; лето 2018 г. было жарким с небольшим количеством осадков; июнь, август и сентябрь 2019 г. были наиболее засушливыми. Дефицит влаги компенсировали дополнительными поливами.

Уборку кочанов проводили в III декаде октября. Срезанные с опытных делянок кочаны соответствовали требованиям ГОСТ 1724-85. Отобранную с опытных делянок объединенную пробу закладывали в хранилище с искусственным охлаждением в деревянные контейнеры емкостью 200–250 кг. В них послойно размещали не менее 25 предварительно взвешенных и маркированных кочанов. Хранение кочанов осуществляли по общепринятым методикам при температуре от 0 до +1 °C и относительной влажности воздуха 90–95 %, согласно ГОСТ 28373-94, без предварительного охлаждения [15, 16]. Повторность опытов по хранению – трехкратная. При уборке кочанов капусты белокочанной в прохладных условиях их можно заложить на хранение без предварительного охлаждения [17, 18]. Для контроля над соблюдением рекомендуемых режимов хранения использовали срочные термометры, психрометры и термографы. В зависимости от сортообразца кочаны опытных партий хранили до 7 месяцев (210 суток). Перед закладкой кочанов на хранение проводили биохимические анализы качества продукции на определение содержания: сухого вещества – термостатно-весовым методом (высушивание при 105 °C); сахаров – по Бертрану; аскорбиновой кислоты – по Мурри; нитратов – ионометрически по методу ЦИНАО.

В конце периода хранения проводили весовой учет показателей сохраняемости кочанов: выход товарной продукции, убыль массы, потери от болезней, в т. ч. по видовому составу. Образцы по лежкости оценивали по балльной шкале: 5 – 75–80 %, 4 – 70–74 %, 3 – 60–69 %. Оценку интенсивности поражения кочанов серой гнилью проводили с использованием балльной шкалы: 0 – поражение отсутствует; 1 – поражено менее 1/8 поверхности кочана; 2 – поражено от 1/8 до 1/4 поверхности кочана; 3 – поражено от 1/4 до 1/2 поверхности

кочана; 4 – поражено от 1/2 до 3/4 поверхности кочана; 5 – поражена вся поверхность кочана. Для учета слизистого бактериоза применяли балльную шкалу: 0 – поражение отсутствует; 1 – поражено до 10 % поверхности кочана; 2 – поражено от 11 до 25 % поверхности кочана; 3 – поражено от 26 до 50 % поверхности кочана; 4 – поражено свыше 50 % поверхности кочана [19]. Суммарные потери массы кочанов капусты от болезней за период хранения при завершении опыта определяли по формуле: $P = A - B/A \cdot 100$, где P – потеря массы кочанов, %; A – масса кочанов в начале хранения, кг; B – масса кочанов в конце хранения, кг.

Статистическую обработку проводили методом дисперсионного анализа с помощью пакета прикладных программ Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

Капуста белокочанная является экономически важным источником пищевых и биологически активных соединений (антиоксидантных и антиканцерогенных). Дисахара распадаются в процессе хранения на моносахара и используются кочанами при дыхании. Вследствие этого образуется энергия для других процессов жизнедеятельности (например, дифференциации точек роста). Сухие вещества включают клетчатку, пектиновые вещества, гемицеллюлозу, углеводы, минеральные вещества и азотистые соединения. Сорта и гибриды с более высоким содержанием сухих веществ и дисахаров хранятся лучше, чем с пониженной концентрацией [2]. Данные биохимического анализа после уборки можно использовать для прогнозирования лежкости кочанов.

Результаты биохимических анализов кочанов после уборки показали, что наибольшее содержание

сухого вещества отмечено у гибридов Герцогиня F_1 (12,6 %), Килатон F_1 (12,2 %) и Престиж F_1 (11,5 %) (табл. 1).

Повышенное содержание суммы сахаров отмечено у гибридов Идиллия F_1 (5,54 %), Герцогиня F_1 (5,41 %), Дмитровский F_1 (5,17 %). Высокая концентрация моносахаров у гибридов Герцогиня F_1 (4,22 %) и Дмитровский F_1 (4,22 %).

Наименьшее содержание нитратов отмечено у гибрида Орион F_1 (104 мг/кг), а наибольшее – у Валентина F_1 (484 мг/кг) при ПДК для капусты белокочанной в 500 мг/кг. Норма содержания нитратов установлена в ТР ТС 021/2011.

Наибольшее содержание аскорбиновой кислоты зафиксировано у сортов Квартет F_1 (30,4 мг/100 г), Престиж F_1 (29,3 мг/100 г) и Идиллия F_1 (29,1 мг/100 г).

Сохраняемость кочанов после 7 месяцев хранения: 5 баллов (75–80 %) у гибридов Герцогиня F_1 , Килатон F_1 , Бомонд Агро F_1 , Идиллия F_1 , Престиж F_1 , Валентина F_1 ; 4 балла (70–74 %) – Триумф F_1 и Дмитровский F_1 ; 3 балла (60–69 %) – Квартет F_1 и Орион F_1 , сорта Южанка 31 и Приморочка.

В процессе хранения происходит постепенное снижение фитонутриентов в кочанах капусты белокочанной. Расход сахаров в кочанах по истечении 7 месяцев хранения может составлять до 48,8 %, витамина С – до 13,5–25,6 % [9, 10].

В полевых условиях распространенность болезней может достигать 70–80 % от всей популяции растений, а урожайность снижается в ряде случаев на 80–98 % в зависимости от погодных условий и фитосанитарного состояния посевов [20].

Серую гниль капусты вызывает некротрофный несовершенный гриб *Botrytis cinerea* Pers. Серая гниль является вредоносным заболеванием в период

Таблица 1. Биохимические показатели сортообразцов капусты белокочанной во время уборки, среднее за 2015–2019 гг.

Table 1. Biochemical indicators of green cabbage varieties during harvesting, mean for 2015–2019

Сорт, гибрид	Сухое вещество, %	Сахара, %			Нитраты, мг/кг	Аскорбиновая кислота, мг/100 г
		Сумма	Моно-	Ди-		
Бомонд Агро F_1	10,1	4,74	3,64	1,10	329	27,5
Валентина F_1 (контроль)	10,9	3,6	2,95	0,65	484	27,2
Герцогиня F_1	12,6	5,41	4,22	1,19	156	29,0
Дмитровский F_1	10,1	5,17	4,22	0,95	260	28,5
Идиллия F_1	10,8	5,54	4,05	1,49	245	29,1
Квартет F_1	9,2	4,98	3,88	1,10	145	30,4
Килатон F_1	12,2	4,37	3,75	0,62	258	26,0
Орион F_1	10,8	4,36	3,28	1,08	104	27,3
Престиж F_1	11,5	4,65	3,74	0,91	431	29,3
Приморочка	8,8	3,78	2,81	0,97	135	23,2
Триумф F_1	9,8	3,80	3,40	0,40	214	25,4
Южанка 31	9,2	3,70	3,00	0,70	216	24,2

Таблица 2. Выход товарной продукции и потери (% к исходной массе продукции) в период хранения позднеспелых сортов капусты белокочанной с октября по апрель (2015–2019 гг.)

Table 2. Yield of marketable products and losses (% of initial mass) from October to April (2015–2019)

Сорт, гибрид	Выход товарной продукции	Потери				
		Всего	Убыль массы	От болезней	По видам болезней	
					Серая гниль (<i>Botrytis cinerea</i>)	Сосудистый бактериоз (<i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>campestris</i>)
Валентина F ₁ (контроль)	75,9	24,1	20,4	3,7	0,5	3,2
Бомонд Агро F ₁	77,7	22,3	18,1	4,2	2,0	2,2
Герцогиня F ₁	80,4	19,6	19,6	0,0	0,0	0,0
Дмитровский F ₁	70,4	29,6	23,2	6,4	1,1	5,3
Идиллия F ₁	76,6	23,4	19,4	3,7	0,5	3,2
Квартет F ₁	68,3	31,7	23,9	7,8	0,5	7,3
Килатон F ₁	78,6	23,2	23,2	0,0	0,0	0,0
Орион F ₁	65,6	34,4	24,5	9,9	9,9	0,0
Престиж F ₁	76,0	24,0	22,1	1,9	0,0	1,9
Приморочка	60,3	39,7	26,1	13,6	13,6	0,0
Триумф F ₁	72,0	28,0	22,3	5,7	5,7	0,0
Южанка 31	64,9	35,1	25,2	9,9	7,9	2,0
НСР ₀₅	2,9	–	–	–	–	–

хранения кочанов. Иногда в условиях повышенной влажности почвы и атмосферы болезнь развивается в поле [21]. Пораженные растения загнивают и покрываются пепельно-серым пушистым налетом. Эти симптомы появляются на тканях с механическими повреждениями и проникают вглубь кочана [22]. В поле серая гниль развивается на физиологических растрескиваниях [23]. В исследовании отмечено снижение выхода товарной продукции из-за нарастания потерь от болезней. Наибольшие потери от серой гнили отмечены у гибрида Приморочка F₁ – 13,6 %. У гибридов первого поколения Валентина F₁ (контроль), Идиллия F₁ и Квартет F₁ этот показатель составил 0,5 %. Не выявлено признаков болезней на кочане у гибридов Герцогиня F₁ и Килатон F₁ (табл. 2). Отмечено, что в начале хранения кочаны почти не поражаются серой гнилью. Сильное поражение этой болезнью зафиксировано в конце хранения. Устойчивость отдельных листьев в кочане различна: чем ближе расположен лист к верхушечной почке, тем меньше он поражается болезнями.

К наиболее вредоносным заболеваниям относится сосудистый бактериоз капусты, вызываемый *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (Pammel) Dowson [24]. Возбудитель сохраняется в семенах, растительных остатках и сорных растениях семейства Капустные. В открытом грунте распространение патогена происходит с дождем, ветром, поливной водой, машинами по уходу за растениями, а при выращивании рассады за счет верхнего полива в теплице. Возбудитель проникает в растение через гидатоды и раны и колонизирует его сосудистую

систему, вызывая V-образные хлорозы на периферии листовой пластинки, некрозы жилок листа и кочерыги. Снижается урожай, качество и товарный вид свежей продукции, ухудшается лежкость в период хранения кочанов [25]. Патоген способен снижать урожай капусты до 50 % в условиях теплой и влажной погоды. Также встречаются сообщения о полной гибели урожая [26]. В исследовании сортаобразцы капусты белокочанной поражались сосудистым бактериозом в меньшей степени. В среднем потери от него составляли 2,3 %. Абсолютно устойчивыми к патогенам были гибриды Герцогиня F₁ и Килатон F₁, которые не подвергались болезням во время хранения. Потери при хранении обусловлены естественной убылью массы (табл. 2).

Несмотря на температуру 5 °С, ограничивающую рост *X. campestris* pv. *campestris*, увеличение возникновения этого возбудителя после хранения наблюдали и в настоящем исследовании. Это согласуется с данными, полученными в предыдущем исследовании [27].

ГОСТ 28373-94 (ИСО 2167-81) регламентирует срок лежкости кочана капусты белокочанной продолжительностью хранения, в течение которого общие потери составляют не более 15 %.

На рисунке 1 представлена доля выхода товарной продукции и разных видов потерь (от болезней и убыли массы) у сортов и гибридов капусты белокочанной позднего срока созревания. В среднем выход товарной продукции составил 72,2 %. При этом убыль массы отмечена на уровне 22,2 %, а потери от болезней – 5,6 %. Естественное снижение

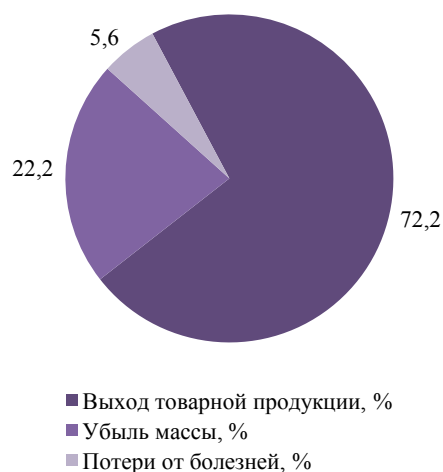


Рисунок 1. Средняя сохраняемость кочанов позднеспелых сортообразцов капусты белокочанной, (% к исходной массе продукции) в период хранения с октября по апрель (2015–2019 гг.)

Figure 1. Average storage quality of cabbage heads (% to initial mass) from October to April (2015–2019)

массы кочанов капусты при хранении произошло в результате испарения воды и потери растворимых сухих веществ в процессе дыхания. Принято считать, что две трети и более убыли массы плодовоовощной продукции при хранении приходится на испарение воды и до одной третьей – на расходование органических веществ.

На кочанах капусты белокочанной начало проявления болезни определяется ее видовой принадлежностью и этиологией, а степень нарастания потерь – характеристикой лежкоспособности образца, устойчивостью к конкретной болезни и сезонным сроком хранения.

Корреляционный анализ показал, что выход товарной продукции положительно тесно связан с содержанием сухого вещества в кочанах ($r = 0,81$), положительно средне – с содержанием аскорбиновой кислоты ($r = 0,52$), моносахаров ($r = 0,55$) и нитратов ($r = 0,55$). Убыль массы имела отрицательную среднюю связь с содержанием сухого вещества ($r = -0,55$), аскорбиновой кислоты ($r = -0,49$) и нитратов ($r = -0,59$) (табл. 3).

Таблица 3. Корреляционная зависимость между сохраняемостью различных позднеспелых сортов и гибридов капусты белокочанной и биохимическим составом кочанов в период уборки

Table 3. Effect of biochemical composition of cabbage variety during harvesting on storage quality

Показатели сохраняемости	Коэффициент корреляции (r)					
	Сухое вещество	Аскорбиновая кислота	Сумма сахаров	Моносахара	Дисахара	Нитраты
Выход товарной продукции	0,81	0,52	0,42	0,55	0,06	0,55
Убыль массы	-0,55	-0,49	-0,33	-0,35	-0,20	-0,59
Потери от болезней, в т. ч.:	-0,85	-0,51	-0,46	-0,62	-0,02	-0,48
серая гниль	-0,57	-0,76	-0,63	-0,76	-0,19	-0,49
сосудистый бактериоз	-0,38	0,59	0,43	0,40	0,33	0,12

Таблица 4. Уравнения регрессии общих потерь при хранении капусты белокочанной

Table 4. Total losses during storage: regression equations

Сорт, гибрид	Уравнение регрессии общих потерь (y)	Критерий существенности	Срок лежкости, не менее мес. (x)
Валентина F_1 (контроль)	$y = 0,1725x^3 - 1,2057x^2 + 3,8396x - 2,9217$	0,9994	5
Бомонд Агро F_1	$y = 0,3188x^3 - 2,9146x^2 + 8,8367x - 6,688$	0,9859	5
Герцогиня F_1	$y = 0,078x^4 - 0,9874x^3 + 4,3667x^2 - 6,6251x + 3,2429$	0,998	5
Дмитровский F_1	$y = 0,2144x^3 - 1,4826x^2 + 4,583x - 3,448$	0,9995	4
Идиллия F_1	$y = 0,1098x^4 - 1,4316x^3 + 6,515x^2 - 10,58x + 5,4664$	0,9985	5
Квартет F_1	$y = 0,231x^3 - 1,5887x^2 + 4,8404x - 3,621$	0,9995	4
Килатон F_1	$y = 0,0931x^4 - 1,1913x^3 + 5,2801x^2 - 8,0262x + 3,8871$	0,9992	5
Орион F_1	$y = 0,2526x^3 - 1,7253x^2 + 5,1498x - 3,8207$	0,9995	4
Престиж F_1	$y = 0,1693x^3 - 1,199x^2 + 3,9515x - 3,0447$	0,9993	5
Приморочка	$y = 0,1389x^3 - 0,2189x^2 + 1,9737x - 1,8903$	0,9995	3
Триумф F_1	$y = 0,2024x^3 - 1,4021x^2 + 4,3606x - 3,2884$	0,9995	4
Южанка 31	$y = 0,2575x^3 - 1,7602x^2 + 5,269x - 3,9137$	0,9995	4

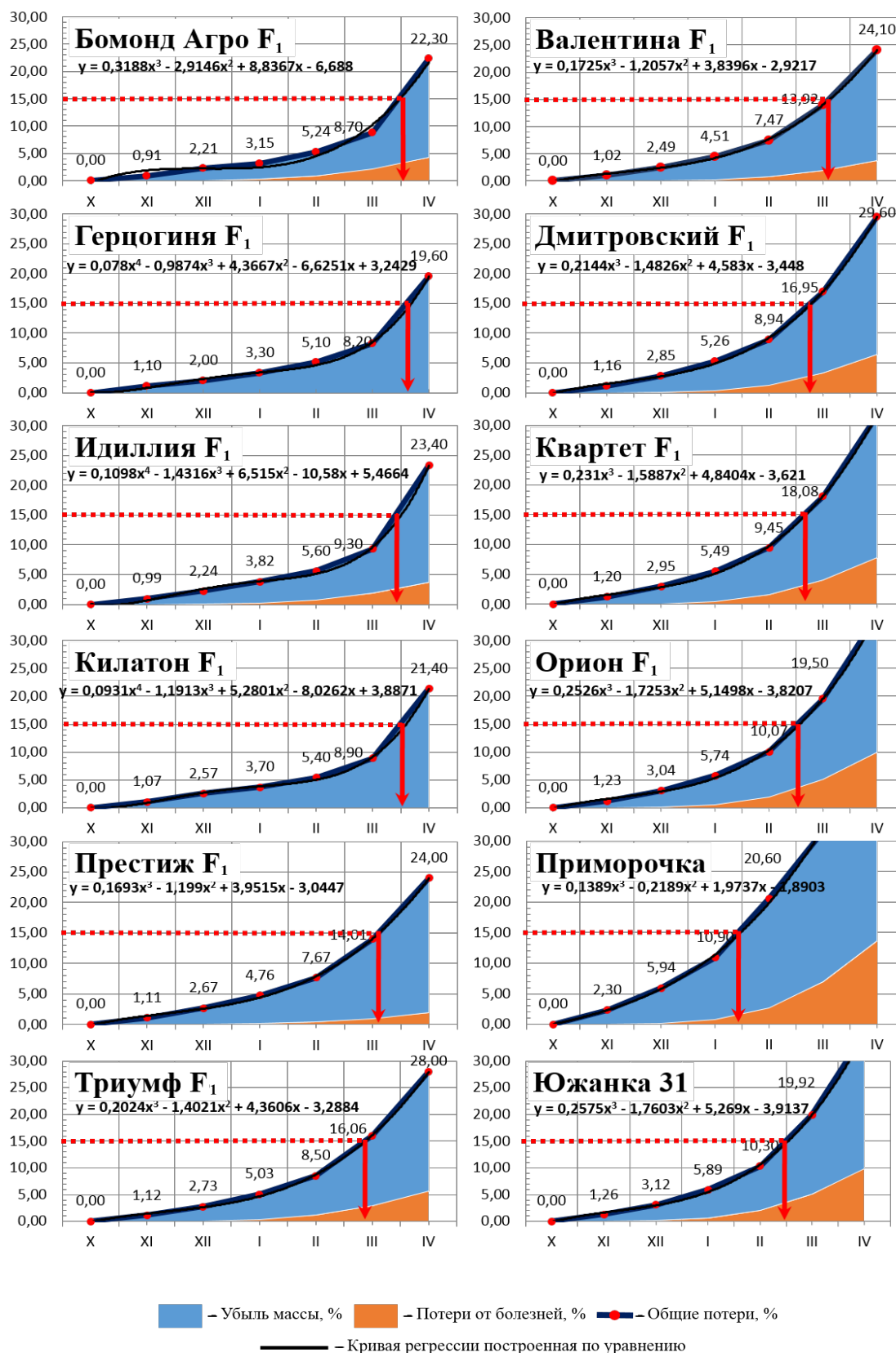


Рисунок 2. Общие потери при хранении кочанов различных сортов и гибридов капусты белокочанной позднего срока созревания, % (2015–2019 гг.)

Figure 2. Total losses during storage according to variety, % (2015–2019)

Выявлена зависимость проявления отдельных видов болезней от биохимических показателей качества кочанов: серая гниль – отрицательная тесная связь между содержанием аскорбиновой кислоты ($r = -0,76$) и моносахаров ($r = -0,76$), отрицательная средняя связь с сухим веществом ($r = -0,57$), суммой сахаров ($r = -0,63$) и нитратов ($r = -0,49$); сосудистый бактериоз – положительная средняя связь с содержанием аскорбиновой кислоты ($r = 0,59$), суммы сахаров ($r = 0,43$) и моносахаров ($r = 0,40$).

Для установления рациональных сроков хранения и реализации в торговой сети кочанов капусты белокочанной позднего срока созревания руководствовались сроком лежкости, определяемым продолжительностью хранения, в течение которого общие потери (от естественной убыли массы и порчи кочанов) составляют не более 15 %. Путем ежемесячного контроля над качеством хранимой продукции и весового учета потерь от болезней по их видовому составу построены графики криволинейной регрессии и определены уравнения регрессии для их расчета (табл. 4). Они наглядно позволяют определить оптимальные сроки реализации продукции кочанов современных сортов и гибридов позднеспелой капусты белокочанной (рис. 2).

Установлено, что рентабельное хранение гибридов Бомонд Агро F₁, Герцогиня F₁, Идиллия F₁ и Килатон F₁ возможно до конца марта – начало апреля (общие потери составляли 19–23 %); сортотипы Престиж F₁, Триумф F₁, Валентина F₁, Дмитровский F₁, Квартет F₁ и Орион F₁ возможно хранить до конца марта (потери в этот период не более 20 %); сорта Приморочка и Южанка 31 – только до января – февраля. При преодолении 15 % порога общих потерь экономическая рентабельность хранения начинает быстро снижаться.

Следует отметить, что современные позднеспелые гибриды капусты белокочанной превосходят сорта по выровненности и устойчивости к болезням в процессе зимнего хранения. Это сказалось на оптимальных сроках хранения позднеспелой капусты белокочанной.

Выводы

Бесперебойное снабжение населения капустой белокочанной в течение круглого года возможно при организации длительного хранения. При выращивании капусты белокочанной на аллювиальных луговых

почвах Замоскворецкой поймы длительное хранение кочанов с минимальными потерями возможно при соблюдении технологии закладки и хранения продукции с учетом биологических особенностей культуры и сроков лежкости конкретных сортов и гибридов. По всем изученным сортотипам выход товарной продукции составил 72,2 %, убыль массы – 22,2 %, потери от болезней – 5,6 %, в т. ч. от сосудистого бактериоза (2,3 %) и серой гнили (4,1 %). Выход товарной продукции положительно тесно связан с содержанием сухого вещества в кочанах ($r = 0,81$), положительно средне – с содержанием аскорбиновой кислоты ($r = 0,52$), моносахаров ($r = 0,55$) и нитратов ($r = 0,55$). Отечественные гибриды интенсивного типа (Герцогиня F₁, Бомонд Агро F₁, Идиллия F₁) не уступают зарубежным по сохраняемости. Абсолютно устойчивы к патогенам гибриды Герцогиня F₁ и Килатон F₁, которые не подвергались болезням во время хранения. Потери при хранении обусловлены исключительно естественной убылью массы. Оптимальный срок хранения для большинства сортов и гибридов капусты белокочанной – 4–5 месяца. Рентабельное хранение кочанов гибридов Бомонд Агро F₁, Герцогиня F₁, Идиллия F₁ и Килатон F₁ возможно до конца марта – начало апреля.

Критерии авторства

М. И. Иванова руководила проектом и внесла существенный вклад в разработку концепции работы. Е. В. Янченко, А. В. Янченко, И. И. Вирченко занимались сбором, анализом, интерпретацией полученных данных и написанием статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

M.I. Ivanova supervised the project and developed the research concept. E.V. Yanchenko, A.V. Yanchenko, and I.I. Virchenko collected, analyzed, and interpreted the data, as well as contributed to the content of the article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Овощи в системе обеспечения продовольственной безопасности России / А. В. Солдатенко [и др.] // Овощи России. 2019. Т. 46. № 2. С. 9–15. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-2-9-15>.
2. Physicochemical quality changes in Chinese cabbage with storage period and temperature: A review / J.-Y. Shim [et al.] // Journal of Biosystems Engineering. 2016. Vol. 41. № 4. P. 373–388. <https://doi.org/10.5307/JBE.2016.41.4.373>.
3. Quantitative analysis of glucosinolate content in Chinese cabbages under different storage conditions / D.-G. Kim [et al.] // Journal of Biosystems Engineering. 2020. Vol. 45. № 2. P. 57–64. <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00044-z>.

4. Statistical modeling for estimating glucosinolate content in Chinese cabbage by growth conditions / D.-G. Kim [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2018. Vol. 98. № 9. P. 3580–3587. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8874>.
5. Effect of cold storage on the contents of glucosinolates in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. Ssp. *Pekinensis*) / D. S. Lee [et al.] // South Indian Journal of Biological Sciences. 2015. Vol. 1. P. 38–42.
6. Effect of CPPU on postharvest attributes of Chinese flowering cabbage during storage / F. Li [et al.] // Postharvest Biology and Technology. 2021. Vol. 174. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111438>.
7. Šamec D., Pavlović I., Salopek-Sondi B. White cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *alba*): botanical, phytochemical and pharmacological overview // Phytochemistry Reviews. 2017. Vol. 16. № 1. P. 117–135. <https://doi.org/10.1007/s11101-016-9454-4>.
8. Монахос Г. Ф., Во Тхи Н. Х., Джалилов Ф. С.-У. Проявление симптомов сосудистого бактериоза у капустных растений с различными генами устойчивости в зависимости от концентрации инокулюма *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2015. № 1. С. 26–34.
9. Вирченко И. И., Янченко Е. В. Результаты сортоиспытания среднепоздних сортов и гибридов капусты белокочанной и их лежкоспособность // Картофель и овощи. 2021. № 1. С. 21–24. <https://doi.org/10.25630/PAV.2021.57.43.001>.
10. Биологические и технологические аспекты хранения овощей и плодов / В. А. Борисов [и др.]. М.: РГАУ – МСХА, 2019. 232 с.
11. Кузнецова Т. А., Кашнова Е. В. Влияние удобрений на сохраняемость капусты белокочанной в условиях Западной Сибири // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. Т. 171. № 1. С. 15–20.
12. Влияние макро- и микроэлементов на урожайность и качество капусты белокочанной в условиях Лесостепи Западной Сибири / Н. В. Гоман [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2019. Т. 146. № 5. С. 9–15.
13. Королева С. В., Дякунчак С. А., Юрченко С. А. Создание гибридов F₁ капусты белокочанной с комплексной устойчивостью на юге России // Овощи России. 2019. Т. 48. № 4. С. 16–20. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-4-16-20>.
14. Продуктивности, качество и сохраняемость сортов и гибридов капусты белокочанной разных групп спелости / А. Р. Бебрис [и др.] // Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. 2020. Т. 29. С. 95–100. <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2020-29-95-100>.
15. Методические указания по проведению научно-исследовательских работ по хранению овощей. М.: ВАСХНИЛ, 1982. 34 с.
16. Литвинов С. С. Методика полевого опыта в овощеводстве. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства, 2011. 648 с.
17. Tuma R., Goliáš J. Half-cooling time of cabbage stored in a refrigerated room // Horticultural Science. 2020. Vol. 47. № 2. P. 93–99. <https://doi.org/10.17221/136/2018-HORTSCI>.
18. Geeson J. D., Browne K. M. Controlled atmosphere storage of winter white cabbage // Annals of Applied Biology. 1980. Vol. 95. № 2. P. 267–272. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1980.tb04746.x>.
19. Методы диагностики возбудителей заболеваний овощных культур / Д. З. Богоутдинов [и др.]. М.: Росинформротех, 2020. 116 с.
20. Инфекционные болезни растений: этиология, современное состояние, проблемы и перспективы защиты растений / П. А. Назаров [и др.] // Acta Naturae. 2020. Т. 12. № 3. С. 46–59. <https://doi.org/10.32607/actanaturae.11026>.
21. Increased phenylalanine levels in plant leaves reduces susceptibility to *Botrytis cinerea* / M. Oliva [et al.] // Plant Science. 2020. Vol. 290. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110289>.
22. Regulation of conidiation in *Botrytis cinerea* involves the light-responsive transcriptional regulators BcLTF3 and BcREG1 / B. Brandhoff [et al.] // Current Genetics. 2017. Vol. 63. № 5. P. 931–949. <https://doi.org/10.1007/s00294-017-0692-9>.
23. Lignin-based barrier restricts pathogens to the infection site and confers resistance in plants / M.-H. Lee [et al.] // EMBO Journal. 2019. Vol. 38. № 23. <https://doi.org/10.15252/embj.2019101948>.
24. Vicente J. G., Holub E. B. *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (cause of black rot of crucifers) in the genomic era is still a worldwide threat to brassica crops // Molecular Plant Pathology. 2013. Vol. 14. № 1. P. 2–18. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00833.x>.
25. Орынбаев А. Т., Джалилов Ф. С.-У., Монахос Г. Ф. Методы оценки и характер наследования стеблевой устойчивости к сосудистому бактериозу у белокочанной капусты // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 45–55.
26. Colonization of siliques and seeds of rapid cycling *Brassica oleracea* plants by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* after spray-inoculation of flower clusters / J. van der Wolf [et al.] // European Journal of Plant Pathology. 2019. Vol. 154. № 2. P. 445–461. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01668-4>.
27. The change of bacterial spectrum after storage of *X. campestris* pv. *campestris* inoculated cabbage heads (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) / L. Ragasová [et al.] // Agronomy. 2020. Vol. 10. № 3. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030443>.

References

1. Soldatenko AV, Razin AF, Pivovarov VF, Shatilov MV, Ivanova MI, Rossinskaya OV, et al. Vegetables in the system of ensuring food security of Russia. *Vegetable Crops of Russia*. 2019;46(2):9–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-2-9-15>.
2. Shim J-Y, Kim D-G, Park J-T, Kandpal LM, Hong S, Cho B-K, et al. Physicochemical quality changes in Chinese cabbage with storage period and temperature: A review. *Journal of Biosystems Engineering*. 2016;41(4):373–388. <https://doi.org/10.5307/JBE.2016.41.4.373>.
3. Kim D-G, Park K, Park J-T, Lee W-H. Quantitative analysis of glucosinolate content in Chinese cabbages under different storage conditions. *Journal of Biosystems Engineering*. 2020;45(2):57–64. <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00044-z>.
4. Kim D-G, Shim J-Y, Ko M-J, Chung S-O, Chowdhury M, Lee W-H. Statistical modeling for estimating glucosinolate content in Chinese cabbage by growth conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018;98(9):3580–3587. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8874>.
5. Lee DS, Jeon DS, Park SG, Arasu MV, Al-Dhabi NA, Kim SC, et al. Effect of cold storage on the contents of glucosinolates in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. Ssp. *Pekinensis*). *South Indian Journal of Biological Sciences*. 2015;1:38–42.
6. Li F, Huang H, Ding X, Liu J, He M, Shan Y, et al. Effect of CPPU on postharvest attributes of Chinese flowering cabbage during storage. *Postharvest Biology and Technology*. 2021;174. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111438>.
7. Šamec D, Pavlović I, Salopek-Sondi B. White cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *alba*): botanical, phytochemical and pharmacological overview. *Phytochemistry Reviews*. 2017;16(1):117–135. <https://doi.org/10.1007/s11101-016-9454-4>.
8. Monakhos GF, Vo Thi NH, Dzhililov FS-U. Plant reaction to various inoculum concentrations of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in black rot resistant brassicas. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2015;(1):26–34. (In Russ.).
9. Virchenko II, Yanchenko EV. Results of variety testing of medium-late varieties and hybrids of white cabbage and their keeping capacity. *Potato and Vegetables*. 2021;(1):21–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.25630/PAV.2021.57.43.001>.
10. Borisov VA, Maslovskiy SA, Soldatenko AV, Zamyatina ME. *Biologicheskie i tekhnologicheskie aspekty khraneniya ovoshchey i plodov* [Biological and technological aspects of storage of vegetables and fruits]. Moscow: RGAU – MAA; 2019. 232 p. (In Russ.).
11. Kuznetsova TA, Kashnova YeV. The influence of fertilizers on storage life of white cabbage under the conditions of West Siberia. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2019;171(1):15–20. (In Russ.).
12. Goman NB, Voronkova NA, Volkova VA, Tsyganova NA. The influence of macro- and micronutrients on the yield and quality of white cabbage in the conditions of forest-steppe of Western Siberia. *Bulletin of KSAU*. 2019;146(5):9–15. (In Russ.).
13. Koroleva SV, Dyakunchak SA, Yurchenko SA. Development of F₁ hybrids of cabbage with complex resistance in the south of Russia. *Vegetable Crops of Russia*. 2019;48(4):16–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-4-16-20>.
14. Bebris AR, Virchenko II, Yanchenko EV, Yanchenko AV. Productivity, quality and preservation of varieties and hybrids of white cabbage of different groups of ripeness. *Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo federal'nogo nauchnogo tsentra sadovodstva, vinogradarstva, vinodeliya* [Scientific works of the North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking]. 2020;29:95–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2020-29-95-100>.
15. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu nauchno-issledovatel'skikh rabot po khraneniyu ovoshchey* [Methodical instructions for research on the storage of vegetables]. Moscow: VASKHNIL; 1982. 34 p. (In Russ.).
16. Litvinov SS. *Metodika polevogo opyta v ovoshchevodstve* [Field experiments in vegetable farming]. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing; 2011. 648 p. (In Russ.).
17. Tüma R, Goliáš J. Half-cooling time of cabbage stored in a refrigerated room. *Horticultural Science*. 2020;47(2):93–99. <https://doi.org/10.17221/136/2018-HORTSCI>.
18. Geeson JD, Browne KM. Controlled atmosphere storage of winter white cabbage. *Annals of Applied Biology*. 1980;95(2):267–272. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1980.tb04746.x>.
19. Bogoutdinov DZ, Fominykh TS, Kastal'eva TB, Girsova NV, Pavlovskaya NE, Gagarina IV, et al. *Metody diagnostiki vzbuditeley zabolevaniy ovoshchnykh kul'tur* [Diagnosing causative agents of diseases of vegetables]. Moscow: Rosinformagrotekh; 2020. 116 p. (In Russ.).
20. Nazarov PA, Baleev DN, Ivanova MI, Sokolova LM, Karakozova MV. Infectious plant diseases: Etiology, current status, problems and prospects in plant protection. *Acta Naturae*. 2020;12(3):46–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.32607/actanaturae.11026>.
21. Oliva M, Hatan E, Kumar V, Galsurker O, Nisim-Levi A, Ovadia R, et al. Increased phenylalanine levels in plant leaves reduces susceptibility to *Botrytis cinerea*. *Plant Science*. 2020;290. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110289>.
22. Brandhoff B, Simon A, Dornieden A, Schumacher J. Regulation of conidiation in *Botrytis cinerea* involves the light-responsive transcriptional regulators BcLTF3 and BcREG1. *Current Genetics*. 2017;63(5):931–949. <https://doi.org/10.1007/s00294-017-0692-9>.

23. Lee M-H, Jeon HS, Kim SH, Chung JH, Roppolo D, Lee H-J, et al. Lignin-based barrier restricts pathogens to the infection site and confers resistance in plants. *EMBO Journal*. 2019;38(23). <https://doi.org/10.15252/embj.2019101948>.
24. Vicente JG, Holub EB. *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (cause of black rot of crucifers) in the genomic era is still a worldwide threat to brassica crops. *Molecular Plant Pathology*. 2013;14(1):2–18. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00833.x>.
25. Orynbayev AT, Dzhalilov FS-U, Monakhos GF. Evaluation methods and inheritance pattern of stem resistance to black rot in white cabbage. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2019;(1):45–55. (In Russ.).
26. van der Wolf J, Kastelein P, da Silva Júnior TAF, Lelis FV, van der Zouwen P. Colonization of siliques and seeds of rapid cycling *Brassica oleracea* plants by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* after spray-inoculation of flower clusters. *European Journal of Plant Pathology*. 2019;154(2):445–461. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01668-4>.
27. Ragasová L, Peňázová E, Gazdík F, Pečenka J, Čechová J, Pokluda R, et al. The change of bacterial spectrum after storage of *X. campestris* pv. *campestris* inoculated cabbage heads (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.). *Agronomy*. 2020;10(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy10030443>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-701-711>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Использование пряного растительного сырья в технологии заварного полуфабриката



А. В. Копылова¹, Н. И. Давыденко^{2,*},
А. Н. Сапожников¹, Г. С. Ульянова²

¹ Новосибирский государственный технический университет^{ROR}, Новосибирск, Россия

² Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 09.09.2021

Принята после рецензирования: 30.09.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: nat1861@yandex.ru



© А. В. Копылова, Н. И. Давыденко, А. Н. Сапожников, Г. С. Ульянова, 2021

Аннотация.

Введение. Полуфабрикат заварной характеризуется низким содержанием макро- и микронутриентов, в т. ч. витаминов и минеральных веществ. Это определяет актуальность исследований по улучшению его пищевой ценности за счет применения растительного сырья. Целью работы является оценка возможностей применения пряного растительного сырья в производстве заварного полуфабриката и разработка технологии его использования.

Объекты и методы исследования. Свежее пряное растительное сырье: петрушка (*Petroselinum crispum*), базилик (*Ocimum*), сельдерей (*Arium*) листовой и черешковый; порошок инфракрасной (ИК) сушки черешков сельдерея; образцы полуфабриката заварного «Шу» с использованием вышеуказанных ингредиентов. Использовали общепринятые и стандартные методы исследований органолептических и физико-химических показателей, а также пищевой ценности мучных изделий.

Результаты и их обсуждение. Исследовали возможность введения в тесто пряных растений. В качестве контрольного образца использовали полуфабрикат заварной «Шу» с кракелином традиционной рецептуры. Введение пряного растительного сырья в свежем виде ухудшает органолептические характеристики продукта. Вкусоароматический профиль черешков сельдерея позволяет получить гармоничные сенсорные характеристики изделий из заварного теста. Для формирования показателей качества внешнего вида изделий черешки сельдерея добавляли в виде порошка ИК-сушки в количестве 2,5, 5,0 и 7,5 % от массы пшеничной муки. Внесение порошка из черешков сельдерея придает вкусу полуфабриката кислые и пряные оттенки, а в готовом изделии повышается содержание витаминов группы В (до 10 %) и β-каротина (до 70 %).

Выводы. Доказана целесообразность использования порошка сельдерея ИК-сушки в производстве заварного полуфабриката в количестве 5 % от массы муки. Внесение порошка ИК-сушки сельдерея в заварное тесто способствует увеличению содержания в нем витамина В₂ и бета-каротина. Целесообразно продолжить исследования в направлении введения порошка в состав начинки с целью комплексного улучшения нутриентного статуса кондитерского изделия в комбинации с ингредиентами, маскирующими нежелательные привкусы, свойственные черешкам сельдерея.

Ключевые слова. Сельдерей, растительные порошки, ИК-сушка, кондитерское изделие, органолептические характеристики

Для цитирования: Использование пряного растительного сырья в технологии заварного полуфабриката / А. В. Копылова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 701–711. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-701-711>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Spicy Plant Raw Materials in Choux Dough

Anastasiia V. Kopylova¹, Nataliia I. Davydenko^{2,*},
Aleksandr N. Sapozhnikov¹, Galina S. Ulianova²

¹ Novosibirsk State Technical University^{ROR}, Novosibirsk, Russia

² Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: September 09, 2021

Accepted in revised form: September 30, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021

*e-mail: nat1861@yandex.ru



© A.V. Kopylova, N.I. Davydenko, A.N. Sapozhnikov, G.S. Ulianova, 2021

Abstract.

Introduction. Semi-finished choux dough has neither vitamins nor minerals. However, its nutritional value can be increased by adding vegetable raw materials. The research objective was to evaluate the possibilities of using spicy vegetable raw materials in the formulation of semi-finished choux dough.

Study objects and methods. The study featured fresh parsley (*Petroselinum crispum*), basil (*Ocimum*), celery (*Apium*) leaves and stems, and IR-dried powder of celery stalks. Standard research methods were used to determine the sensory, physico-chemical, and nutritional properties of the resulting choux samples.

Results and discussion. Classical semi-finished choux dough with craquelin served as control sample. Fresh spicy vegetable raw materials degraded the sensory characteristics of the product. However, powdered celery stalks did not interfere with the taste of the choux dough. They were added in the amount of 2.5, 5.0, and 7.5% by weight of wheat flour. The celery powder gave the dough a sour-spicy flavor, as well as increased the content of vitamins B (up to 10%) and beta-carotene (up to 70%) in the finished product.

Conclusion. The sample with 5% of IR-dried celery powder proved optimal for choux dough. It increased the content of vitamin B₂ and beta-carotene, thus improving the nutritional value of the semi-finished product. In future, the powder can be tested as part of bakery filling in combination with ingredients that mask the typical celery taste.

Keywords. Celery, vegetable powders, IR drying, confectionery, organoleptic characteristics

For citation: Kopylova AV, Davydenko NI, Sapozhnikov AN, Ulianova GS. Spicy Plant Raw Materials in Choux Dough. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):701–711. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-701-711>.

Введение

Изделия из пшеничной муки являются неотъемлемой частью рациона населения России, пользуются стабильным спросом и представлены в широком ассортименте на потребительском рынке страны. Особое место среди них занимают мучные кондитерские изделия. Не являясь продуктом первой необходимости и обладая разным нутриентным составом, они занимают существенную и постоянную долю в рационе россиян.

Производство мучных изделий организовано на предприятиях различных отраслей и мощности. Задачи, стоящие перед данным видом производства, заключаются в регулировании взаимодействия и баланса между крупными государственными предприятиями и предприятиями среднего и малого бизнеса [1]. В то время как крупные предприятия производят традиционную продукцию для покрытия базового уровня потребности населения в мучных изделиях, малые и средние предприятия разрабатывают и внедряют новые виды изделий, рецептуры и технологии производства которых являются авторскими и характерными для каждого предприятия или их сети. В качестве акцентных факторов конкурентоспособности продукции выступают не только уникальные органолептические характеристики, но и состав изделий, ориентированный на тренды здорового питания.

В последнее время формирование нутриентного состава пищевых продуктов направлено на применение

натурального сырья с высокой плотностью полезных компонентов [2]. В этой связи интерес представляют пряные зеленые растения, обладающие как интересными вкусо-ароматическими достоинствами, так и богатым набором незаменимых макро- и микронутриентов. Многие виды пряно-ароматического сырья обладают функциональным влиянием на организм человека, оказывая противовоспалительное, антисклеротическое, антиканцерогенное, антиаритмическое, антиревматоидное, антимуtagenное, гастропротекторное и липидоснижающее воздействие. Большинство функциональных свойств пряного растительного сырья обусловлены высоким содержанием веществ, проявляющих антиоксидантную активность [3].

Поэтому актуально рассмотреть перспективы применения данного сырья как источника нутриентов в производстве мучных изделий, в том числе кондитерских, поскольку они остаются одними из массово потребляемых продуктов питания населения России и зарубежных стран.

Среди полуфабрикатов для производства мучных изделий популярным является заварной полуфабрикат. Им можно расширить ассортимент изделий из заварного теста как путем использования широкого спектра начинок, так и внесением изменений в рецептуру и технологию самого полуфабриката. Несмотря на его высокие органолептические свойства, основным недостатком является высокая калорийность и низкая пищевая ценность. Это при

малоподвижном образе жизни и непроизводительной трудовой деятельности значительной части населения является нежелательным фактором. Решением данной проблемы может стать использование растительного сырья в производстве мучных изделий. Перспективным сырьем являются пряные растения, которые, наряду с богатым химическим составом, обладают уникальными вкусо-ароматическими свойствами.

К таким растениям относятся петрушка (*Petroselinum crispum*), базилик (*Ocimum*) и сельдерей (*Apium*). Петрушка является одним из самых популярных пряных растений, произрастает повсеместно и отличается высоким содержанием биологически активных веществ, в том числе витаминов, особенно С, группы В и К. Базилик известен своими антимикробными и антиоксидантными свойствами. Насчитывается более 150 видов базилика. Все они различаются цветом листьев, вкусом и ароматом, условно разделяясь на зеленые и фиолетовые в соответствии с окраской надземной части растения [3].

Сельдерей является распространенным и практически повсеместно культивируемым растением. Объемы его производства постоянно возрастают [4]. Выделяют сельдерей корневой, листовой и черешковый. Как и в случае с базиликом, цвет растения позволяет спрогнозировать вкусовые качества продукта. Как правило, у растений, имеющих светло-зеленые черешки, вкус будет пряно-сладким с небольшой кислинкой. Темно-зеленый и красноватый цвет стебля и листьев можно рассматривать как признак пряно-острого вкуса с небольшой горчинкой.

Помимо использования в качестве пищевого ингредиента, сельдерей считается лекарственным растением. Благодаря наличию в своем составе аскорбиновой кислоты, селена, β -каротина, антоцианов, кофейной, *p*-кумаровой и феруловой кислот, апигенина, лютеолина, танина, сапонина и кемпферола сельдерей обладает антиоксидантными, противовоспалительными, антисептическими и противогрибковыми свойствами, а также помогает предотвратить и сдержать развитие многих хронических заболеваний, в том числе ожирение и диабет [5–10].

В пищу могут употребляться разные части сельдерей. Наиболее известно использование корня сельдерей, в меньшей степени – листьев и черешков [11–15]. Экспериментально доказано, что использование водных экстрактов сельдерей не придает антиоксидантных свойств изделиям и не улучшает их органолептические показатели [16]. Черешки содержат в себе витамины и антиоксиданты, что позволяет использовать их в качестве пищевого ингредиента, обладающего полезными свойствами [17]. Однако черешки сельдерей не обладают длительным сроком хранения. Поэтому их необходимо

переработать для продления сроков хранения при условии сохранения большей части полезных веществ и антиоксидантной активности [18]. Хранение сельдерей в свежем виде можно продлить путем использования специальных полимерных упаковок [19].

Рациональным вариантом продления сроков хранения пряной зелени является сушка, т. к. она позволяет хранить сушеный продукт достаточно долго, не прибегая к дополнительным энергозатратам при хранении переработанной продукции. Целесообразным является хранение продукта в порошкообразном состоянии, т. к. это позволяет использовать его в приготовлении пищевой продукции без дополнительной подготовки [20]. Кроме того, имеются данные различных авторов по повышению пищевой и биологической ценности, а также антиоксидантной активности хлебобулочных изделий с добавлением порошка сельдерей в пределах 1–5 г на 100 г муки [21, 22]. Возможно также использование порошка сельдерей в комбинации с другими видами порошков из растительного сырья [23, 24].

Ранее были проведены исследования по сушке различных частей сельдерей горячим воздухом, СВЧ-излучением, сублимационным, распылительным и комбинированным методами [25–28]. Полученная продукция отличалась высоким качеством. Однако общим для вышеперечисленных способов являются высокие энергозатраты и сложное аппаратное оформление процессов. Поэтому перспективным является использование инфракрасной (ИК) сушки черешков сельдерей с последующим помолом до порошкообразного состояния. Преимуществами ИК-сушки растительного сырья являются низкие рабочие температуры (40–60 °С), простота и масштабируемость процесса. Эффективной является сушка сырья в импульсном режиме в сравнении с непрерывным [29, 30]. Таким образом, использование порошка сельдерей ИК-сушки в рецептуре мучных изделий является целесообразным.

Целью работы является оценка возможностей применения пряного растительного сырья в производстве заварного полуфабриката и разработка технологии его использования.

Объекты и методы исследования

На разных этапах работы в качестве объектов исследования выступали:

- свежее пряное растительное сырье: петрушка (*Petroselinum crispum*), базилик зеленый (*Ocimum*) и сельдерей (*Apium*) листовой и черешковый. Сырье представляло собой сортосмесь, реализуемую в торговых сетях г. Новосибирска;
- порошок черешков сельдерей инфракрасной сушки. Для получения порошка ИК-сушки подготовленные черешки сельдерей нарезались и подвергались сушке в сушилке инфракрасной при температуре 50–60 °С

в течение 2,5–3 ч в импульсном режиме [31]. Затем они охлаждались, досушивались при нормальных условиях и механически измельчались до состояния тонкодисперсного порошка (размер частиц менее 0,5 мм). Источником излучения выступали кварцевые галогенные лампы КГТ-220-1000 трубчатой конфигурации, расположенные в боковых отражателях сушильной камеры и работающие в импульсном режиме. Под импульсным режимом подразумевается автоматическое включение и выключение ламп при достижении фиксированной температуры;

- образцы полуфабриката заварного «Шу» с использованием свежегопряного сырья и порошка сельдерея. Основное и дополнительное сырье – мука пшеничная высшего сорта, мука миндальная, сахар белый кристаллический, соль пищевая, масло сливочное, молоко, яйца куриные – было приобретено в розничной торговой сети г. Новосибирска.

Исследования проводились в условиях кафедр технологии и организации пищевых производств Новосибирского государственного технического университета и технологии и организации общественного питания Кемеровского государственного университета, а также на базе лаборатории Сибирского научно-исследовательского и технологического института Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук.

В работе использовали общепринятые и стандартные методы исследований органолептических и физико-химических показателей, а также пищевой ценности мучных изделий.

В процессе исследований были приготовлены следующие образцы изделий:

- образец № 1 (контрольный) – полуфабрикат заварной «Шу»;
- образцы № 2–4 – с добавлением 2,5, 5 и 7,5 % измельченной зелени петрушки;
- образцы № 5–7 – с добавлением 2,5, 5 и 7,5 % измельченной зелени базилика;
- образцы № 8–10 – с добавлением 2,5, 5 и 7,5 % измельченной зелени листового сельдерея;
- образцы № 11–13 – с добавлением 2,5, 5 и 7,5 % измельченного черешкового сельдерея;
- образцы № 14–16 – с добавлением 2,5, 5 и 7,5 % порошка черешков сельдерея ИК-сушки.

Готовые полуфабрикаты после охлаждения до температуры 20–25 °С подвергались оценке по органолептическим показателям.

Органолептическая оценка образцов осуществлялась в периоде 1,5–3 ч с момента окончания технологического процесса, в соответствии с требованиями ГОСТ 31986-2012, специально созданной дегустационной комиссией, состоящей из 10 человек.

Образцы оценивались по показателям внешнего вида, текстуры, консистенции, цвета, вкуса и запаха.

Каждый показатель оценивался в диапазоне от 1 до 5 баллов, где наименьшим баллом был 1, наивысшим – 5.

В отношении показателей вкуса и запаха как наиболее характерных критериев при выборе мучных кондитерских изделий потребителем был применен дескрипторно-профильный метод. Используемый метод способствует получению объективной оценки при анализе отдельных свойств образцов. Это позволит их регулировать в процессе изменений и совершенствования рецептур и технологий вырабатываемых изделий [30]. Для каждой характеристики показателя принималась оценка до 0 до 5 баллов, где 5 баллов означали наиболее выраженную характеристику вкуса и запаха, 0 баллов – отсутствие соответствующей характеристики вкуса и запаха.

Определение витамина В₁ проводилось с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии по ГОСТ EN 14122-2013. По данному методу содержание витамина В₁ определяется как общее содержание тиамин, включая его фосфорилированные производные. Метод основан на экстракции тиамин из пробы путем кислотного гидролиза, последующем ферментативном дефосфорилировании тиамин и его количественном определении с помощью ВЭЖХ с применением предварительной либо послеколоночной конверсии в тиохром.

Определение содержания витамина С проводилось фотометрическим методом по ГОСТ 24556-89. Метод основан на экстрагировании витамина С смесью уксусной и метафосфорной кислот, восстановлении 2,6-дихлорфенолиндофенолята натрия аскорбиновой кислотой с последующей экстракцией органическим растворителем бутилацетатом избытка 2,6-дихлорфенолиндофенолята натрия и фотометрировании органического экстракта при длине волны 500 нм.

Пищевая ценность образцов определялась расчетным способом на основе справочных данных [33]. При этом учитывались потери пищевых веществ при тепловой обработке.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе работы определили содержание витаминов С и В₁ в пряном растительном сырье. Результаты представлены в таблице 1.

Выбор витаминов обусловлен следующими факторами:

- растительное сырье является основным источником поступления витамина С в организм человека, но данный витамин характеризуется крайне низкой устойчивостью к температурным воздействиям;
- витамины группы В отличаются хорошей термолабильностью и наименее подвержены разрушению под действием температуры, в том числе в процессе выпечки.

Таблица 1. Содержание витаминов С и В₁ в пряной зелени (сортосмесь), n = 5

Table 1. C and B₁ in spicy greens (variety mix), n = 5

Показатель, мг/100 г	Физиологическая потребность для взрослых (МР 2.3.1.2432-08), мг/сут	Петрушка (стебель + лист)	Базилик зеленый (стебель + лист)	Сельдерей листовой (стебель + лист)	Сельдерей черешковый (черешки)
Витамин С	90,0	159,9 ± 2,1	19,6 ± 1,5	35,6 ± 1,5	41,2 ± 0,8
Витамин В ₁	1,5	2,8 ± 0,5	1,6 ± 0,2	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1

В этой связи представляла интерес оценка способности пряной зелени выступать в качестве значимых источников данных нутриентов, в том числе в составе других продуктов питания.

Как показывают результаты, исследуемое растительное сырье можно рассматривать как источник витаминов, особенно витамина С. По содержанию витамина С лидирует зелень петрушки, что согласуется с имеющимися литературными данными [3]. Таким образом, свежее пряное сырье можно считать адекватным источником витамина С. Однако для покрытия суточной потребности взрослого человека необходимо употреблять от 60 г (петрушка) до 350 г (базилик) продукта, что проблематично для основной части населения ввиду их специфических вкусовых свойств. В сравнении с содержанием витамина С вся пряная зелень содержит незначительное количество витамина В₁. Потребление 100 г продукта в среднем может покрыть не более 10 % суточной потребности. Так как фактически зелени потребляется значительно меньше 100 г, то рассматривать ее в качестве основного источника данного витамина не целесообразно. Однако рассматриваемое растительное сырье, кроме вышеназванных витаминов, является ценным источником других макро- и микронутриентов, в том числе антиоксидантной направленности. Оно имеет специфические вкусовые характеристики, что позволяет создавать новые вкусовые сочетания и расширять ассортимент традиционной продукции. Поэтому его использование в качестве ингредиентов пищевых продуктов имеет перспективы.

Далее исследовалась возможность введения в заварной полуфабрикат измельченного пряного растительного сырья путем замены 2,5–7,5 % муки в традиционной рецептуре. Зелень измельчалась в блендере до размеров частиц 1–2 мм, масса вводилась в тесто после этапа заваривания и охлаждения вместе с яйцом, чтобы избежать дополнительного температурного воздействия. Выпеченные полуфабрикаты оценивались по совокупности органолептических показателей. Однако основное внимание уделялось гармоничности вкусо-ароматического профиля. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Как показали результаты, введение измельченного пряного сырья привело к ухудшению органолептических показателей заварного полуфабриката. Большого всего пострадали текстура и вкусо-ароматический показатель. При оценке текстуры отмечалось, что мякиш приобретал несвойственный оттенок, вкрапления частиц были чрезмерно выражены, а увеличение количества вносимого сырья приводило к дефектам полости – отличительного признака заварного полуфабриката. Дисгармоничность отмечалась и во вкусе изделия. Дегустаторы низко оценили влияние добавок на вкус изделий, отмечая их несвойственность, негармоничность, наличие посторонних и неприятных привкусов. Из всех видов рассматриваемого сырья наилучшие результаты при оценке вкуса и аромата показало введение измельченных черешков сельдерея. Это объясняется преобладанием кисло-сладкого оттенка в сырье и отсутствием пряной горечи в отличие от других образцов. В этой связи наиболее перспективным для применения выбран данный вид зелени. Однако введение измельченных свежих черешков также

Таблица 2. Результаты органолептической оценки образцов заварного полуфабриката с применением свежего пряного сырья, n = 10

Table 2. Sensory evaluation of choux dough with fresh spicy raw materials, n = 10

Образец	Оценка, балл		
	Внешний вид	Запах и вкус	Текстура
№ 1	4,9 ± 0,3	5,0	4,9 ± 0,3
№ 2	4,5 ± 0,5	3,8 ± 0,4	4,5 ± 0,5
№ 3	3,8 ± 0,6	2,8 ± 0,4	3,8 ± 0,4
№ 4	3,2 ± 0,4	2,3 ± 0,5	2,8 ± 0,4
№ 5	4,5 ± 0,5	4,0	4,6 ± 0,2
№ 6	4,2 ± 0,4	3,6 ± 0,4	3,6 ± 0,6
№ 7	3,8 ± 0,6	2,9 ± 0,3	2,8 ± 0,4
№ 8	4,5 ± 0,5	3,8 ± 0,4	4,0
№ 9	4,4 ± 0,5	3,4 ± 0,4	3,8 ± 0,6
№ 10	3,9 ± 0,3	2,8 ± 0,4	3,6 ± 0,4
№ 11	4,7 ± 0,5	4,4 ± 0,5	4,4 ± 0,4
№ 12	4,4 ± 0,5	4,2 ± 0,3	3,8 ± 0,6
№ 13	4,2 ± 0,4	3,8 ± 0,6	2,9 ± 0,3

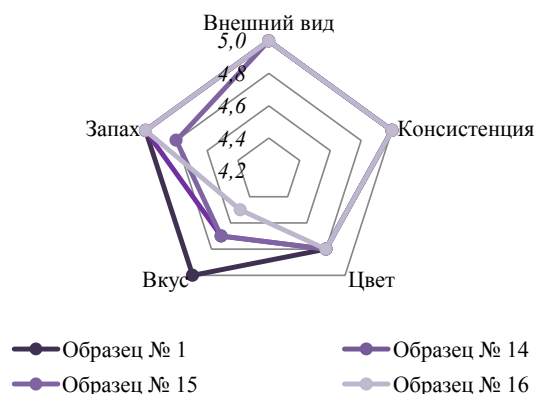


Рисунок 1. Органолептическая оценка образцов полуфабриката заварного «Шу»

Figure 1. Sensory evaluation of choux samples

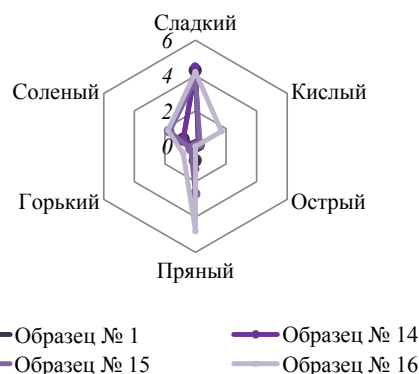


Рисунок 2. Профильно-дескрипторный анализ вкуса образцов полуфабриката заварного «Шу»

Figure 2. Taste profile of choux samples

привело к ухудшению текстуры изделия, поэтому было принято решение о рассмотрении возможности применения порошка из черешков сельдерея.

На следующем этапе была разработана рецептура и технология производства полуфабриката заварного «Шу» с кракелином, приготовленного с добавлением порошка из черешков сельдерея, полученного путем ИК-сушки. Порошок вводили в количестве 2,5, 5 и 7,5 % от массы основного сырья – муки пшеничной высшего сорта.

Экспериментально установлено, что потери витамина С при ИК-сушке сельдерея составили 53–55 %. Это свидетельствует о высокой сохранности наиболее неустойчивого к действию температур витамина и подтверждает перспективность данного вида сушки для растительного сырья с высоким содержанием биологически активных веществ.

Было приготовлено 4 образца полуфабрикатов: – образец № 1 – контроль; – образец № 14 – с применением 2,5 % порошка сельдерея; – образец № 15 – с применением 5 % порошка сельдерея; – образец № 16 – с применением 7,5 % порошка сельдерея.

Во всех образцах порошок сельдерея добавлялся также и в кракелин в количестве 2,5 % от массы муки.

Результаты органолептической оценки образцов полуфабриката представлены на рисунке 1.

Исходя из данных органолептического анализа, добавление порошка ИК-сушки черешков сельдерея как в заварное тесто, так и в кракелин сохраняет все его показатели, кроме вкуса, на прежнем уровне. При увеличении вложения сырья до максимального значения 7,5 % (образец № 16) гармоничность вкуса

снижается в наибольшей степени – до 4,5 балла. Это объясняется специфическим привкусом сельдерея, придающим послевкусие полуфабрикату.

Результаты профильно-дескрипторного анализа вкуса и запаха образцов хлебобулочного изделия показаны на рисунках 2 и 3 соответственно.

Добавление порошка ИК-сушки черешков сельдерея в заварное тесто способствует тому, что вкус опытных образцов становится более пряным и кислым. В наибольшей степени это выражено у образца № 16. При увеличении доли внесения порошка в тесто запах образцов становится более резким и специфичным, но менее интенсивным.

Расчет пищевой ценности образцов полуфабриката заварного представлен в таблице 3.

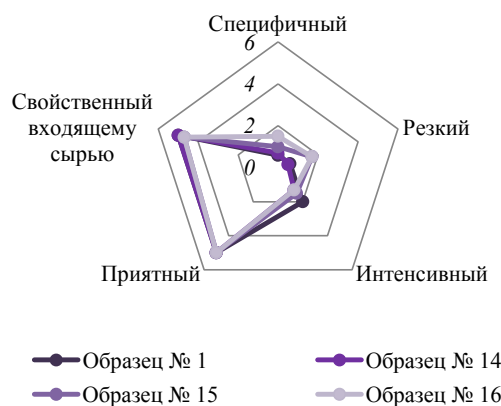


Рисунок 3. Профильно-дескрипторный анализ запаха образцов полуфабриката заварного «Шу»

Figure 3. Aroma profile of choux samples

Таблица 3. Расчет пищевой ценности образцов полуфабриката заварного

Table 3. Nutritional value of choux samples

Наименование пищевых веществ	Суточная норма	Образец № 1		Образец № 14		Образец № 13		Образец № 16	
		Содержание в 1 порции	% от суточной нормы	Содержание в 1 порции	% от суточной нормы	Содержание в 1 порции	% от суточной нормы	Содержание в 1 порции	% от суточной нормы
Белки, г	75	5,3	7,1	5,3	7,0	5,2	7,0	5,2	6,9
Жиры, г	83	8,1	9,7	7,9	9,6	7,8	9,4	7,7	9,3
Углеводы, г	211	18,3	8,7	18,2	8,6	18,0	8,5	17,9	8,5
Пищевые волокна, г	30	1,1	3,7	1,2	4,0	1,2	4,0	1,3	4,3
Энергетическая ценность, ккал	2500	167	6,7	165	6,6	164	6,5	162	6,5
Минеральные вещества, мг									
Na	1300	18,3	1,4	18,8	1,4	19,4	1,5	20,0	1,5
K	2500	5,1	0,2	5,7	0,2	6,2	0,2	6,8	0,3
Ca	1000	4,9	0,5	5,1	0,5	5,3	0,5	5,5	0,6
Mg	400	7,1	1,8	7,4	1,9	7,7	1,9	8,0	2,0
P	800	13,6	1,7	13,8	1,7	14,0	1,7	14,2	1,8
Fe	10	12,6	125,5	12,9	129,1	13,3	132,6	13,6	136,1
Витамины, мг									
B ₁	1,5	4,3	284,2	4,2	282,3	4,2	280,5	4,2	278,8
B ₂	1,8	10,9	604,3	11,0	610,8	11,1	617,2	11,2	623,6
PP	20	3,0	14,9	3,0	14,9	3,0	15,0	3,0	15,0
C	90	0,2	0,2	1,8	2,0	3,4	3,8	5,0	5,5
Бета-каротин	5	14,7	293,2	18,1	361,9	21,5	430,5	24,9	497,6

Анализ результатов расчета показал, что увеличение вносимой доли порошка ИК-сушки черешков сельдерея не снижает содержание белков и углеводов в выпеченном полуфабрикате. При этом содержание жиров уменьшается на 0,1–0,4 %, энергетическая ценность полуфабриката снизилась незначительно – всего на 2 % (для образца с 5 % порошка). Введение порошка существенно повлияло на содержание витамина С – повышение в 3,6 раза, бета-каротина – повышение на 23 %, менее значимо на содержание железа – повышение на 3 %. Учитывая, что характерной особенностью заварных полуфабрикатов является наличие полости, заполняемой начинкой, актуально продолжить исследования в направлении введения порошка в состав начинки. Таким образом, возможно комплексное улучшение нутриентного статуса кондитерского изделия.

Технологическая схема приготовления полуфабриката заварного «Шу» с использованием порошка черешков сельдерея ИК-сушки представлена на рисунке 4.

Выводы

В результате проведенного исследования доказана целесообразность использования порошка ИК-сушки сельдерея в рецептуре и технологии заварного полуфабриката «Шу» с кракелином как ингредиента,

влияющего на органолептические свойства и пищевую ценность полуфабриката.

Увеличение дозы вносимого порошка ИК-сушки сельдерея приводит к возникновению пряного и кислого вкуса у полуфабриката, что является нежелательным, т. к. снижает вкусовые свойства изделий. В связи с этим рациональная доза внесения порошка определена в количестве 5 % от массы пшеничной муки высшего сорта.

Внесение порошка ИК-сушки сельдерея в заварное тесто способствует увеличению содержания в нем витамина B₂ и бета-каротина. При этом содержание других основных пищевых ингредиентов в нем не меняется или меняется незначительно. В связи с этим целесообразно продолжить исследования в направлении введения порошка в состав начинки с целью комплексного улучшения нутриентного статуса кондитерского изделия в комбинации с ингредиентами, маскирующими нежелательные привкусы, свойственные черешкам сельдерея, а также повышающими пищевую ценность полуфабриката.

Критерии авторства

Н. И. Давыденко руководила работой. Все авторы принимали участие в исследованиях, обработке данных и написании текста.

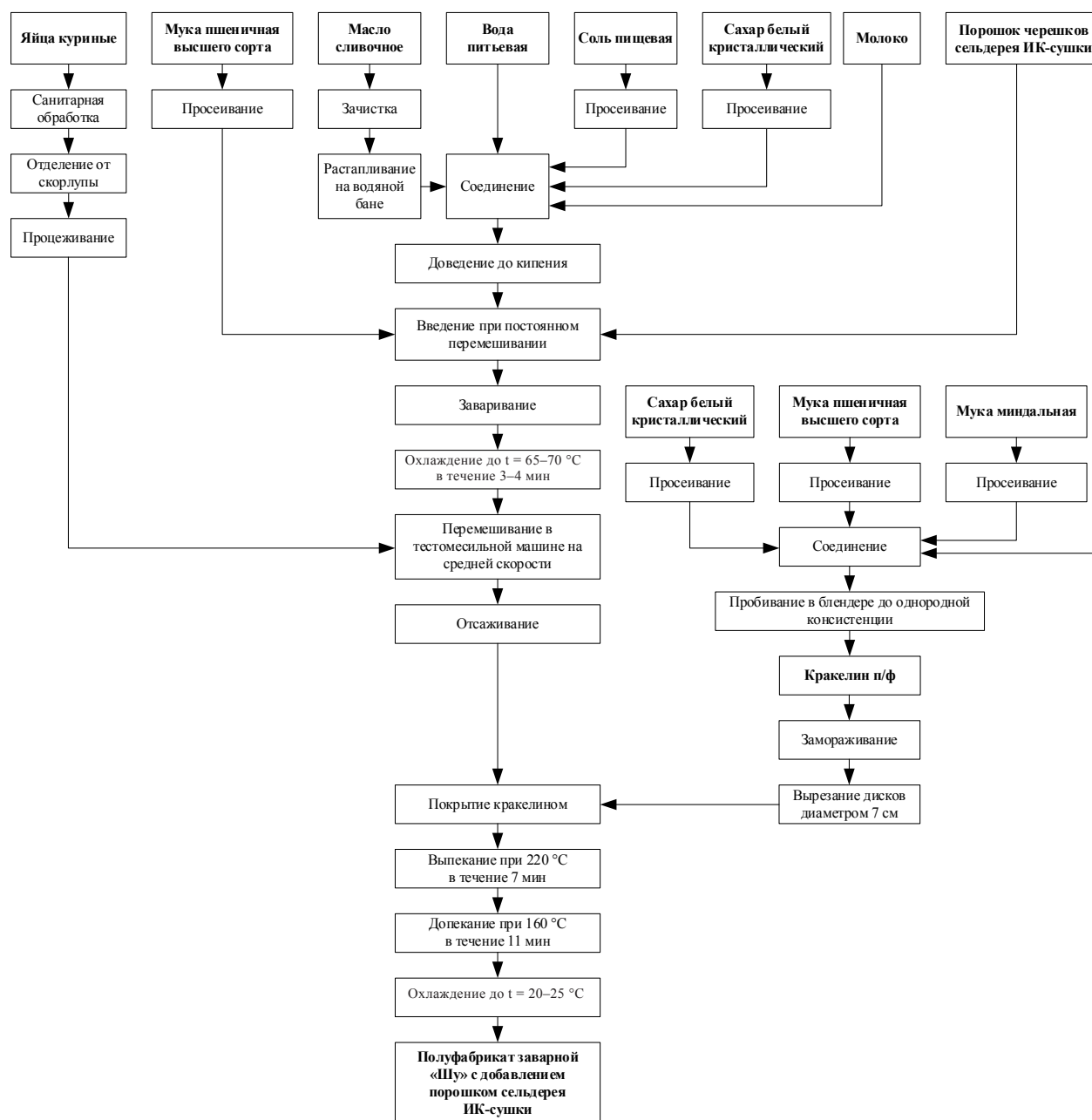


Рисунок 4. Технологическая схема приготовления полуфабриката заварного «Шу» с использованием порошка черешков сельдерея ИК-сушки

Figure 4. Technological scheme for semi-finished choux dough with powdered IR-dried celery stalks

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

N.I. Davydenko supervised the research. Others

performed the experiments, processed the obtained data, and wrote the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Kalinin N. N., Matraeva L. V., Erokhin S. G. Mechanism of bakery market regulation efficiency improvement in socially oriented economy // Ecological agriculture and sustainable development: materials International scientific and practical conference “Socio-economic and environmental problems agricultural sector of the Russian economy”. Belgrade, 2019. P. 107–117.
2. Antioxidant and antimicrobial activity of bacteriocin-producing strains of lactic acid bacteria isolated from the human gastrointestinal tract / A. Yu. Prosekov [et al.] // Progress in Nutrition. 2017. Vol. 19. № 1. P. 67–80. <https://doi.org/10.23751/pn.v19i1.5147>.
3. Борисова А. В., Макарова Н. В. Антиоксидантная активность *in vitro* пряностей, используемых в питании человека // Вопросы питания. 2016. Т. 85. № 3. С. 120–125.
4. Celery (*Apium graveolens* L.) performances as subjected to different sources of protein hydrolysates / B. B. Consentino [et al.] // Plants. 2020. Vol. 9. № 12. <https://doi.org/10.3390/plants9121633>.
5. Содержание селена в макаронных изделиях на основе полбяной и гречневой муки, а также овощных порошков / О. Ф. Фазуллина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 2. С. 242–251. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-242-251>.
6. Al Aboody M. S. Cytotoxic, antioxidant, and antimicrobial activities of celery (*Apium graveolens* L.) // Bioinformation. 2021. Vol. 17. № 1. P. 147–156. <https://doi.org/10.6026/97320630017147>.
7. Биохимический состав *Apium graveolens* VAR. *rapaceum* (Mill.) Gaud / М. И. Иванова [и др.] // Овощи России. 2019. Т. 47. № 3. С. 91–95. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-3-91-95>.
8. Kooti W., Daraei N. A review of the antioxidant activity of celery (*Apium graveolens* L.) // Journal of Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2017. Vol. 22. № 4. P. 1029–1034. <https://doi.org/10.1177/2156587217717415>.
9. Anti-obesity effects of enzyme-treated celery extract in mice fed with high-fat diet / B. O. Cho [et al.] // Journal of Food Biochemistry. 2020. Vol. 44. № 1. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13105>.
10. Sukarno D. A., Mustika A., Rejeki P. S. Effect of celery extract on fructose induced insulin resistance *Rattus norvegicus* // Folia Medica Indonesiana. 2020. Vol. 56. № 4. P. 269–274.
11. Борисова А. В., Кныш Е. Б., Трофимов А. В. Технология закусочных булочек для предприятий общественного питания // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2020. Т. 377–378. № 5–6. С. 42–45. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2020.5-6.9>.
12. Лыкова Д. А., Хрипакова Ю. И., Сергеева С. М. Перспективы использования стебля сельдерея в производстве сладких блюд // Научные исследования XXI века. 2020. Т. 6. № 4. С. 25–29.
13. Омаров М. М., Абдулхаликов З. А., Хайтмазова Д. Р. Производство нового диетического продукта из капусты, столовой свеклы, моркови, тыквы и сельдерея // Пищевая промышленность. 2018. № 7. С. 8–10.
14. Способ производства хлебобулочных изделий: пат. 2653878C1 Рос. Федерация. № 2016151080 / Грициенко Е. Г. [и др.]; заявл. 23.12.2016; опубл. 15.05.2018; Бюл. № 14. 7 с.
15. Станкевич Г. Н., Беленькая И. Р., Голинская Я. А. Оптимизация рецептур овощных десертов на основе корня сельдерея // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2016. Т. 350–351. № 2–3. С. 93–97.
16. Physical and sensory properties of bread enriched with phenolic aqueous extracts from vegetable wastes / A. Baiano [et al.] // Czech Journal of Food Sciences. 2015. Vol. 33. № 3. P. 247–253. <https://doi.org/10.17221/528/2014-CJFS>.
17. Антиоксидантный статус сельдерея (*Apium graveolens* L.) / В. А. Харченко [и др.] // Овощи России. 2020. № 2. С. 82–86. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-2-82-86>.
18. Gilingerne M. P., Orban C., Csajbokne E. C. Antioxidant activity of fresh cut green and dried spices // Acta Horticulturae. 2018. Vol. 1209. P. 151–155. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1209.22>.
19. Rizzo V., Muratore G. Effect of packaging on shelf life of fresh celery // Journal of Food Engineering. 2009. Vol. 90. № 1. P. 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.011>.
20. Evaluation of storage stability of dried powdered coriander, parsley and celery leaves based on the moisture sorption isotherms and glass transition temperature / I. Staniszewska [et al.] // LWT. 2021. Vol. 146. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111440>.
21. Иванова Н. Н., Иванов Д. И., Филимонова О. С. Влияние добавки из сушеного корнеплода сельдерея на биологическую ценность пшеничного хлеба // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 63–3. С. 87–90. <https://doi.org/10.18411/lj-07-2020-78>.
22. Effects of celery powder on wheat dough properties and textural, antioxidant and starch digestibility properties of bread / N. Wang [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2020. Vol. 57. № 5. P. 1710–1718. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04204-8>.
23. Хлебопекарная композиция профилактического назначения: пат. 2639977C1 Рос. Федерация. № 2016147776 / Иванова Н. Н., Иванов Д. И., Артюшкина Е. П.; заявл. 07.12.2016; опубл. 25.12.2017; Бюл. № 36. 7 с.

24. Фазуллина О. Ф., Смирнов С. О., Королев А. А. Макароны из цельнозерновой муки полбы и порошков брокколи и сельдерея // Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 1. С. 86–98. <https://doi.org/10.36107/spfr.2020.221>.
25. Effects of hot air and combined microwave and hot air drying on the quality attributes of celery stalk slices / Y. Chen [et al.] // Journal of Food Processing and Preservation. 2020. Vol. 44. № 1. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14310>.
26. Nguen M. P. Study on feasibility of tea production from celery (*Apium graveolens*) // Research on Crops. 2020. Vol. 21. № 2. P. 396–401. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2020.066>.
27. Effects of oven, microwave and vacuum drying on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of celery slices / A. Özkan Karabacak [et al.] // Quality Assurance and Safety of Crops and Foods. 2018. Vol. 10. № 2. P. 193–205. <https://doi.org/10.3920/QAS2017.1197>.
28. Khalilian Movahhed M., Mohebbi M. Spray drying and process optimization of carrot-celery juice // Journal of Food Processing and Preservation. 2016. Vol. 40. № 2. P. 212–225. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12598>.
29. The use of pulsed infrared drying in the processing of leafy plant raw materials / A. N. Sapozhnikov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1677. № 2. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1677/1/012177>.
30. Pulsed infrared radiation for drying raw materials of plant and animal origin / I. V. Buyanova [et al.] // Foods and Raw Materials. 2019. Vol. 7. № 1. P. 151–160. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-151-160>.
31. Сушилка инфракрасная: пат. 2265169С2 Рос. Федерация. № 2003136840/06 / Волончук С. К.; заявл. 19.12.2003; опубл. 27.11.2005; Бюл. № 33. 6 с.
32. Матисон В. А., Арутюнова Н. И., Горячева Е. Д. Применение дескрипторно-профильного метода для оценки качества продуктов питания // Пищевая промышленность. 2015. № 6. С. 52–54.
33. Тутельян В. А. Химический состав и калорийность российских продуктов питания. М.: ДеЛи плюс, 2012. 284 с.

References

1. Kalinin NN, Matraeva LV, Erokhin SG. Mechanism of bakery market regulation efficiency improvement in socially oriented economy. Ecological agriculture and sustainable development: materials International scientific and practical conference “Socio-economic and environmental problems agricultural sector of the Russian economy”; 2018; Chelyabinsk. Belgrade: Research Development Center-FBEE; p. 107–117.
2. Prosekov AYu, Dyshlyuk LS, Milentyeva IS, Sykhikh SA, Babich OO, Ivanova SA, et al. Antioxidant and antimicrobial activity of bacteriocin-producing strains of lactic acid bacteria isolated from the human gastrointestinal tract. Progress in Nutrition. 2017;19(1):67–80. <https://doi.org/10.23751/pn.v19i1.5147>.
3. Borisova AV, Makarova NV. *In vitro* antioxidant activity of spices used in human nutrition. Problems of Nutrition. 2016;85(3):120–125. (In Russ.).
4. Consentino BB, Virga G, la Placa GG, Sabatino L, Roupheal Y, Ntatsi G, et al. Celery (*Apium graveolens* L.) performances as subjected to different sources of protein hydrolysates. Plants. 2020;9(12). <https://doi.org/10.3390/plants9121633>.
5. Fazullina OF, Ponomareva SM, Smirnov SO, Semenova LI. Selenium content in spelt, buckwheat, and vegetable pasta. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(2):242–251. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-242-251>.
6. Al Aboody MS. Cytotoxic, antioxidant, and antimicrobial activities of celery (*Apium graveolens* L.). Bioinformation. 2021;17(1):147–156. <https://doi.org/10.6026/97320630017147>.
7. Ivanova MI, Alekseeva KL, Zelenkov VN, Kornev AV, Kashleva AI. Biochemical composition of *Apium graveolens* VAR. *rapaceum* (Mill.) Gaud. Vegetable Crops of Russia. 2019;47(3):91–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-3-91-95>.
8. Kooti W, Daraei N. A review of the antioxidant activity of celery (*Apium graveolens* L.). Journal of Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2017;22(4):1029–1034. <https://doi.org/10.1177/2156587217717415>.
9. Cho BO, Che DN, Shin JY, Kang HJ, Kim JH, Jang SI. Anti-obesity effects of enzyme-treated celery extract in mice fed with high-fat diet. Journal of Food Biochemistry. 2020;44(1). <https://doi.org/10.1111/jfbc.13105>.
10. Sukarno DA, Mustika A, Rejeki PS. Effect of celery extract on fructose induced insulin resistance *Rattus norvegicus*. Folia Medica Indonesiana. 2020;56(4):269–274.
11. Borisova AV, Knysh EB, Trofimov AV. Technology of appetizer buns for public catering establishments. News of Institutes of Higher Education. Food Technology. 2020;377–378(5–6):42–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2020.5-6.9>.
12. Lykova DA, Khrapakova YuI, Sergeeva SM. Prospects for the use of celery stalk in the production of sweet dishes. Nauchnye issledovaniya XXI veka [Scientific research of the XXI century]. 2020;6(4):25–29. (In Russ.).
13. Omarov MM, Abdulhalikov ZA, Hajtmazova DR. Manufacture of a new dietary product from cabbage, beetroot, carrot, pumpkin and celery. Food Industry. 2018;(7):8–10. (In Russ.).

14. Gritsienko EG, Dolganova NV, Katkova AS, Mironova EA, Putilov RA. Method for production of bakery products. Russia patent RU 2653878C1. 2018.
15. Stankevich GN, Belenkaya IR, Golinskaya YaA. Optimization of the vegetable dessert formulas based on celery root. News of Institutes of Higher Education. Food Technology. 2016;350–351(2–3):93–97. (In Russ.).
16. Baiano A, Viggiani I, Terracone C, Romaniello R, Del Nobile MA. Physical and sensory properties of bread enriched with phenolic aqueous extracts from vegetable wastes. Czech Journal of Food Sciences. 2015;33(3):247–253. <https://doi.org/10.17221/528/2014-CJFS>.
17. Kharchenko VA, Moldovan AI, Golubkina NA, Koshevarov AA, Gianluca C. Antioxidant status of celery (*Apium graveolens* L.). Vegetable Crops of Russia. 2020;(2):82–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-2-82-86>.
18. Gilingerne MP, Orban C, Csajbokne EC. Antioxidant activity of fresh cut green and dried spices. Acta Horticulturae. 2018;1209:151–155. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1209.22>.
19. Rizzo V, Muratore G. Effect of packaging on shelf life of fresh celery. Journal of Food Engineering. 2009;90(1):124–128. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.011>.
20. Staniszevska I, Dzadz L, Nowak KW, Zielinska M. Evaluation of storage stability of dried powdered coriander, parsley and celery leaves based on the moisture sorption isotherms and glass transition temperature. LWT. 2021;146. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111440>.
21. Ivanova NN, Ivanov DI, Filimonova OS. Vliyanie dobavki iz sushenogo korneploda sel'dereya na biologicheskuyu tsennost' pshenichnogo khleba [Effect of additives from dried celery root on the biological value of wheat bread]. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya [Trends in Science and Education]. 2020;(63–3):87–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.18411/lj-07-2020-78>.
22. Wang N, Xu Y, Chao H, Zhang M, Zhou Y, Wang M. Effects of celery powder on wheat dough properties and textural, antioxidant and starch digestibility properties of bread. Journal of Food Science and Technology. 2020;57(5):1710–1718. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04204-8>.
23. Ivanova NN, Ivanov DI, Artyushkina EP. Bakery composition of preventive purpose. Russia patent RU 2639977C1. 2017.
24. Fazullina OF, Smirnov SO, Korolev AA. Pasta from wholegrain spelt flour and broccoli and celery powders. Storage and Processing of Farm Products. 2020;(1):86–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.221>.
25. Chen Y, Song C, Li Z, Chen H, Jin G. Effects of hot air and combined microwave and hot air drying on the quality attributes of celery stalk slices. Journal of Food Processing and Preservation. 2020;44(1). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14310>.
26. Nguen MP. Study on feasibility of tea production from celery (*Apium graveolens*). Research on Crops. 2020;21(2):396–401. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2020.066>.
27. Özkan Karabacak A, Suna S, Tamer CE, Çopur ÖU. Effects of oven, microwave and vacuum drying on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of celery slices. Quality Assurance and Safety of Crops and Foods. 2018;10(2):193–205. <https://doi.org/10.3920/QAS2017.1197>.
28. Khalilian Movahhed M, Mohebbi M. Spray drying and process optimization of carrot-celery juice. Journal of Food Processing and Preservation. 2016;40(2):212–225. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12598>.
29. Sapozhnikov AN, Sleptsov SD, Grishin MA, Kopylova AV, Levin TA. The use of pulsed infrared drying in the processing of leafy plant raw materials. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1677(2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1677/1/012177>.
30. Buyanova IV, Altukhov IV, Tsuglenok NV, Krieger OV, Kashirskih EV. Pulsed infrared radiation for drying raw materials of plant and animal origin. Foods and Raw Materials. 2019;7(1):151–160. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-151-160>.
31. Volonchuk SK. Infrared dryer. Russia patent RU 2265169C2. 2005.
32. Matison VA, Arutyunova NI, Goryacheva ED. Application of descriptor-profile method to assess the food quality. Food Industry. 2015;(6):52–54. (In Russ.).
33. Tutel'yan VA. Khimicheskiy sostav i kaloriynost' rossiyskikh produktov pitaniya [Chemical composition and caloric content of Russian food products]. Moscow: DeLi plyus; 2012. 284 p. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-712-722>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Особенности культивирования российских и зарубежных сортов жимолости съедобной (*Lonicera edulis* Turcz.) *in vitro*

Е. И. Куликова¹, **С. С. Макаров^{2,*}**, **И. Б. Кузнецова³**, **А. И. Чудецкий²**¹ Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина, Вологда, Россия² Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства
и механизации лесного хозяйства, Пушкино, Россия³ Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Каратаево, Россия

Поступила в редакцию: 17.08.2021

Принята после рецензирования: 10.09.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: makarov_serg44@mail.ru

© Е. И. Куликова, С. С. Макаров, И. Б. Кузнецова, А. И. Чудецкий, 2021

Аннотация.

Введение. В настоящее время увеличился спрос на ягодную продукцию и посадочный материал жимолости съедобной (*Lonicera edulis*). Клональное микроразмножение является эффективным методом получения большого количества оздоровленного посадочного материала для создания промышленных плантаций ягодных растений. Цель работы – изучение влияния цитокининов и ауксинов на процессы формирования микропобегов и корней растений жимолости съедобной новых российских и канадских сортов в культуре *in vitro*.

Объекты и методы исследования. Растения-регенеранты жимолости съедобной 3 сортов российской и 2 сортов канадской селекции. На этапе введения в культуру *in vitro* изучалось влияние стерилизующих агентов и времени стерилизации на жизнеспособность эксплантов жимолости. На этапе «собственно микроразмножение» изучалось влияние регулятора роста Цитодеф в питательной среде QL на процесс органогенеза жимолости. На этапе укоренения *in vitro* изучалось влияние ауксина ИМК на корнеобразование растений.

Результаты и их обсуждение. Наибольшая жизнеспособность (80–94 %) эксплантов жимолости съедобной отмечена при использовании в качестве стерилизующих агентов Лизоформина 3000 5 % и нитрата серебра 0,2 % при времени стерилизации 10 мин. Наибольшие значения количества (8,8 шт.) и суммарной длины микропобегов (40,1 см) жимолости наблюдались при содержании в питательной среде цитокинина Цитодеф 0,3 мг/л. Наибольшие показатели количества (5,5 шт.) и суммарной длины (30,8 см) корней жимолости отмечены при добавлении ИМК 0,5 мг/л. Максимальная приживаемость (92–99 %) жимолости съедобной при адаптации к условиям *in vivo* выявлена при использовании кокосового субстрата.

Выводы. Цитодеф и ИМК являются эффективными росторегулирующими веществами при выращивании микрорастений жимолости съедобной сортов российской и канадской селекции в культуре *in vitro*. Это обуславливает перспективность их использования при получении большого количества высококачественного оздоровленного посадочного материала при создании плантаций.

Ключевые слова. Клональное микроразмножение, *in vitro*, жимолость, сорт, регуляторы роста, корнеобразование

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» Федерального агентства лесного хозяйства Российской Федерации (Приказ Рослесхоза от 25.12.2018 №1061).

Для цитирования: Особенности культивирования российских и зарубежных сортов жимолости съедобной (*Lonicera edulis* Turcz.) *in vitro* / Е. И. Куликова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 712–722. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-712-722>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Russian and Foreign Cultivars of Honeysuckle (*Lonicera edulis* Turcz.): cultivation studies *in vitro*

Elena I. Kulikova¹, **Sergey S. Makarov^{2,*}**,
Irina B. Kuznetsova³, **Anton I. Chudetsky²**

¹ N.V. Vereshchagin Vologda State Dairy Farming Academy^{ROR}, Vologda, Russia

² All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry^{ROR}, Pushkino, Russia

³ Kostroma State Agricultural Academy^{ROR}, Karavaevo, Russia

Received: August 17, 2021

Accepted in revised form: September 10, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: makarov_serg44@mail.ru

© E.I. Kulikova, S.S. Makarov, I.B. Kuznetsova, A.I. Chudetsky, 2021

Abstract.

Introduction. The demand for honeysuckle berries and planting material is growing. Clonal micropropagation is the most effective method for industrial plantations. The research objective was to study the effect of cytokinins and auxins on Russian and Canadian honeysuckle microshoots and roots.

Study objects and methods. The study featured regenerated honeysuckle (*Lonicera edulis* Turcz.) of three Russian cultivars (Bakcharsky Velikan, Doch Velikana, Yugana) and two Canadian cultivars (Boreal Beauty, Boreal Beast). The experiment focused on the effect of sterilizing agents and sterilization time on the viability of honeysuckle explants at the stage of culture introduction *in vitro*. The effect of the growth regulator Cytodef in the QL nutrient medium on organogenesis was studied at the stage of micropropagation proper, the effect of auxin IBA on plant root formation – at the stage of rooting *in vitro*.

Results and discussion. The greatest viability of honeysuckle explants (80–94%) was registered in the samples affected by Lizoformin 3000 (5%) and silver nitrate (0.2%) as sterilizing agents with a sterilization time of 10 min at the stage of *in vitro* culture introduction. The biggest quantity (8.8 pcs.) and total length (40.1 cm) of microshoots were observed when the content of cytokinin Cytodef in the culture medium QL was 0.3 mg/L at the stage micropropagation proper. The Boreal Beast cultivar had the largest total length of shoots (29.0 cm). The biggest quantity (5.5 pcs.) and total length (30.8 cm) of roots resulted from 0.5 mg/L of auxin IBA at the stage of rooting *in vitro*. Coconut substrate produced the highest survival rate (92–99%) at the stage of adaptation to non-sterile conditions *in vivo*, with the greatest number of leaves (8.1–10.2 pcs.) observed in Canadian cultivars.

Conclusion. Cytodef and IBA proved to be effective growth-regulating substances for microplants of Russian and Canadian honeysuckle cultivars *in vitro*, which makes them promising for berry plantations.

Keywords. Clonal micropropagation, *in vitro*, *Lonicera*, cultivar, growth regulators, rooting

Funding. The research was part of the State Task “Applied Scientific Research” of the Federal Forestry Agency of the Russian Federation (Order of the Federal Forestry Agency dated December 25, 2018, No. 1061).

For citation: Kulikova EI, Makarov SS, Kuznetsova IB, Chudetsky AI. Russian and Foreign Cultivars of Honeysuckle (*Lonicera edulis* Turcz.): cultivation studies *in vitro*. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):712–722. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-712-722>.

Введение

Жимолость – одна из наиболее многочисленных по видовому составу кустарниковых пород. Она широко представлена в горных и равнинных лесах умеренной зоны Евразии и Северной Америки. Теневыносливость и неприхотливость к условиям произрастания дают возможность использовать жимолость в защитных и защитно-рекреационных лесных насаждениях. Кроме того, разнообразие декоративных достоинств жимолости привлекает внимание специалистов по озеленению. На сегодняшний день в России (в особенности в европейской части) и за рубежом (Канада, страны СНГ и др.) как среди ученых различных направлений, так и среди предпринимателей агропромышленного и лесопромышленного комплексов увеличился спрос на ягодную продукцию и сортовой посадочный материал жимолости съедобной. К настоящему

времени в России создано более 100 сортов жимолости съедобной, различающихся по урожайности, формам, размерам и вкусовым качествам плодов. На территории Российской Федерации (Новосибирская, Томская, Нижегородская, Воронежская и Костромская области, республика Татарстан и др.), Белоруссии и Украины созданы крупные промышленные плантации жимолости, где выращивают перспективные отечественные сорта. Они отличаются от ранее созданных сортов большей крупноплодностью, однородностью периода созревания, устойчивостью к преждевременному осыпанию с куста и пригодностью кустов для механизированной уборки урожая [1–3].

Жимолость съедобная (*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn) – небольшой куст высотой от 0,5 до 1,2 м с тонкими, бурым, часто поникающими скелетными ветвями, тонкими и негустоопушенными побегами, узкими, продолговато-эллиптическими

или ланцетными листьями. Цветки жимолости съедобной бледно-желтые, с пыльниками, далеко выступающими из венчика. Жимолость съедобная является одной из наиболее перспективных для выращивания и экологически пластичных ягодных культур, имеет ранние сроки созревания (июнь), обладает высокой зимостойкостью (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) и скороспелостью. Плоды удлиненные, разнообразной формы, обладают исключительной пищевой и лекарственной ценностью. В ягодах жимолости съедобной содержится большое количество сухих веществ (до 16,4 %), органических кислот (до 5,3 %), сахаров (до 12,5 %), пектинов (до 1,6 %), дубильных и красящих веществ (до 0,3 %), микро- и макроэлементов, витаминов А, С, В₁, В₂ и Р-активных соединений (до 1856 мг%), представленных катехинами, антоцианами, лейкоантоцианами, иридоидами, флавонолами, хлорогеновыми кислотами и рядом других биологически активных веществ. Плоды жимолости имеют уникальные вкусовые свойства (обычно кисло-сладкие и сладкие, часто с горчинкой). Их употребляют в свежем, замороженном и сушеном видах, а также успешно используют для изготовления соков, компотов, морсов, варенья, джемов, конфитюров, хлебобулочных изделий и множества видов пищевой продукции. Ягоды обладают гипотензивными, антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, являются отличным средством против анемии, авитаминоза, упадка сил, снижения иммунитета, могут использоваться в медицине при профилактике и лечении простудных и аллергических заболеваний, головных болей, заболеваний желудочно-кишечного тракта, гипертонии и цинги [1–13].

Жимолость обладает теневыносливостью, произрастает в подлеске хвойных и смешанных лесов, но лучше растет и плодоносит в условиях хорошей освещенности (на лугах, опушках и т. п.). При этом хорошо растет только в условиях достаточного увлажнения и при повышенной влажности воздуха, но отрицательно реагирует на длительное затопление корневой системы грунтовыми водами. Это затрудняет возможность ее культивирования на тяжелых глинах и неосушенных торфяниках. Помимо этого, жимолость – самобесплодная культура. В связи с этим при ее выращивании специалисты рекомендуют сажать несколько сортов на одном квартале, но не менее трех. Размножение жимолости съедобной возможно вегетативными способами: горизонтальными отводками, зелеными и одревесневшими черенками, делением куста. При этом сохраняются ее сортовые признаки. Зеленое черенкование – наиболее результативный способ размножения этой культуры, при котором на 2-й год после посадки стандартного саженца на постоянное место с него можно срезать, в зависимости от сорта, от

5 до 20 зеленых черенков, на 3-й год – до 50–140 шт. Такой способ является затратным, поскольку для черенкования требуется наличие сооружений, защищающих грунт (теплиц, парников, рассадников и укрывных рядов), и туманообразующих установок для создания необходимой влажности воздуха. Также необходимо поддержание определенных условий произрастания: слой субстрата из торфа и песка не менее 20 см со слоем промытого речного песка толщиной 5 см; оптимальная температура воздуха в пределах от $+25$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$; оптимальный срок заготовки черенков, совпадающий с окончанием роста побегов, – 3-я декада июня. Размножение одревесневшими черенками в практике выращивания посадочного материала жимолости встречается сравнительно редко, т. к. приживаемость жимолости при этом низкая (15–20 %). Размножение отводками применяется у молодых растений жимолости, ветви которых расположены близко к земле, обычно в конце апреля – начале мая. При этом однолетние ветви жимолости осторожно пригибают к земле, стараясь не сломать побеги; отводки окучивают влажной землей или перегноем. Горизонтальные отводки отделяют от материнского растения весной и сажают на доращивание на 1–2 года или оставляют возле материнского растения до осени второго года. Однако при таком способе размножения от одного 3–4-летнего растения жимолости можно за сезон получить не более 3–6 отводков. Иногда практикуют размножение молодых (3–4-летних) растений жимолости делением куста (в конце сентября), при котором от 5-летних растений можно получить до 5–12 дочерних растений, а от растений старше 8–10 лет – еще меньше [1–3, 14, 15].

При создании промышленных плантаций наиболее перспективным и эффективным методом размножения является клональное микроразмножение. Это современный метод вегетативного размножения, который имеет ряд преимуществ:

- возможность получения в короткие сроки однородного оздоровленного посадочного материала от пораженных вирусными, бактериальными и грибными болезнями растений;
- получение в большом количестве вегетативного потомства трудноразмножаемых в обычных условиях видов растений;
- возможность круглогодичного проведения работы в лабораторных условиях;
- возможность депонирования пробирочных растений в течение длительного времени при пониженных плюсовых температурах для создания «банка» ценных форм растений [16].

В последние годы клональным микроразмножением жимолости активно занимается ряд исследователей из России и стран СНГ. Для микроразмножения в промышленных масштабах используется метод индукции развития пазушных меристем. Он основан на

активации пазушных меристем и снятии апикального доминирования путем удаления главного побега и микрочеренкования в пробирке либо введением в питательную среду различных росторегулирующих веществ цитокининовой группы для стимулирования развития пазушных побегов. В настоящее время пролиферация пазушных меристем считается надежной в отношении плодово-ягодных растений, поскольку обладает минимальной степенью риска получения неоднородного потомства и появления мутированных растений [17–20]. Однако культуре *in vitro* высших растений до сих пор не уделяется должного внимания [21].

С 2015 г. исследования по микроклонированию новых сортов жимолости с применением современных росторегулирующих веществ и биопрепаратов ведутся на Центрально-европейской лесной опытной станции ВНИИЛМ. На основании проведенных исследований установлено, что размноженные в условиях *in vitro* растения на протяжении трех вегетаций обладают большей продуктивностью, чем растения, полученные при укоренении зеленых и одревесневших черенков [22–24].

Цель исследования – изучить влияние регуляторов роста цитокининов и ауксинов на процессы органогенеза и ризогенеза растений жимолости съедобной новых перспективных сортов российской и канадской селекции при клональном микроразмножении.

Объекты и методы исследования

Исследования по выращиванию растений жимолости съедобной в культуре *in vitro* проводили в лабораториях клонального микроразмножения растений на базе филиала Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства «Центрально-европейская лесная опытная станция» и Вологодской государственной молочнохозяйственной академии им Н. В. Верещагина в 2016–2021 гг.

В качестве объектов исследований использовались растения жимолости съедобной новых перспективных сортов российской (Бакчарский великан, Дочь великана, Югана) и канадской (Boreal Beauty, Boreal Beast) селекции, имеющих преимущества по крупноплодности и однородности сроков созревания по сравнению с ранее созданными сортами.

Процесс клонального микроразмножения растений состоит из 4 основных этапов:

- 1) введение в культуру *in vitro* (выбор растения-донора, изолирование эксплантов и получение хорошо растущей стерильной культуры);
- 2) собственно микроразмножение (пролиферация), когда достигается получение максимального количества меристематических клонов;
- 3) укоренение (ризогенез) размноженных побегов *in vitro*;

- 4) адаптация укорененных растений к нестерильным (почвенным) условиям, а при необходимости – депонирование растений-регенерантов при пониженной температуре (от +2 до +10 °С) с последующим выращиванием растений в условиях теплицы и подготовка их к реализации или посадке в полевых условиях [16].

На этапе введения в культуру *in vitro* в качестве эксплантов использовали этиолированные побеги и апикальные меристемы растений (рис. 1). Заложили двухфакторный опыт, в котором первый фактор – тип стерилизующего агента, второй – время стерилизации (5, 10, 15 мин). Выбор стерилизующего вещества зависит от чувствительности и типа экспланта. Добиться снижения зараженности эксплантов можно специальными приемами: использование эксплантов с выращиваемых в теплице растений или подвергнутых термотерапии; предварительная стерилизация при небольших концентрациях с последующей посадкой на питательную среду; введение в питательную среду веществ, которые провоцируют быстрое проявление инфекции. В качестве стерилизующих агентов применяли 0,1 %-ный раствор сулемы, 0,2 %-ный раствор нитрата серебра и 5 %-ный раствор препарата Лизоформин 3000. Повторность опыта трехкратная.

На этапе пролиферации определяющую роль играют видовые и сортовые особенности экспланта, его строение, происхождение, ориентация на питательной среде, ее состав и физические условия культивирования. На культивирование эксплантов в культуре *in vitro* значительное влияние оказывают условия освещенности и температура. Растения культивировали в условиях световой комнаты в



Рисунок 1. Этап стерилизации эксплантов жимолости съедобной

Figure 1. Sterilization of honeysuckle explants

течение 30–45 суток при поддержании освещения люминесцентными лампами 2500–3000 лк, фотопериоде 16 ч света и 8 ч темноты, температуре воздуха +25 °С, относительной влажности воздуха 80 % (рис. 2, 3). На этапе «собственно микроразмножение» заложили двухфакторные опыты по изучению влияния добавления в питательную среду QL (Кворина-Лепуавра) регулятора роста цитокининовой группы Цитодеф (синтетический производный природного цитокинина дифенилмочевины, по активности не уступающий 6-БАП или кинетину). На этапе укоренения *in vitro* заложили двухфакторные опыты по изучению влияния ауксина ИМК (индолил-3-масляная кислота) в питательной среде на рост и развитие растений жимолости съедобной. Первый фактор – сорт, второй – концентрация росторегулирующего вещества (0,1, 0,3 и 0,5 мг/л). Учитывали количество, среднюю и суммарную длину микропобегов и корней. Повторность трехкратная, в каждом варианте – 10 пробирочных растений.

Далее укорененные растения жимолости съедобной адаптировали к нестерильным условиям *in vivo*. Для этого их пересаживали в кассеты, наполненные различными субстратами, в качестве которых использовались торф верхового типа, торф с песком в соотношении 1:3 и кокосовый субстрат. Определяли приживаемость растений, количество листьев и суммарный прирост побегов.

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием параметрических критериев Стьюдента и Дункана при помощи программного обеспечения AGROS v.2.11 и стандартных пакетов Microsoft Office 2016. Оценку достоверности различий между средними данными вариантов опыта проводили с помощью наименьшей существенной разности для 5 %-го уровня значимости (HCp_{05}).

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенных экспериментальных исследований отмечено, что тип стерилизующего агента и время стерилизации оказывали влияние на жизнеспособность эксплантов жимолости съедобной различных сортов на этапе введения в культуру *in vitro*. Наилучший стерилизующий эффект наблюдался при использовании в качестве стерилизующих агентов Лизоформина 3000 и $AgNO_3$, где максимальная жизнеспособность составила (время стерилизации 10 мин): для сортов канадской селекции – 80 и 94 %, для российских сортов – 90 и 92 % соответственно. Наихудшие показатели были отмечены при использовании ртути содержащего раствора сулемы при времени стерилизации 5 и 15 мин.

Биометрические показатели жимолости съедобной различались в зависимости от концентрации росторегулирующих веществ. На этапе «собственно



Рисунок 2. Этап образования микропобегов жимолости съедобной *in vitro* на питательной среде QL

Figure 2. Microshoot development *in vitro* on QL nutrient medium



Рисунок 3. Этап корнеобразования микрорастений жимолости съедобной *in vitro*

Figure 3. Root development *in vitro* in honeysuckle microplants

Таблица 1. Жизнеспособность эксплантов жимолости съедобной различных сортов в зависимости от стерилизующего агента и времени стерилизации, %

Table 1. Viability of explants of various honeysuckle cultivars depending on the sterilizing agent and sterilization time, %

Сорт	Время стерилизации, мин	Стерилизующий агент		
		Сулема 0,1 %	Лизоформин 3000 5 %	AgNO ₃ 0,2 %
Бокчарский великан	5	40	52	42
	10	62	90	92
	15	36	66	60
Дочь великана	5	40	52	36
	10	74	78	88
	15	40	50	72
Югана	5	36	50	40
	10	68	74	86
	15	42	40	62
Boreal Beauty	5	36	48	40
	10	70	72	82
	15	28	42	64
Boreal Beast	5	30	42	42
	10	72	80	94
	15	30	40	60

Таблица 2. Количество побегов жимолости съедобной в зависимости от сорта и концентрации цитокинина Цитодеф, шт.

Table 2. Amount of honeysuckle shoots depending on the variety and concentration of cytokinin Cytodef, pcs.

Сорт	Концентрация Цитодеф, мг/л			Среднее
	0,1	0,3	0,5	
Бокчарский великан	3,3	7,4	8,3	6,3
Дочь великана	3,1	6,9	7,8	5,9
Югана	2,9	8,3	9,1	6,9
Boreal Beauty	3,4	7,9	9,9	7,1
Boreal Beast	3,6	8,2	8,9	6,9
Среднее	3,3	7,7	8,8	—
НСР ₀₅ фактор А = 2,01; фактор В = 1,76; общ. = 1,31				

Таблица 3. Средняя длина побегов жимолости съедобной в зависимости от сорта и концентрации цитокинина Цитодеф, см

Table 3. Average length of honeysuckle shoots depending on the variety and concentration of cytokinin Cytodef, cm

Сорт	Концентрация Цитодеф, мг/л			Среднее
	0,1	0,3	0,5	
Бокчарский великан	1,1	4,5	3,3	3,0
Дочь великана	1,8	5,5	3,0	3,4
Югана	1,8	5,0	2,8	3,2
Boreal Beauty	1,9	4,8	2,9	3,2
Boreal Beast	1,5	6,0	3,5	3,6
Среднее	1,6	5,2	3,1	—
НСР ₀₅ фактор А = 1,89; фактор В = 1,50; общ. = 1,09				

микроразмножение» наибольшее количество побегов формировалось при добавлении в питательную среду цитокинина Цитодеф в концентрации 0,5 мг/л и достигало в среднем 8,8 шт. на одно растение. Это в 1,1 и 2,7 раза больше, чем при концентрациях 0,3

и 0,1 мг/л соответственно. Существенных различий по сортам не выявлено (табл. 2).

Средняя длина побегов жимолости была наибольшей при концентрации цитокинина Цитодеф 0,3 мг/л и составляла 5,2 см. Это в 1,7 и 3,3 раза

Таблица 4. Суммарная длина побегов жимолости съедобной в зависимости от сорта и концентрации цитокинина Цитодеф, см

Table 4. Total length of honeysuckle shoots depending on the cultivar and concentration of cytokinin Cytodef, cm

Сорт	Концентрация Цитодеф, мг/л			Среднее
	0,1	0,3	0,5	
Бокчарский великан	3,7	33,5	27,5	21,6
Дочь великана	5,7	38,1	23,5	22,4
Югана	5,3	41,5	25,6	24,1
Boreal Beauty	6,5	38,2	29,1	25,0
Boreal Beast	5,4	49,5	31,3	29,0
Среднее	5,3	40,1	27,4	–
НСР ₀₅ фактор А = 3,21; фактор В = 2,81; общ. = 2,01				

Таблица 5. Количество корней жимолости съедобной в зависимости от сорта и концентрации ауксина ИМК, шт.

Table 5. Amount of roots depending on the cultivar and concentration of auxin IBA, pcs.

Сорт	Концентрация ИМК, мг/л			Среднее
	0,1	0,3	0,5	
Бокчарский великан	2,1	3,3	5,5	3,6
Дочь великана	2,0	3,9	5,4	3,8
Югана	1,9	3,0	5,8	3,6
Boreal Beauty	1,8	2,9	6,0	3,6
Boreal Beast	2,0	3,3	4,9	3,4
Среднее	2,0	3,3	5,5	–
НСР ₀₅ фактор А = 1,72; фактор В = 1,41; общ. = 0,98				

Таблица 6. Средняя длина корней жимолости съедобной в зависимости от сорта и концентрации ауксина ИМК, см

Table 6. Average length of roots honeysuckle depending on the variety and concentration of auxin IBA, cm

Сорт	Концентрация ИМК, мг/л			Среднее
	0,1	0,3	0,5	
Бокчарский великан	1,1	2,2	6,5	3,3
Дочь великана	0,9	2,6	5,5	3,0
Югана	1,0	2,5	4,9	2,8
Boreal Beauty	1,2	2,1	5,0	2,8
Boreal Beast	1,3	2,4	6,3	3,5
Среднее	1,1	2,4	5,6	–
НСР ₀₅ фактор А = 1,66; фактор В = 1,1; общ. = 0,88				

больше, чем при концентрациях 0,5 и 0,1 мг/л соответственно. Различий в зависимости от сорта также не выявлено (табл. 3).

Суммарная длина побегов жимолости при концентрации в питательной среде цитокинина Цитодеф 0,3 мг/л достигала 40,1 см. Это в 1,5 раза больше, чем при концентрации 0,5 мг/л, и в 7,6 раза больше, чем при концентрации 0,1 мг/л. У сорта жимолости Boreal Beast наблюдалась наибольшая суммарная длина побегов – 29,0 см, а у сорта Бокчарский великан наименьшая – 21,6 см. Между другими исследуемыми сортами различия были незначительны (табл. 4).

На этапе «укоренение *in vitro*» наибольшее количество корней выявлено в вариантах с

содержанием в питательной среде QL ауксина ИМК в концентрации 0,5 мг/л и составило в среднем 5,5 шт. Это в 1,7 и 2,8 раза больше, чем в вариантах с концентрациями 0,3 и 0,1 мг/л соответственно (табл. 5).

Средняя длина корней жимолости при концентрации ауксина ИМК 0,5 мг/л была в 2,3 раза больше, чем при концентрации 0,3 мг/л, и в 5,1 раза больше, чем при концентрации 0,1 мг/л (табл. 6). В зависимости от сорта различия были незначительны.

Суммарная длина корней жимолости съедобной при содержании в питательной среде ауксина ИМК в концентрации 0,5 мг/л достигала 30,8 см на одно растение. Это почти в 4 раза больше, чем при

Таблица 7. Суммарная длина корней жимолости съедобной в зависимости от сорта и концентрации ауксина ИМК, см

Table 7. Total length of honeysuckle roots depending on the cultivar and concentration of auxin IBA, cm

Сорт	Концентрация ИМК, мг/л			Среднее
	0,1	0,3	0,5	
Бокчарский великан	2,3	7,3	36,0	15,2
Дочь великана	1,8	10,1	28,1	13,4
Югана	1,9	7,5	28,5	12,6
Boreal Beauty	2,2	6,1	30,1	12,8
Boreal Beast	2,6	8,0	31,1	13,9
Среднее	2,2	7,8	30,8	–
НСР ₀₅ фактор А = 4,32; фактор В = 3,12; общ. = 2,13				

Таблица 8. Приживаемость и биометрические показатели жимолости съедобной при адаптации к нестерильным условиям *in vivo* в зависимости от сорта и типа субстратаTable 8. Survival and biometric indices during adaptation to non-sterile conditions *in vivo*, depending on the cultivar and type of substrate

Субстрат	Сорт	Приживаемость, %	Количество листьев, шт.	Суммарный прирост побегов, см
Верховой торф	Бокчарский великан	26	5,60 ± 0,46	14,20 ± 0,66
	Дочь великана	24	6,10 ± 0,42	14,30 ± 0,71
	Югана	23	4,20 ± 0,34	13,90 ± 0,62
	Boreal Beauty	28	8,10 ± 0,51	14,50 ± 0,68
	Boreal Beast	27	8,40 ± 0,48	14,70 ± 0,72
Торф + песок 1:3	Бокчарский великан	36	5,30 ± 0,38	14,20 ± 0,59
	Дочь великана	34	6,10 ± 0,42	14,40 ± 0,63
	Югана	37	6,30 ± 0,49	14,20 ± 0,61
	Boreal Beauty	40	8,80 ± 0,35	14,70 ± 0,63
	Boreal Beast	38	9,50 ± 0,55	14,60 ± 0,71
Кокосовый субстрат	Бокчарский великан	95	4,70 ± 0,36	14,50 ± 0,58
	Дочь великана	92	6,80 ± 0,45	14,40 ± 0,69
	Югана	94	5,80 ± 0,42	14,70 ± 0,65
	Boreal Beauty	98	10,20 ± 0,57	14,90 ± 0,74
	Boreal Beast	99	9,80 ± 0,51	15,10 ± 0,78

концентрации 0,3 мг/л, и в 14 раз больше, чем при концентрации 0,1 мг/л (табл. 7).

Существенных сортовых различий по количеству, средней и суммарной длине корней микрорастений жимолости съедобной не выявлено.

На этапе адаптации к нестерильным условиям *in vivo* отмечено, что приживаемость растений жимолости съедобной всех исследуемых сортов была наибольшей при использовании кокосового субстрата (92–99 %). При использовании субстратов из верхового торфа и торфа с песком (1:3) приживаемость имела низкие показатели – 23–28 и 34–40 % соответственно (табл. 8).

У сортов канадской селекции наблюдалось наибольшее количество листьев (8,1–10,2 шт.) по сравнению с сортами российской селекции (4,2–6,8 шт.). По длине суммарного прироста значительных различий между растениями, в зависимости от сорта и субстрата, не отмечено.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что на этапе введения в культуру *in vitro* максимальная жизнеспособность эксплантов жимолости съедобной российских (90–92 %) и канадских (80–94 %) сортов наблюдалась при использовании в качестве стерилизующих агентов Лизоформина 3000 (5 %) и AgNO₃ при времени стерилизации 10 мин. При содержании в питательной среде QL цитокинина Цитодеф в концентрации 0,3 мг/л отмечены максимальные биометрические показатели у побегов жимолости. Наибольшая суммарная длина побегов (29,0 см) отмечена у сорта жимолости Boreal Beast. Максимальные показатели количества, средней и суммарной длины корней микрорастений жимолости наблюдались при добавлении в питательную среду ауксина ИМК в концентрации 0,5 мг/л. Существенных различий по биометрическим показателям корней жимолости, в

зависимости от сорта, не выявлено. Максимальная приживаемость (92–99 %) адаптируемых к нестерильным условиям *in vivo* растений жимолости выявлена при использовании кокосового субстрата. Наибольшее количество листьев (8,1–10,2 шт.) имели сорта канадской селекции.

Критерии авторства

Е. И. Куликова проводила закладку лабораторного опыта на всех этапах клонального микроразмножения. С. С. Макаров руководил проектом, проводил закладку лабораторного опыта на всех этапах клонального микроразмножения, проводил анализ литературных источников по вопросу использования биотехнологических способов размножения лесных ягодных растений. И. Б. Кузнецова проводила анализ литературных источников по вопросу использования традиционных способов размножения жимолости съедобной, закладку лабораторного опыта на этапе укоренения растений *in vitro* и статистическую обработку данных. А. И. Чудецкий проводил анализ литературных источников по вопросу пищевой и лекарственной ценности жимолости съедобной и статистическую обработку данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Выражаем благодарность д-р с.-х. наук С. А. Родину, канд. биол. наук Г. В. Тяк и канд. с.-х. наук И. А. Кореневу.

Contribution

E.I. Kulikova performed laboratory experiments at all stages of clonal micropropagation. S.S. Makarov supervised the project, performed laboratory experiments at all stages of clonal micropropagation, and reviewed publications on biotechnological methods of propagation of forest berry plants. I.B. Kuznetsova analyzed publications on traditional methods of honeysuckle propagation, performed laboratory experiments at the stage of plant rooting *in vitro*, and processed statistical data. A.I. Chudetsky analyzed publications on the nutritional and medicinal value of honeysuckle and processed the data.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgments

We express our gratitude to Dr.Sci.(Agri.) Sergey A. Rodin, Cand.Sci.(Biol.) Galina V. Tyak, Cand.Sci.(Agri.) Igor A. Korenev.

Список литературы

1. Состояние и перспективы селекции жимолости синей / А. Г. Куклина [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 5. С. 41–45.
2. Боярских И. Г. Особенности репродуктивной биологии жимолости синей *Lonicera caerulea* L // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 1. С. 200–210. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.200rus>.
3. Сорокопудов В. Н., Куклина А. Г., Упадышев М. Т. Сорта съедобной жимолости: биология и основы культивирования. М.: Всероссийский селекционно-технологический институт садоводства и питомниководства, 2018. 160 с.
4. Kucharska A. Z., Fecka I. Identification of iridoids in edible honeysuckle berries (*Lonicera caerulea* L. var. *kamtschatica* Sevest.) by UPLC-ESI-qTOF-MS/MS // Molecules. 2016. Vol. 21. № 9. <https://doi.org/10.3390/molecules21091157>.
5. Iridoids, phenolic compounds and antioxidant activity of edible honeysuckle berries (*Lonicera caerulea* var. *kamtschatica* Sevest.) / A. Z. Kucharska [et al.] // Molecules. 2017. Vol. 22. № 3. <https://doi.org/10.3390/molecules22030405>.
6. Боярских И. Г., Васильев В. Г., Кукушкина Т. А. Содержание биологически активных полифенолов *Lonicera caerulea* subsp. *pallasii* в природе и культуре // Химия растительного сырья. 2018. № 2. С. 86–96. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2018023452>.
7. Исследование полифенольного комплекса и иридоидных гликозидов в различных сортах плодов жимолости съедобной *Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn / И. Б. Перова [и др.] // Вопросы питания. 2019. Т. 88. № 6. С. 88–99. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10069>.
8. Коробкова Т. С., Сабарайкина С. М. Антиоксидантная активность плодов *Lonicera* L. в условиях центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25. № 4. С. 92–99. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-7>.
9. Reproductive biology of two edible honeysuckles [*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn., *Lonicera kamtschatica* (Sevast.) Pojark.] in the conditions of Southwestern Slovakia / L. Ďurišová [et al.] // Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus. 2020. Vol. 19. № 3. P. 63–72. <https://doi.org/10.24326/asphc.2020.3.6>.

10. Образцова П. А., Шмелева И. Ю., Рожнов Е. Д. Перспективы использования плодов жимолости в производстве винных напитков // Ломоносовские чтения на Алтае: Фундаментальные проблемы науки и образования: сборник научных статей международной конференции. Барнаул, 2017. С. 1054–1055.
11. Использование экстракта жимолости (*Lonicera edulis*) в технологии хлебобулочных изделий / Е. В. Соболева [и др.] // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1. С. 26–32. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-1-26-32>.
12. Якимлюк Т. А., Котов Л. А. Применение жимолости в различных отраслях народного хозяйства // Молодежь и наука. 2018. № 4.
13. Момот Т. В., Кушнерова Н. Ф. Обоснование выбора сырьевых источников из дальневосточной флоры для получения фармацевтических препаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 146–149.
14. Рутц А. В. Совершенствование технологии размножения жимолости съедобной // Субтропическое и декоративное садоводство. 2018. № 64. С. 132–136.
15. Сучкова С. А., Абзалтденов Т. З. Особенности размножения жимолости синей одревесневшими черенками в условиях Томской области // Современное садоводство. 2019. № 2. С. 105–110. <https://doi.org/10.24411/2312-6701-2019-10217>.
16. Мацнева О. В., Ташматова Л. В. Клональное микроразмножение земляники – перспективный метод современного питомниководства (обзор) // Современное садоводство. 2019. № 4. С. 113–119. <https://doi.org/10.24411/2312-6701-2019-10411>.
17. Propagation of edible honeysuckle (*Lonicera edulis* Turcz.) in *in vitro* conditions / Ya. S. Zapolsky [et al.] // Agricultural Science and Practice. 2018. Vol. 5. № 2. P. 18–26. <https://doi.org/10.15407/agrisp5.02.018>.
18. Morphogenesis of introduced varieties of *Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn depending on composition of nutrient media / E. Kutas [et al.] // International Journal of Advanced Research in Biological Sciences. 2019. Vol. 6. № 4. P. 35–41. <https://doi.org/10.22192/ijarbs.2019.06.04.006>.
19. Колбанова Е. В. Влияние фитогормонов в составе питательной среды на пролиферацию у растений-регенерантов сортов жимолости синей (*Lonicera caerulea* L. var. *kamtschatica*) // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. 2020. Т. 65. № 1. С. 88–97. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2020-65-1-88-97>.
20. Маркова М. Г., Сомова Е. Н. Совершенствование клонального микроразмножения ягодных культур // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 1. С. 39–44. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-39-44>.
21. Изучение физико-химических свойств и биологической активности экстрактов из высушенной биомассы каллусных, суспензионных клеток и корневых культур *in vitro* / Й. Янг [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 3. С. 480–492. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-480-492>.
22. Макаров С. С., Кузнецова И. Б. Влияние регуляторов роста на органогенез жимолости при клональном микроразмножении // Вестник НГАУ. 2018. Т. 49. № 4. С. 36–42. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2018-49-4-36-42>.
23. Макаров С. С., Калашникова Е. А., Румянцева Е. П. Продуктивность растений жимолости съедобной в зависимости от технологии их размножения // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2018. Т. 39. № 3. С. 76–83. <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2018.3.76>.
24. Коренев И. А., Тяк Г. В., Макаров С. С. Создание новых сортов лесных ягодных растений и перспективы их интенсивного размножения (*in vitro*) // Лесохозяйственная информация. 2019. № 3. С. 180–189. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.15>.

References

1. Kuklina AG, Sorokopudov VN, Upadyshev MT, Sorokopudova OA, Prischepina GA. Current state and trends of selection of the sweet-berry honeysuckle. Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2017;(5):41–45. (In Russ.).
2. Boyarskikh IG. Features of *Lonicera caerulea* L. reproductive biology. Agricultural Biology. 2017;52(1):200–210. (In Russ.). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.200eng>.
3. Sorokopudov VN, Kuklina AG, Upadyshev MT. Sorta s"edobnoy zhimolosti: biologiya i osnovy kul'tivirovaniya [Honeysuckle cultivars: biology and cultivation basics]. Moscow: All-Russian Institute of Selection and Technology of Horticulture and Nursery; 2018. 160 p. (In Russ.).
4. Kucharska AZ, Fecka I. Identification of iridoids in edible honeysuckle berries (*Lonicera caerulea* L. var. *kamtschatica* Sevest.) by UPLC-ESI-qTOF-MS/MS. Molecules. 2016;21(9). <https://doi.org/10.3390/molecules21091157>.
5. Kucharska AZ, Sokół-Lętowska A, Osziński J, Piórecki N, Fecka I. Iridoids, phenolic compounds and antioxidant activity of edible honeysuckle berries (*Lonicera caerulea* var. *kamtschatica* Sevest.). Molecules. 2017;22(3). <https://doi.org/10.3390/molecules22030405>.
6. Boyarskikh IG, Vasiliev VG, Kukushkina TA. The content of biologically active polyphenols *Lonicera caerulea* subsp. *pallasii* in natural conditions and the introduction. Chemistry of Plant Raw Material. 2018;(2):86–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018023452>.

7. Perova IB, Rylina EV, Eller KI, Akimov MYu. The study of the polyphenolic complex and iridoid glycosides in various cultivars of edible honeysuckle fruits *Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn. Problems of Nutrition. 2019;88(6):88–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10069>.
8. Korobkova TS, Sabaraikina SM. Antioxidant activity of the berries of *Lonicera L.* under the conditions of Central Yakutia. Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020;25(4):92–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-7>.
9. Ďurišová Ľ, Juríková T, Eliáš PJr, Mlček J. Reproductive biology of two edible honeysuckles [*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn., *Lonicera kamtschatica* (Sevast.) Pojark.] in the conditions of Southwestern Slovakia. Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus. 2020;19(3):63–72. <https://doi.org/10.24326/asphc.2020.3.6>.
10. Obraztsova PA, Shmeleva IYu, Rozhnov ED. Perspektivy ispol'zovaniya plodov zhimolosti v proizvodstve vinnykh napitkov [Prospects for the use of honeysuckle berries in wine production]. Lomonosovskie chteniya na Altae: Fundamental'nye problemy nauki i obrazovaniya: sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy konferentsii [Lomonosov readings in Altai: Fundamental Problems of Science and Education: proceedings of the international conference]; 2017; Barnaul. Barnaul: Altay State University; 2017. p. 1054–1055. (In Russ.).
11. Soboleva EV, Sergacheva ES, Smertina ES, Fedyanina LN, Lyakh VA, Gladyschuk OS. The use of honeysuckle (*Lonicera edulis*) extract in baking technology. Journal of International Academy of Refrigeration. 2018;(1):26–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-1-26-32>.
12. Yakimlyuk TA, Kotov LA. The application fatality in the various branches of the national economy. Molodezh' i nauka [Youth and Science]. 2018;(4). (In Russ.).
13. Momot TV, Kushnerova NF. Justification of the choice of raw sources from far east flora for receiving the pharmaceutical preparations. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016;18(2):146–149. (In Russ.).
14. Rutts AV. Improvement of breeding technology for edible honeysuckle. Subtropical and Ornamental Horticulture. 2018;(64):132–136. (In Russ.).
15. Suchkova SA, Abzaltdenov TZ. Features of blue honeysuckle propagation by hardwood cuttings in the Tomsk region. Contemporary Horticulture. 2019;(2):105–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2312-6701-2019-10217>.
16. Matsneva OV, Tashmatova LV. Clonal micro-propagation of strawberries is a promising method of modern nursery practice (review). Contemporary Horticulture. 2019;(4):113–119. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2312-6701-2019-10411>.
17. Zapolsky YaS, Medvedeva TV, Natalchuk TA, Bublyk MO. Propagation of edible honeysuckle (*Lonicera edulis* Turcz) in *in vitro* conditions. Agricultural Science and Practice. 2018;5(2):18–26. <https://doi.org/10.15407/agrisp5.02.018>.
18. Kutas E, Veyevnik A, Titok V, Ogorodnyk L. Morphogenesis of introduced varieties of *Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn depending on composition of nutrient media. International Journal of Advanced Research in Biological Sciences. 2019;6(4):35–41. <https://doi.org/10.22192/ijarbs.2019.06.04.006>.
19. Kolbanova EV. Influence of fitohormones in the nutrient medium on the proliferation at the microplants of blue honeysuckle cultivars (*Lonicera caerulea* L. var. *kamtschatica*). Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series. 2020;65(1):88–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2020-65-1-88-97>.
20. Markova MG, Somova EN. Improvement of clonal micropropagation of berry crops. Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2021;16(1):39–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-39-44>.
21. Yang Y, Asyakina LK, Babich OO, Dyshlyuk LS, Sukhikh SA, Popov AD, et al. Physicochemical properties and biological activity of extracts of dried biomass of callus and suspension cells and in vitro root cultures. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(3):480–492. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-480-492>.
22. Makarov SS, Kuznetsova IB. Influence of growth regulators on organogenesis of honeyberry when clonic micropropagation. Vestnik NGAU. 2018;49(4):36–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2018-49-4-36-42>.
23. Makarov SS, Kalashnikova EA, Rumyantseva EP. Productivity of edible honeysuckle depending on the technology of propagation. Vesting of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2018;39(3):76–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2018.3.76>.
24. Korenev IA, Tyak GV, Makarov SS. Creation of new varieties of forest berry plants and prospects of their intensive reproduction (*in vitro*). Forestry Information. 2019;(3):180–189. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.15>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-723-732>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Изучение изотопного и химического состава глубинной воды озера Байкал

Л. А. Оганесянц¹, Е. М. Севостьянова¹, Е. И. Кузьмина¹,
М. Ю. Ганин^{1,*}, Е. П. Чебыкин², А. Н. Сутурин²



¹ Всероссийский научно-исследовательский институт пивоваренной, безалкогольной
и винодельческой промышленности^{ROR}, Москва, Россия

² Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук^{ROR}, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию: 02.08.2021

Принята после рецензирования: 08.09.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: labvin@yandex.ru



© Л. А. Оганесянц, Е. М. Севостьянова, Е. И. Кузьмина,
М. Ю. Ганин, Е. П. Чебыкин, А. Н. Сутурин, 2021

Аннотация.

Введение. Глубинная вода озера Байкал из-за своего природного состава может разливаться в бутылки без применения консервантов. Развитие крупномасштабного производства упакованной байкальской воды требует ее детального изучения для защиты от контрафакта и фальсификата. Цель работы – изучение изотопного и химического состава глубинной воды озера Байкал для разработки идентификационных показателей.

Объекты и методы исследования. Глубинные воды озера Байкал, отобранные в различных точках, вода реки Ангара и водопроводная вода г. Иркутска и г. Шелехова. Аналитические исследования проводились на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре и изотопном масс-спектрометре Delta V Plus с модулем GasBench II.

Результаты и их обсуждение. Все исследованные образцы воды относятся к пресным водам с незначительной минерализацией. По концентрации химических элементов, входящих в солевой состав, глубинные воды отличались низким содержанием натрия и хлоридов, а также высоким содержанием кремния. Из металлов, нормированных по органолептическому признаку вредности, в исследованных пробах глубинных вод обнаружены железо, марганец, медь и цинк. В водопроводной воде городов Иркутск и Шелехов эти показатели были выше. Анализ изотопных характеристик исследуемых образцов показал, что по средним значениям глубинная вода озера Байкал была «легче» как по соотношению изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$ – на 0,73 ‰), так и водорода (δD – на 0,49 ‰) по сравнению с изотопными характеристиками реки Ангара. Водопроводная вода г. Иркутск и г. Шелехов характеризовалась высоким содержанием дейтерия. По содержанию изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) водопроводная вода близка к образцам из р. Ангара.

Выводы. В результате проведенной работы расширен перечень идентификационных показателей и установлена возможность идентификации глубинной воды озера Байкал на основе комплексного физико-химического и изотопного анализа.

Ключевые слова. Фальсификат, идентификация, упакованная вода, масс-спектрометр, элементы, металлы, изотопы, дейтерий, кислород

Финансирование. Работа выполнена на базе Всероссийского научно-исследовательского института пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности (ВНИИПБиВП)^{ROR} и Лимнологического института Сибирского отделения РАН (ЛИН СО РАН)^{ROR}.

Для цитирования: Изучение изотопного и химического состава глубинной воды озера Байкал / Л. А. Оганесянц [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 723–732. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-723-732>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Isotopic and Chemical Composition of the Deep Water of Lake Baikal

Lev A. Oganesyants¹, Elena M. Sevostianova¹, Elena I. Kuzmina¹,
Mikhail Yu. Ganin^{1,*}, Eugene P. Chebykin², Aleksandr N. Suturin²

¹ All-Russian Research Institute of Brewing, Non-Alcoholic and Wine Industry^{ROR}, Moscow, Russia



Abstract.

Introduction. Due to its natural composition, the deep water of Lake Baikal can be bottled without any conserving agents. The development of large-scale production of bottled Baikal water requires its detailed study in order to protect it from counterfeit and falsification. The purpose of this work was to study the isotopic and chemical composition of the deep water of Lake Baikal and offer indicators for its identification.

Study objects and methods. The research included deep water of Lake Baikal, sampled at various points, the water from the Angara River, and the tap water from the cities of Irkutsk and Shelekhov. The tests were performed using a quadrupole ICP-MS mass spectrometer and a Delta V Plus isotope mass spectrometer with a GasBench II module.

Results and discussion. All the water samples revealed fresh water with insignificant mineralization. As for salts, the deep water samples had a lower content of sodium and chlorides, as well as a higher content of silicon. As for metals, the deep water samples contained iron, manganese, copper, and zinc; in the tap water samples, these indicators were significantly higher. Unlike that of the Angara water samples, the isotopic profile of the deep water samples was somewhat “lighter”, both in the ratio of oxygen isotopes $\delta^{18}\text{O}$ – by 0.73‰, and hydrogen δD – by 0.49‰. The tap water samples had a higher deuterium content. The content of oxygen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$) in the tap water samples was close to that in the Angara samples.

Conclusion. The complex physicochemical and isotope analyses expanded the list of identification indicators and made it possible to identify the deep water of Lake Baikal.

Keywords. Counterfeit, identification, packaged water, mass spectrometer, elements, metals, isotopes, deuterium, oxygen

Funding. The research was performed on the premises of the All-Russian Research Institute of Brewing, Non-Alcoholic and Wine Industry (VNIIPBiVP)  and the Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (LIN SB RAS) .

For citation: Oganesyants LA, Sevostianova EM, Kuzmina EI, Ganin MYu, Chebykin EP, Suturin AN. Isotopic and Chemical Composition of the Deep Water of Lake Baikal. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):723–732. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-723-732>.

Введение

Озеро Байкал – это уникальное творение природы, национальное достояние и гордость России, объект всемирного природного наследия ЮНЕСКО. Байкал – единственный географический объект, имеющий защиту в виде федерального закона «Об охране озера Байкал» (№ 94-ФЗ от 1.05.1999 г.). В рамках закона установлен особый режим хозяйственной деятельности вокруг озера, границы рыбоохранной зоны и особенности охраны животных, запреты на химическое и биологическое загрязнение озера, а также запрет любого вида деятельности, приводящего к подъему воды.

Озеро Байкал является самым глубоким озером на земном шаре. Глубина его достигает 1637 метров. Водосборный бассейн Байкала занимает около 540 тыс. км². В Байкал впадает более 300 рек, наиболее крупные из них Селенга, Баргузин, Верхняя Ангара, Турка, Снежная. Вытекает из озера одна – Ангара. Воды Байкала отличаются необыкновенной прозрачностью и чистотой. Такая высокая прозрачность объясняется тем, что байкальская вода, благодаря деятельности

живых организмов, в ней обитающих, очень слабо минерализована. Общая минерализация глубинной воды составляет не более 0,1 г на литр. Озеро Байкал является стратегическим мировым ресурсом чистой питьевой воды, т. к. 74 % объема озера (17 тыс. км³ из 23 тыс. км³) – это глубинная вода, которая соответствует самым строгим мировым стандартам качества [1, 2].

Средний химический состав вод Байкала близок к среднему составу питающих его вод, но эта близость ограничивается только основными ионами. Что касается содержания биогенных и органических веществ, то для них такого сходства не наблюдается. Поступающие в озеро воды в процессе метаморфизации претерпевают глубокие изменения в своем химическом составе. Воды Байкала классифицируются как слабominерализованные мягкие воды гидрокарбонатные кальциевые. Приблизительный средний состав главных ионов (мг/л): HCO_3^- – 66,5, SO_4^{2-} – 5,2, Cl^- – 0,6, Ca^{2+} – 15,2, Mg^{2+} – 3,1, Na^+ – 3,8, K^+ – 2, сумма ионов – 96,4 [3–13].

Исследования состава воды озера как по всей акватории, так и по глубине показали, что вода

Байкала имеет рН 7,6 и общую минерализацию не более 100 мг/дм³. Все ингредиенты химического состава воды озера Байкал можно разделить на 2 группы. К первой группе относятся главные ионы: кальций, магний, натрий, калий, гидрокарбонаты, сульфаты и хлориды. Их распределение относительно однородно по глубине и не зависит от пространственных и сезонных влияний. Вторую группу составляют биогенные элементы (азот, фосфор, кремний), органическое вещество и растворенные газы, которые подвержены влиянию биологических процессов. Особой стабильностью отличается вода «ядра» Байкала – зоны, находящейся на глубине от 300 м от поверхности до 100 м над дном [1–4].

Байкальская вода из-за своего природного состава может разливаться в бутылки без применения консервантов. С 1992 г. начат промышленный разлив глубинной байкальской воды в индивидуальную упаковку (пластиковые и стеклянные бутылки). Вода берется с глубины 400 м, где сохраняется постоянная температура 4,2 °С и где она защищена водной толщей от поверхностных загрязнений. В настоящее время разливается большое количество марок упакованной воды, содержащей слово «Байкал». Например, «Байкал», «Родники Байкала», «Легенда Байкала», «Жемчужина Байкала», «Чистый Байкал», «Волна Байкала» и т. д.

Развитие крупномасштабного производства упакованной байкальской воды требует детального изучения ее многоэлементного состава, разработки идентификационных показателей для защиты от контрафакта и фальсификата. Целью работы стало изучение изотопного и химического состава глубинной воды озера Байкал для разработки идентификационных показателей.

Объекты и методы исследования

Экспериментальная работа проводилась в Лимнологическом институте Сибирского отделения РАН (физико-химические показатели) и ВНИИ пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности (изотопный состав).

Вода из глубинных зон оз. Байкал поступает в исток р. Ангары. Приплотинная зона Иркутского водохранилища служит водозабором для городов Иркутск и Шелехов. Водопроводная вода проходит фильтрацию и хлорируется. Затем через разводящую сеть (металлические трубы) вода поступает в квартиры.

В качестве объектов исследования были выбраны глубинные воды озера Байкал, отобранные в различных точках, вода реки Ангара и водопроводная вода г. Иркутска и г. Шелехова. Объекты исследования представлены в таблице 1.

Отбор проб на глубинных разрезах осуществлялся с помощью пластиковых (ПЭ-SDR-17 (21))

Таблица 1. Объекты исследования

Table 1. Research objects

Шифр пробы	Место отбора	Глубина, м
9	Вода, п. Листвянка, глубинный разрез	400
38	Вода, п. Листвянка, насосная глубинной воды	500
27	Вода, п. Сухой ручей, глубинный разрез	400
36	Вода, п. Култук, глубинный разрез	400
41	Вода, р. Ангара, водохранилище до плотины	–
42	Вода, р. Ангара, после плотины	–
43	Водопроводная вода, г. Иркутск, ул. Лермонтова	–
44	Водопроводная вода, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская	–
45	Водопроводная вода, г. Иркутск, ул. Кайская	–
46	Водопроводная вода, г. Шелехов	–

батометров (6 л – «Ocean Test Equipment, Inc.», США, 12 л – «General Oceans, Inc.», США).

Многоэлементный анализ проводился на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500se по методике, описанной Е. П. Чебыкиным и соавторами [13].

Для многоэлементного ИСП-МС анализа пробу воды отбирали в одноразовые полипропиленовые медицинские шприцы объемом 10 мл. В количестве 5 мл ее фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (0,45 мкм, ацетат целлюлозы; Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные полипропиленовые пробирки с закручивающимися крышками объемом 15 мл (Greiner bio-one, Cat.-No. 188271, Германия). Они содержат 100 мкл консерванта с внутренним стандартом: 70 %-ная HNO₃, дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), содержащая индий с концентрацией 316 ppb. Пробирки с отобранными образцами воды взвешивали в лаборатории и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 9 ppb). Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания ± 0,0003 г).

Система ввода проб: микропоточный полипропиленовый распылитель (200 мкл/мин, режим подачи растворов – самораспыление), полипропиленовая распылительная камера, кварцевая горелка с системой ShieldTorch. Измерения проводили в режиме «горячей плазмы» (мощность генератора плазмы 1580 Вт) без столкновительной ячейки.

Растворы измерялись в сканирующем режиме: 3 канала на массу, 0,05 с на канал, общее время сканирования масс-спектра – 55 с. Промывка между пробами – 50 с, между пробами и калибровочным стандартным раствором – 200 с.

Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, США).

Аналитические исследования изотопного состава воды проводились на изотопном масс-спектрометре Delta V Plus с модулем GasBench II, позволяющим определять изотопные отношения кислорода и водорода в исследуемых образцах. Метод основан на определении характеристики изотопного состава водорода (аналогично для кислорода) в анализируемой пробе относительно международных стандартных образцов методом масс-спектрометрии стабильных изотопов. Он основан на изотопном уравнивании изотопного состава водорода (кислорода) в исследуемом образце по отношению к изотопному составу водорода (кислорода) стандартного образца. При анализе использовались стандарты воды VSMOW2, USGS47 и SLAP2. В качестве рабочего стандартного образца (PCO) применяли газообразный диоксид углерода (CO_2) высокой степени очистки 99,9999 % и водород (H_2) чистоты 99,999 %. В качестве газа-носителя использовали гелий (He) высокой степени очистки 99,9999 %. Для изотопного уравнивания использовали смесь газов, состоящую из гелия (чистота 99,9999 %) и 0,4 % высокоочищенного диоксида углерода, а также смесь, состоящую из гелия (чистота 99,9999 %) и 2 %-ного высокоочищенного водорода.

Результаты и их обсуждение

В основные задачи исследования входило:

– определение многоэлементного химического состава глубинной воды озера Байкал в сравнении

с поверхностными водами Прибайкалья (р. Ангара и Иркутское водохранилище);

– анализ изотопного состава выбранных объектов исследования;

– определение идентификационных показателей, характерных для глубинной воды озера Байкал.

Среди существующих методов определения содержания элементов в составе питьевых вод основным способом определения нескольких элементов одновременно является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Метод ICP-MS комбинирует использование индуктивно связанной плазмы в качестве источника ионов с квадрупольным масс-спектрометром, выступающим в роли масс-анализатора (фильтра), и дискретно-диодным детектором, который используется для регистрации отдельных ионов и их потоков [1]. Метод позволяет быстро определить до 75 элементов в образце, включая изомерный состав с интерпретацией полного массового спектра. Он широко используется для анализа следовых элементов в питьевой воде, обеспечивая низкие пределы обнаружения и точные количественные результаты для всех элементов.

В соответствии с поставленной целью были исследованы 11 образцов питьевой воды: 4 образца глубинной байкальской воды (с глубины 400 м) вблизи населенных пунктов г. Байкальск, п. Сухой Ручей, п. Култук, п. Листвянка; 1 образец глубинной байкальской воды (с глубины 500 м, п. Листвянка, насосная); 2 образца воды из реки Ангара; 4 образца водопроводной воды городов Иркутск и Шелехов (Иркутское водохранилище).

Концентрация химических элементов, которые входят в солевой состав, токсичных металлов и неметаллических элементов, а также минерализация (М) в исследуемых образцах воды по результатам многоэлементного ИСП-МС анализа представлена в таблицах 2 и 3.

Анализ полученных результатов показал, что все исследованные образцы воды относятся к пресным

Таблица 2. Концентрация химических элементов, входящих в солевой состав, и минерализация (М) в исследуемых образцах воды

Table 2. Concentration of chemical elements included in the salt composition and mineralization (M)

Элемент \ Шифр пробы	Концентрация, мг/дм ³									
	9	27	36	38	41	42	43	44	45	46
Na	3,1	3,1	3,1	3,4	3,4	3,4	4,2	4,8	4,2	4,2
Mg	2,9	2,9	2,8	3,0	3,0	3,0	3,1	3,0	3,1	3,1
K	0,94	0,94	0,94	0,94	0,92	0,94	0,94	0,93	0,93	0,94
Ca	15,9	16,0	15,9	16,2	16,3	16,5	16,6	16,7	16,7	16,6
Cl	0,60	0,59	0,62	0,66	0,60	0,63	2,90	3,60	2,70	2,50
Si	0,57	0,61	0,60	0,64	0,40	0,39	0,43	0,45	0,40	0,43
P	0,026	0,018	< 0,005	0,015	0,008	0,009	0,021	0,012	0,012	0,009
S	2,10	2,20	1,69	2,00	2,20	2,30	2,40	2,60	2,80	2,00
M	93	93	92	95	96	97	99	100	99	100

Таблица 3. Концентрация химических элементов (токсичные металлы и неметаллические элементы) в исследуемых образцах воды

Table 3. Toxic metals and non-metallic elements

Элемент	Шифр пробы	Концентрация, мкг/дм ³									
		9	27	36	38	41	42	43	44	45	46
Al		1,8	2,4	3,0	1,6	2,8	2,6	3,1	3,0	3,1	3,2
As		0,38	0,35	0,35	0,36	0,43	0,35	0,33	0,29	0,24	0,36
B		5,0	4,9	5,0	5,3	5,2	5,4	5,3	5,5	5,3	5,4
Ba		9,8	9,9	9,8	10	9,8	10,2	10,3	11,2	9,8	10,2
Br		10,9	10,6	11,8	18,1	18,0	17,7	20,0	23,0	21,0	22,0
Cd		0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,005	0,007	0,002	0,004
Co		0,033	0,031	0,033	0,028	0,031	0,033	0,04	0,059	0,057	0,036
Cr		< 0,03	0,12	0,19	0,40	0,19	0,44	0,19	0,18	0,23	0,37
Cu		0,44	0,67	1,34	0,94	0,80	0,71	5,4	5,0	6,1	13,4
Fe		26	31	22	8,2	16,8	16,8	25	86	60	56
Hg		0,016	0,029	0,024	0,017	0,018	0,02	0,023	0,018	0,021	0,02
Li		1,86	1,89	2,0	2,0	2,0	2,0	2,2	2,0	2,0	2,0
Mn		0,03	0,031	0,038	0,043	0,77	1,32	0,94	8,7	1,74	2,0
Mo		1,26	1,29	1,25	1,3	1,3	1,3	1,25	1,19	1,19	1,23
Ni		0,15	0,13	0,13	0,34	0,38	0,36	0,79	0,51	0,38	0,38
Pb		< 0,01	< 0,01	0,022	0,019	0,007	0,009	0,133	0,041	0,047	0,076
Sb		0,042	0,049	0,079	0,093	0,057	0,048	0,033	0,032	0,029	0,032
Se		0,11	0,16	0,13	0,09	0,09	0,08	0,12	0,14	0,09	0,14
Sr		106	106	106	107	108	108	109	111	108	109
Zn		0,45	< 0,1	0,45	0,28	0,13	0,2	43	3,2	11,6	7,2

водам с незначительной минерализацией. Общая минерализация глубинных вод составляла 92–95 мг/дм³. В поверхностных водах и водопроводной воде этот показатель был выше – 99–100 мг/дм³. Концентрация химических элементов, входящих в солевой состав, всех исследованных проб была близка. Однако глубинные воды отличались низким содержанием натрия и хлоридов, а также высоким содержанием кремния.

Установлено, что все исследованные пробы воды характеризуются низким содержанием токсичных металлов 1 и 2 класса опасности (кадмий, мышьяк, ртуть, свинец и т. д.). Концентрации токсичных металлов 1 и 2 класса опасности во всех образцах были сопоставимы. Из металлов, нормированных по органолептическому признаку вредности (железо, марганец, медь, цинк), в исследованных пробах глубинных вод обнаружены: железо в концентрации 8,2–35 мкг/дм³, марганец – 0,03–0,043 мкг/дм³, медь – 0,44–1,34 мкг/дм³, цинк – < 0,1–0,45 мкг/дм³. В водопроводной воде г. Иркутска и г. Шелехов эти показатели были выше: железо обнаружено в концентрации 25–86 мкг/дм³, марганец – 0,94–8,7 мкг/дм³, медь – 5,0–13,4 мкг/дм³, цинк – 3,2–43,0 мкг/дм³.

На следующем этапе исследований был проведен анализ изотопного состава выбранных объектов.

Наиболее перспективный метод для решения этой задачи – масс-спектрометрический метод определения изотопного состава кислорода и водорода этих вод. Результаты исследования представлены в таблице 4.

Анализ полученных результатов показал, что изотопные характеристики исследуемых образцов сопоставимы. Однако по средним значениям глубинная вода озера Байкал была «легче» как по соотношению изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$ – на 0,73 ‰), так и водорода (δD – на 0,49 ‰) по сравнению с изотопными характеристиками реки Ангара. Водопроводная вода г. Иркутск и г. Шелехов характеризовалась высоким содержанием дейтерия: δD – $-125,19 \pm 0,34$ ‰. По содержанию изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) водопроводная вода близка к образцам из р. Ангара.

В настоящее время все больше слоев населения пользуются упакованной питьевой водой. Поэтому важной проблемой является определение качества упакованной воды, представленной на рынке. Главным является подтверждение ее подлинности, в том числе географического происхождения. Проблема выявления фальсифицированных минеральных и питьевых вод является особенно актуальной, поскольку эта продукция потребляется всеми группами населения. У природных вод баланс микро- и макроэлементов определяется природным происхождением.

Таблица 4. Изотопные характеристики исследуемых образцов воды

Table 4. Isotopic profile

Шифр образца	Наименование образца, место отбора	Наименование показателя	
		$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰
9	Вода, п. Листвянка, глубинный разрез, 400 м	$-15,34 \pm 0,28$	$-126,08 \pm 0,88$
27	Вода, п. Сухой ручей, глубинный разрез, 400 м	$-15,37 \pm 0,48$	$-126,88 \pm 0,48$
36	Вода, п. Култук, глубинный разрез, 400 м	$-15,88 \pm 0,17$	$-126,21 \pm 0,08$
38	Вода, п. Листвянка, насосная глубинной воды, 500 м	$-16,00 \pm 0,01$	$-128,22 \pm 0,62$
–	Глубинная вода, среднее	$-15,65 \pm 0,24$	$-126,85 \pm 0,51$
41	Вода, р. Ангара, водохранилище до плотины	$-15,20 \pm 0,12$	$-126,24 \pm 0,50$
42	Вода, р. Ангара, после плотины	$-14,64 \pm 0,04$	$-126,47 \pm 0,06$
–	Вода, р. Ангара, среднее	$-14,92 \pm 0,08$	$-126,36 \pm 0,28$
43	Водопроводная вода, г. Иркутск	$-15,68 \pm 0,01$	$-126,48 \pm 0,50$
44	Водопроводная вода, г. Иркутск	$-14,75 \pm 0,03$	$-124,48 \pm 0,28$
45	Водопроводная вода, г. Иркутск	$-14,51 \pm 0,11$	$-124,80 \pm 0,34$
46	Водопроводная вода, г. Шелехов	$-15,10 \pm 0,16$	$-124,98 \pm 0,25$
–	Водопроводная вода, среднее	$-15,01 \pm 0,08$	$-125,19 \pm 0,34$

Недостовверное указание наименования воды, в основу которого заложено место происхождения, не только вводит потребителей в заблуждение, но и может навредить здоровью. Поэтому очень важно установить место происхождения воды, чтобы доказать ее подлинность.

В основе идентификации упакованных вод лежит принцип специфичности и постоянства химического состава. Проведение только сравнительного химического анализа не позволяет установить место происхождения продукта, поскольку, независимо от географического местоположения источника, молекулы химических соединений имеют одинаковое строение. Нормируемые показатели качества и безопасности упакованных вод не обеспечивают однозначной идентификации продукции. Это обосновывает необходимость расширения области оценочных критериев и их введение в соответствующие нормативные документы. Для определения аутентичности упакованных вод, включая географическое происхождение, в настоящее время применяется совокупность аналитических методов: – макро- и микроэлементный состав и состав редкоземельных элементов; – изотопный анализ водорода и кислорода.

Метод изотопной масс-спектрометрии показал свою эффективность при идентификации пищевой продукции [15–20].

В настоящее время идентификационными показателями упакованных вод являются показатели основного солевого состава, которые выносятся на этикетку: кальций, магний, натрий, калий, хлориды, сульфаты и гидрокарбонаты. Концентрации химических элементов, входящих в солевой состав, и минерализация (М) в глубинной воде озера Байкал, воде р. Ангара и водопроводной воде из Иркутского

водохранилища были похожи. Исключением является небольшое превышение хлоридов в водопроводной воде.

Анализ полученных данных микроэлементного исследования позволил расширить перечень идентификационных показателей (табл. 5). Это токсичные металлы, нормированные по органолептическому признаку вредности, – медь, железо, марганец и цинк. Их содержание определялось в незначительной концентрации, но было выше в водопроводной воде.

Каждый водный бассейн имеет уникальный микроэлементный состав в зависимости от геологического происхождения окружающих горных пород. Описанные методы позволяют с высокой точностью охарактеризовать источник происхождения воды и его региональную принадлежность. Это может быть использовано для создания баз данных природных питьевых вод и выявления фальсификатов по наименованию и региону происхождения.

Наиболее перспективным методом для решения этой задачи является масс-спектрометрический метод определения изотопного состава кислорода и водорода упакованных вод. Изотопные отношения водорода и кислорода являются единственными характеристиками вещественного состава молекул воды, позволяющими изучать их историю и генезис. Особое значение придается содержанию дейтерия, разброс которого в природной воде Земли лежит в диапазоне от 89 ppm ($-427,5$ ‰) (стандарт SLAP воды Антарктиды) до 155,76 ppm (0 ‰) (стандарт океанической воды VSMOW). Вода различного происхождения различается по изотопным характеристикам водорода и кислорода [21–24]. Иногда эти различия крайне малы, но высокоточное современное аналитическое оборудование способно достоверно выявлять такие

Таблица 5. Усредненные концентрации химических элементов в исследуемых объектах

Table 5. Average concentrations of chemical elements

Элемент	Концентрация, мкг/дм ³		
	Глубинная вода озера Байкал	Река Ангара	Водопроводная вода
Br	12,85	17,9	21,5
Cu	0,85	0,76	7,5
Fe	21,8	16,8	56,8
Mn	0,036	1,05	3,3
Ni	0,19	0,37	0,51
Pb	0,015	0,008	0,074
Sb	0,066	0,053	0,031
Zn	0,32	0,17	16,3

Таблица 6. Изотопный состав водорода природных вод Прибайкалья

Table 6. Hydrogen isotopic profile of natural waters in the Baikal region

Место отбора пробы	δD , ‰
Атмосферные осадки, р. Селенга, Бурятия	–111,8
Атмосферные осадки, п. Листвянка, оз. Байкал	–114,9
р. Верхняя Ангара	–152,0
р. Кичера	–148,0
р. Баргузин	–125,0
р. Селенга	–102,5
р. Ангара	–123,5
оз. Байкал	–123,5

отличия и подтверждать уникальность воды каждого бассейна.

Первые данные по изотопному составу водорода в природных водах Прибайкалья опубликованы в [21, 24] и представлены в таблице 6. Как видно из таблицы 6, в атмосферных осадках над Южным и Средним Байкалом, а также в р. Селенга, собирающей воду со значительной территории Бурятии и Монголии, самые «тяжелые» по дейтерию воды. Самым легким изотопным составом обладают воды северных рек, а в поверхностной воде оз. Байкал выявлено среднее содержание дейтерия.

Исследования содержания дейтерия в глубинных водах озера Байкал показали, что в различных точках водозабора (Южный Байкал) на глубине 400–500 м

изотопный состав вод практически идентичен. Результаты исследования представлены в таблице 7.

Изотопный состав водорода глубинной воды озера Байкал коррелирует с изотопными характеристиками этого элемента поверхностных вод Байкала, рек его бассейна, а также р. Ангара. В процессе водоподготовки и транспортировки воды изменений в соотношении изотопов водорода не отмечено. На основе полученных данных разработана, аттестована и внесена в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений «Методика измерений отношений изотопов кислорода $^{18}O/^{16}O$ и водорода $^2H/^1H$ в воде глубинной озера Байкал природной питьевой методом изотопной масс-

Таблица 7. Изотопный состав воды глубинных зон Южного Байкала

Table 7. Isotopic profile of the deep water of South Baikal

Место отбора (глубина, м)	D, ppm	δD , ‰	$\delta^{18}O$, ‰
п. Листвянка (500 м)	135,79 ± 0,19	–128,22 ± 0,62	–16,00 ± 0,01
п. Листвянка (500 м)	135,92 ± 0,22	–127,41 ± 0,70	–14,74 ± 0,14
п. Листвянка (500 м)	135,86 ± 0,23	–127,78 ± 0,74	–15,83 ± 0,03
п. Листвянка (500 м)	136,24 ± 0,034	–125,35 ± 0,11	–15,39 ± 0,16
п. Листвянка (500 м), среднее	135,95 ± 0,19	–127,19 ± 0,54	–15,49 ± 0,09
п. Листвянка (430 м)	136,13 ± 0,17	–126,01 ± 0,54	–15,41 ± 0,08
п. Листвянка (430 м)	136,11 ± 0,35	–126,15 ± 1,12	–15,26 ± 0,47
п. Листвянка (430 м), среднее	136,12 ± 0,27	–126,08 ± 0,88	–15,34 ± 0,28
п. Сухой ручей (400 м)	136,24 ± 0,16	–125,32 ± 0,50	–15,64 ± 0,17
п. Сухой ручей (400 м)	135,87 ± 0,15	–127,72 ± 0,48	–15,45 ± 0,12
п. Сухой ручей (400 м)	135,87 ± 0,18	–127,70 ± 0,57	–15,30 ± 0,04
п. Сухой ручей (400 м)	135,89 ± 0,17	–127,56 ± 0,54	–15,43 ± 0,11
п. Сухой ручей (400 м)	136,12 ± 0,09	–126,10 ± 0,28	–15,05 ± 0,02
п. Сухой ручей (400 м), среднее	136,00 ± 0,15	–126,88 ± 0,48	–15,37 ± 0,48
п. Култук (400 м)	136,10 ± 0,03	–126,21 ± 0,08	–15,88 ± 0,17
Южный Байкал (400–500 м), среднее	136,04 ± 0,16	–126,59 ± 0,49	–15,60 ± 0,26

спектрометрии». Свидетельство об аттестации № 205-16/RA.RU.311787-2016/2018, ФР.1.31.2018.31983.

Таким образом, в результате проведенной работы установлена возможность идентификации глубинной воды озера Байкал на основе комплексного физико-химического и изотопного анализа.

Выводы

1. Для выявления контрафактных упакованных вод с упоминанием топонима «Байкал» дополнительно к анализу основного солевого и изотопного состава необходимо проводить высокочувствительный ИСП-МС анализ на содержание широкого спектра химических элементов, включая следовые и ультраследовые элементы.

2. В перечень показателей для идентификации глубинной воды озера Байкал рекомендуется включить токсичные металлы, нормированные по органолептическому признаку вредности: медь, железо, марганец и цинк. Их содержание определялось в незначительной концентрации, но было выше в водопроводной воде.

3. Для подтверждения географического происхождения природной воды озера Байкал необходимо проводить измерения отношений изотопов кислорода и водорода.

Критерии авторства

Л. А. Оганесянц осуществлял общее руководство проектом исследования. Е. М. Севостьянова осуществляла разработку макета исследований и

обеспечивала исследовательский процесс экспериментальными данными и их обобщением. Е. И. Кузьмина обеспечивала контроль исследовательского процесса в части изотопных исследований. М. Ю. Ганин обеспечивал процесс экспериментальными данными посредством инструментальных методов анализа (изотопный масс-спектрометр Delta V Plus с модулем GasBench II). Е. П. Чебыкин и А. Н. Сутурин проводили отбор проб для исследования и обеспечивали процесс экспериментальными данными (многоэлементный ИСП-МС анализ).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

L.A. Oganesyants supervised the project. E.M. Sevostianova developed the research model, provided the experimental data, and draw conclusions. E.I. Kuzmina controlled the isotope research. M.Yu. Ganin was responsible for instrumental methods of analysis (isotope mass spectrometer Delta V Plus with a GasBench II module). E.P. Chebykin and A.N. Suturin took samples and provided experimental data (multielement ICP-MS analysis).

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water / A. N. Suturin [et al.] // *Spectrochimica Acta – Part B Atomic Spectroscopy*. 2003. Vol. 58. № 2. P. 277–288. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(02\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00157-X).
2. Глубинная вода озера Байкал – природный стандарт пресной воды / М. А. Грачев [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2004. Т. 12. № 4. С. 417–429.
3. Определение микроэлементов в Байкальской воде методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой / В. Н. Эпов [и др.] // *Аналитическая химия*. 1999. Т. 54. № 11. С. 1170–1175.
4. Сезонные изменения вертикальной структуры водной толщи пелагиали южного Байкала / В. В. Блинов [и др.] // *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44. № 3. С. 285–295. <https://doi.org/10.7868/S0321059617030051>.
5. Овчинникова Т. Э., Бочаров О. Б. Численное моделирование водообменных процессов в озере Байкал // *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44. № 3. С. 322–331. <https://doi.org/10.7868/S0321059617030154>.
6. The cyclicity in the changes in the chemical composition of the water source of the Angara River (Baikal Stock) in 2017–2018 in comparison with the last 20 years of data / V. I. Grebenshchikova [et al.] // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. Vol. 191. № 12. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7888-z>.
7. Многолетний геохимический мониторинг истока р. Ангара (сток оз. Байкал) / В. И. Гребенщикова [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 480. № 4. С. 449–454. <https://doi.org/10.7868/S0869565218160144>.
8. Ионный состав воды озера Байкал, его притоков и истока реки Ангара в современный период / В. М. Домышева [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 10. С. 77–86.
9. О химическом составе воды в малых притоках и прибрежной зоне озера Байкал в период экологического кризиса / В. В. Тахтеев [и др.] // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47. № 3. С. 291–301. <https://doi.org/10.31857/S0321059620030177>.
10. Семенов М. Ю. Показатели условий формирования химического состава речных вод в бассейне озера Байкал // *География и природные ресурсы*. 2017. № 4. С. 170–179. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4\(170-179\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(170-179)).

11. Семенов М. Ю., Семенов Ю. М., Силаев А. В. Исследование происхождения микроэлементов в речных водах западного побережья озера Байкал // Естественные и технические науки. 2021. Т. 152. № 1. С. 76–81. <https://doi.org/10.25633/ETN.2021.01.10>.
12. Воробьева И. Б., Власова Н. В. Качество поверхностных и подземных вод населенных пунктов юго-западного побережья озера Байкал // Природа Внутренней Азии. 2018. Т. 8. № 3. С. 38–50.
13. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам / Е. П. Чебыкин [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 5. С. 613–631.
14. Consideration on stable isotopic determination in Romanian wines / M. Niculaua [et al.] // Isotopes in Environmental and Health Studies. 2012. Vol. 48. № 2. P. 25–31.
15. H, C, N and S stable isotopes and mineral profiles to objectively guarantee the authenticity of grated hard cheeses / F. Camin [et al.] // Analytica Chimica Acta. 2012. Vol. 711. P. 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.10.047>.
16. Исследование отношений изотопов углерода, кислорода и водорода этанола фруктовых вин / Л. А. Оганесянц [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 4. С. 717–725. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-717-725>.
17. Elemental profile and oxygen isotope ratio ($\delta^{18}\text{O}$) for verifying the geographical origin of Chinese wines / S. Fan [et al.] // Journal of Food and Drug Analysis. 2018. Vol. 26. № 3. P. 1033–1044. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2017.12.009>.
18. Oerter E., Singleton M., Davisson L. Hydrogen and oxygen stable isotope signatures of goethite hydration waters by thermogravimetry-enabled laser spectroscopy // Chemical Geology. 2017. Vol. 475. P. 14–23. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2017.10.025>.
19. Оценка влияния методов водоподготовки на изотопные характеристики упакованных вод / Е. М. Севостьянова [и др.] // Пиво и напитки. 2020. № 2. С. 20–23. <https://doi.org/10.24411/2072-9650-2020-10014>.
20. Tracing groundwater circulation in a valuable mineral water basin with geochemical and isotopic tools: the case of FERRARELLE, Riardo basin, Southern Italy / E. Sacchi [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. 2021. <https://doi.org/10.1007/S10653-021-0-0845-X>.
21. Jean-Baptiste J., Le Gal La Salle C., Verdoux P. Water stable isotopes and volumetric discharge rates to monitor the Rhône water's seasonal origin // Heliyon. 2020. Vol. 6. № 7. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2020.E04376>.
22. Hageman R., Niff G., Roth E. Absolute isotopic scale for deuterium analysis of natural waters. Absolute D/H ratio for SMOW // Telles. 1970. Vol. 22. № 6. P. 712–715. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v22i6.10278>.
23. Изотопный состав природных вод Дальнего Востока России / Н. А. Харитонов [и др.] // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 2. С. 75–86.
24. Seal R. R., Shauks W. C. Oxygen and hydrogen isotope systematics of Lake Baikal, Siberia: Implications for paleoclimate studies // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43. № 6. P. 1251–1261. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.6.1251>.

References

1. Suturin AN, Paradina LF, Epov VN, Semenov AR, Lozhkin VI, Petrov LL. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water. Spectrochimica Acta – Part B Atomic Spectroscopy. 2003;58(2):277–288. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(02\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00157-X).
2. Grachev MA, Domysheva VM, Khojer TV, Korovyakova IV, Golobokova LP, Pogodaeva TV, et al. Depth water of Lake Baikal: A natural reference of fresh water. Chemistry for Sustainable Development. 2004;12(4):417–429. (In Russ.).
3. Ehpov VN, Vasil'eva IE, Suturin AN, Lozhkin BI, Ehpova EN. Opredelenie mikroelementov v Baykal'skoy vode metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy [Determination of trace elements in Baikal water by mass spectrometry with inductively coupled plasma]. Analiticheskaya khimiya [Analytical Chemistry]. 1999;54(11):1170–1175. (In Russ.).
4. Blinov VV, Granin NG, Mizandrontsev IB, Gnatovskii RYu, Zhdanov AA. Seasonal variations in the vertical structure of pelagian water stratum in the Southern Baikal. Water Resources. 2017;44(3):285–295. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0321059617030051>.
5. Ovchinnikova TE, Bocharov OB. Numerical simulation of water exchange processes in Lake Baikal // Water Resources. 2017;44(3):322–331. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0321059617030154>.
6. Grebenshchikova VI, Kuzmin MI, Doroshkov AA, Proydakova OA, Tsydykova SB. The cyclicity in the changes in the chemical composition of the water source of the Angara River (Baikal Stock) in 2017–2018 in comparison with the last 20 years of data. Environmental Monitoring and Assessment. 2019;191(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7888-z>.
7. Grebenshchikova VI, Kuzmin MI, Proydakova OA, Zarubina OV. Long-term geochemical monitoring of the source of the Angara River (runoff from Lake Baikal). Doklady Earth Sciences. 2018;480(4):449–454. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565218160144>.
8. Domysheva VM, Sorokovikova LM, Sinyukovich VN, Onishchuk NA, Sakirko MV, Tomberg IV, et al. Ionic composition of water in Lake Baikal, its tributaries, and the Angara River source during the modern period. Russian Meteorology and Hydrology. 2019;(10):77–86. (In Russ.).

9. Takhteev VV, Eropova IO, Lopatovskaya OG, Khadeeva ER. Water chemistry in small tributaries and the coastal zone of Lake Baikal in the period of environmental crisis. *Water Resources*. 2020;47(3):291–301. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0321059620030177>.
10. Semenov MYu. Indicators of chemical composition formation conditions in river waters within the Lake Baikal drainage basin. *Geography and Natural Resources*. 2017;(4):170–179. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4\(170-179\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(170-179)).
11. Semenov MYu, Semenov YuM, Silaev AV. Study of the origin of microelements in the riverine waters of the west coast of Lake Baikal. *Natural and Technical Sciences*. 2021;152(1):76–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.25633/ETN.2021.01.10>.
12. Vorobyeva IB, Vlasova NV. Quality of surface and ground waters in settlements located at the south-western coast of Lake Baikal. *Nature of Inner Asia*. 2018;8(3):38–50. (In Russ.).
13. Chebykin EP, Sorokovikova LM, Tomberg IV, Vodneva EN, Rasskazov SV, Khodzher TV, et al. Modern state of water in the Selenga River at the territory of Russia over major components and trace elements. *Chemistry for Sustainable Development*. 2012;20(5):613–631. (In Russ.).
14. Niculaua M, Coşofreţ S, Cotea VV, Nechita CB, Odăgeriu G. Consideration on stable isotopic determination in Romanian wines. *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 2012;4(2):25–31.
15. Camin F, Wehrens R, Bertoldi D, Bontempo L, Ziller L, Perini M, et al. H, C, N and S stable isotopes and mineral profiles to objectively guarantee the authenticity of grated hard cheeses. *Analytica Chimica Acta*. 2012;711:54–59. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.10.047>.
16. Oganesyants LA, Panasyuk AL, Kuzmina EI, Ganin MYu. Isotopes of carbon, oxygen, and hydrogen ethanol in fruit wines. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(4):717–725. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-717-725>.
17. Fan S, Zhong Q, Gao H, Wang D, Li G, Huang Z. Elemental profile and oxygen isotope ratio ($\delta^{18}\text{O}$) for verifying the geographical origin of Chinese wines. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2018;26(3):1033–1044. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2017.12.009>.
18. Oerter E, Singleton M, Davisson L. Hydrogen and oxygen stable isotope signatures of goethite hydration waters by thermogravimetry-enabled laser spectroscopy. *Chemical Geology*. 2017;475:14–23. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2017.10.025>.
19. Sevostyanova EM, Kuz'mina EI, Sviridov DA, Shilkin AA, Ganin MYu. The influence of water treatment methods assessment on packaged waters isotopic characteristics. *Beer and beverages*. 2020;(2):20–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2072-9650-2020-10014>.
20. Sacchi E, Cuoco E, Oster H, Paolucci V, Tedesco D, Viaroli S. Tracing groundwater circulation in a valuable mineral water basin with geochemical and isotopic tools: the case of FERRARELLE, Riardo basin, Southern Italy. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. <https://doi.org/10.1007/S10653-021-0-0845-X>.
21. Jean-Baptiste J, Le Gal La Salle C, Verdoux P. Water stable isotopes and volumetric discharge rates to monitor the Rhône water's seasonal origin. *Heliyon*. 2020;6(7). <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2020.E04376>.
22. Hageman R, Niff G, Roth E. Absolute isotopic scale for deuterium analysis of natural waters. Absolute D/H ratio for SMOW. *Telles*. 1970;22(6):712–715. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v22i6.10278>.
23. Kharitonova NA, Chelnokov GA, Bragin IV, Vakh EA. Isotope composition of natural waters of the southern Far East, Russia. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2012;31(2):75–86. (In Russ.).
24. Seal RR, Shauks WC. Oxygen and hydrogen isotope systematics of Lake Baikal, Siberia: Implications for paleoclimate studies. *Limnology and Oceanography*. 1998;43(6):1251–1261. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.6.1251>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-733-742>Оригинальная статья
<http://fppt.ru>

Оптимизация условий мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из плодов боярышника (*Crataegus monogyna* Jacq.)

А. Е. Новикова^{ORCID}, Л. Н. Скрыпник*^{ORCID}Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта^{ORCID}, Калининград, Россия

Поступила в редакцию: 11.06.2021

Принята после рецензирования: 02.07.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: LSkrypnik@kantiana.ru

© А. Е. Новикова, Л. Н. Скрыпник, 2021

Аннотация.

Введение. Большая часть коммерчески доступного пектина выделяется из яблок и цитрусовых. Некоторые виды дикорастущих плодов, в том числе боярышника, отличаются высоким содержанием пектиновых веществ, характеризующихся ценными нутрицевтическими свойствами. Целью исследования стало изучение, моделирование и оптимизация процесса мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из плодов боярышника.

Объекты и методы исследования. Мицеллярно-ферментативную экстракцию из плодов боярышника проводили с использованием 1 % раствора поверхностно-активного вещества Полисорбат-20 и смеси ферментов – целлюлазы и ксиланазы (в соотношении 4:1). Для оптимизации параметров экстракции использовали методологию поверхности отклика с дизайном эксперимента по статистическому плану Бокса-Бенкена. Температуру, время экстракции и модуль варьировали на трех уровнях: 20, 40 и 60 °С, 120, 180 и 240 мин, 15, 30 и 45 мл/г. Влияние параметров на выход пектина оценивали с помощью квадратичной математической модели в виде полиномиального уравнения второго порядка.

Результаты и их обсуждение. Рассчитаны уравнения регрессии и поверхности отклика, позволяющие предсказывать выход пектина при заданных параметрах экстракции с вероятностью 98,14 %. Установлены оптимальные условия мицеллярно-ферментативной экстракции пектина: температура – 41 °С, время – 160 мин, модуль – 32 мл/г. Расчетный выход пектина в оптимальных условиях составил 14,9 %, экспериментальный – 15,2 ± 0,4 %. Содержание галактуроносовой кислоты в выделенном пектине составляло 58,5 %, степень этерификации – 51,5 %. Полученный пектин отличался высокой комплексообразующей способностью по отношению к ионам меди (564 мг Cu²⁺/г), свинца (254 мг Pb²⁺/г) и кобальта (120 мг Co²⁺/г).

Выводы. Использование мицеллярно-ферментативной экстракции позволяет выделять из плодов боярышника пектин, который может использоваться как в пищевой промышленности, так и для разработки продуктов функционального назначения.

Ключевые слова. Боярышник, пектин, галактуроносовая кислота, этерификация, экстракция, тяжелые металлы

Для цитирования: Новикова А. Е., Скрыпник Л. Н. Оптимизация условий мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из плодов боярышника (*Crataegus monogyna* Jacq.) // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 733–742. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-733-742>.

Original article

Available online at <http://fppt.ru/eng>

Combined Surfactant and Enzyme-Assisted Extraction of Pectin from Hawthorn (*Crataegus monogyna* Jacq.) Fruits

Anastasia E. Novikova^{ORCID}, Liubov N. Skrypnik*^{ORCID}Immanuel Kant Baltic Federal University^{ORCID}, Kaliningrad, Russia

Received: June 11 2021

Accepted in revised form: July 02, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: LSkrypnik@kantiana.ru

© A.E. Novikova, L.N. Skrypnik, 2021

Abstract.

Introduction. Commercial pectin is usually obtained from apples or citrus fruits. However, some wild fruits, such as hawthorn,

are also rich in pectin with valuable nutritional and medical properties. The research objective was to study and improve the process of combined surfactant and enzyme-assisted extraction of pectin from hawthorn fruits.

Study objects and methods. The study involved a 1% solution of Polysorbate-20 surfactant and a mix of two enzymes, namely cellulase and xylanase, in a ratio of 4:1. The response surface methodology with the Box-Behnken experimental design improved the extraction parameters. The experiment featured three independent variables – temperature, time, and solvent-to-material ratio. They varied at three levels: 20, 40, and 60°C; 120, 180, and 240 min; 15, 30, and 45 mL per g. Their effect on the parameters on the pectin yield was assessed using a quadratic mathematical model based on a second order polynomial equation.

Results and discussion. The response surface methodology made it possible to derive a second order polynomial regression equation that illustrated the effect of extraction parameters on the yield of polyphenols. The regression coefficient ($R^2 = 98.14\%$) and the lack-of-fit test ($P > 0.05$) showed a good accuracy of the model. The optimal extraction conditions were found as follows: temperature = 41°C, time = 160 min, solvent-to-material ratio = 32 mL per 1 g. Under the optimal conditions, the predicted pectin yield was 14.9%, while the experimental yield was $15.2 \pm 0.4\%$. The content of galacturonic acid in the obtained pectin was 58.5%, while the degree of esterification was 51.5%. The hawthorn pectin demonstrated a good complex-building ability in relation to ions of copper (564 mg Cu^{2+}/g), lead (254 mg Pb^{2+}/g), and cobalt (120 mg Co^{2+}/g).

Conclusion. Combined surfactant and enzyme-assisted extraction made improved the extraction of pectin from hawthorn fruits. The hawthorn pectin can be used to develop new functional products.

Keywords. Hawthorn, pectin, galacturonic acid, esterification, extraction, heavy metals

For citation: Novikova AE, Skrypnik LN. Combined Surfactant and Enzyme-Assisted Extraction of Pectin from Hawthorn (*Crataegus monogyna* Jacq.) Fruits. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):733–742. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-733-742>.

Введение

Разработка функциональных пищевых продуктов с полезными для здоровья свойствами является одной из основных целей исследований в области пищевых наук [1]. В последние несколько десятилетий внимание рынков к функциональным продуктам, обладающим нутрицевтическими свойствами, т. е. способным снижать риск развития различных заболеваний, активизировало научные исследования по изучению и экстракции биологически активных соединений из растений и продуктов растительного происхождения. Фрукты, ягоды и овощи содержат целый комплекс различных питательных фитонутриентов. Они способствуют предотвращению сердечно-сосудистых, нейродегенеративных и онкологических заболеваний, вызываемых развитием в клетках окислительного стресса [2–4].

Помимо культивируемых растений, широким потенциалом в качестве источников биологически активных соединений обладают лекарственные дикорастущие растения и травы, характеризующиеся полезными для здоровья свойствами, которые хорошо известны на протяжении веков [5, 6]. Одним из общепризнанных лекарственных растений является боярышник (*Crataegus* spp.). Растения боярышника представляют собой разветвленный кустарник или небольшое дерево с колючками и шипами, принадлежащее к семейству *Rosaceae* и подсемейству *Rosaceae*. Боярышник произрастает во всем мире и насчитывает около 280 видов, среди которых наиболее распространены *Crataegus monogyna*, *Crataegus laevigata*, *Crataegus mexicana* и др. [7].

Различные части боярышника, в частности плоды, цветы и листья, богаты питательными

веществами. Они ассоциируются со многими полезными для здоровья лекарственными или нутрицевтическими свойствами: антимикробными, противовоспалительными, антиоксидантными, противораковыми и антикоагулянтными [8].

В медицине плоды и цветки боярышника используются как кардиотонические средства, защищающие от стенокардии, гипертонии, сердечной недостаточности, сердечной аритмии, миокардита, артериосклероза, бессонницы и беспокойства [8, 9]. Лекарственное действие плодов и цветков боярышника связано с содержанием в них флавоноидов (преимущественно гиперозида), хлорогеновой и кофейной кислот, тритерпеновых сапонинов (урсоловой и олеаноловой кислот) [10, 11].

Плоды боярышника также богаты пектинами. Пектин – широко используемая пищевая добавка, которая выполняет функции загустителя и желирующего агента [12]. Пектин боярышника отличается высокой вязкостью и более эффективен при образовании и стабилизации эмульсий, чем коммерчески доступный пектин из кожуры цитрусовых [13]. Установлено, что пектиновые полисахариды и олигосахариды боярышника проявляют кардиопротекторное действие, включая защиту сердечно-сосудистой системы, эндотелий-зависимую вазорелаксацию, улучшение коронарного кровообращения и гиполипидемические эффекты [14].

К настоящему моменту для экстракции пектина из различных продуктов растительного происхождения использовались как классические методы (экстракция минеральными кислотами), так и современные (ультразвуковая, микроволновая и ферментативная экстракция). Ферментативная экстракция, основанная

Таблица 1. Переменные факторы и уровни их варьирования

Table 1. Variable factors and their variation levels

Обозначение фактора	Фактор	Уровни		
		–1	0	+1
X_1	Время, мин	120	180	240
X_2	Модуль, мл/г	15	30	45
X_3	Температура, °C	20	40	60

на использовании ферментативных реакций, в результате которых разрушается клеточная стенка и увеличивается проницаемость клеток, обладает рядом преимуществ перед другими видами экстракции. Она позволяет повысить выход экстракции пектина и может использоваться при низких температурах, снижая потребление энергии [15]. Кроме того, одним из новых подходов в экстракции фитокомпонентов является использование поверхностно-активных веществ (ПАВ). Они уже успешно использовались для экстракции лектинов, алкалоидов, антрахинонов, изофлавонов, гидроксикоричных кислот, суммы фенольных соединений и антиоксидантов [16]. Мицеллы, которые образуются при определенной концентрации ПАВ, способны устанавливать химические и физические взаимодействия с гидрофильными или липофильными веществами. Пектин принадлежит к полисахаридам, которые имеют различную химическую структуру с широким диапазоном полярности. Это позволяет предположить, что применение ПАВ при его экстракции также позволит повысить выход пектина из растительного сырья. Анализ имеющихся в литературе данных показал, что ранее для экстракции пектина не применялась мицеллярно-ферментативная экстракция, включающая использование в качестве экстрагентов растворов, содержащих как поверхностно-активные вещества, так и ферменты.

В связи с этим целью исследования стало изучение, моделирование и оптимизация процесса мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из плодов боярышника с использованием статистического плана Бокса-Бенкена.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовались плоды боярышника (*Crataegus monogyna* Jacq.), которые высушивались в сушильном шкафу (Binder BD 53, Германия) при 60 °C до постоянного веса (массовая доля влаги составляла 7,8 %). Далее высушенные плоды измельчались до размера частиц 0,1 мм и просеивались. Подготовленный материал хранился в плотно закрывающейся емкости при комнатной температуре.

Выделение пектина осуществляли методом мицеллярно-ферментативной экстракции с использо-

ванием поверхностно-активного вещества и ферментов. К навеске (1,00 г) измельченного растительного материала добавляли от 15 до 45 мл 0,05 Н раствора лимонной кислоты, смесь ферментов (целлюлазу и ксиланазу в соотношении 4:1) и неионногенное поверхностно-активное вещество Полисорбат-20 (Tween 20, E432) с концентрацией 1 %. Экстракцию проводили в течение 120–240 мин при температуре от 20 до 60 °C. Исследуемые концентрации ПАВ и ферментов были подобраны в предварительных однофакторных экспериментах. Оптимизация параметров (температуры, времени и модуля) экстракции пектина проводилась по статистическому 3-х уровневому 3-х факторному плану Бокса-Бенкена с использованием программного обеспечения Minitab 19 (MINITAB Inc., США). Переменные факторы и уровни их варьирования при экстракции пектина представлены в таблице 1. Экспериментальный план состоял из 15 опытов с тремя центральными точками. Каждый опыт проводили в трех повторностях. Каждая повторность представляла собой отдельный блок. Эксперименты внутри блока проводились случайным образом, чтобы минимизировать эффекты необъяснимой изменчивости наблюдаемых ответов из-за посторонних факторов.

Для определения оптимальных условий использовалась квадратичная математическая модель в виде полиномиального уравнения второго порядка (1):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i=1}^k B_i X_i^2 + \sum_{i>j}^k B_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

где Y – функция отклика; β_0 , B_i , B_{ij} – коэффициенты регрессии; X_i , X_j – значения параметров эксперимента; k – количество факторов (в данном случае $k = 3$).

Функцией отклика был выход пектина из сырья в %.

Для определения выхода пектина полученный экстракт отфильтровывали. Фильтрат разливали по 15 мл в пробирки объемом 50 мл. Затем в каждую пробирку, взвешенную заранее, добавляли 35 мл 95 % спирта. Подготовленные таким образом пробирки инкубировали при температуре +6 °C в течение 12 ч. По истечении этого времени пробирки ставили центрифугироваться на 25 мин при 3900 об/мин (Sigma 3-16P, Германия). Полученный осадок промывали 70 % спиртом и снова ставили центрифугироваться в течение 25 мин при 3900 об/мин. Операцию повторяли 3 раза. Полученный пектин высушивали при температуре 60 °C. Выход пектина из сырья определяли гравиметрически и выражали в процентах (%).

Качество полученного пектина оценивали по степени этерификации, массовой доли галактуроновой кислоты и комплексообразующей способности. Степень этерификации определяли титриметрическим методом [17]. Массовую долю галактуроновой кислоты определяли спектрофотометрическим

методом, основанным на образовании окрашенного в фиолетово-розовый цвет 5-карбоксифурфурола – продукта реакции уроновых кислот с карбазолом [18].

Комплексообразующую способность пектина, выделенного из плодов боярышника, оценивали по его способности связывать ионы свинца, меди и кобальта. Она выражается количеством ионов тяжелого металла, связывающихся с 1 г пектина. Количество связавшихся ионов определяли по разнице между вносимым и остаточным количеством ионов [19, 20].

Все эксперименты проводили в трех повторностях. Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение среднего значения (SE).

Результаты и их обсуждение

Дизайн эксперимента по оптимизации условий мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из плодов боярышника проводился по статистическому 3-х уровневому 3-х факторному

плану Бокса-Бенкена. Дизайн Бокса-Бенкена относится к группе методов, основанных на расчете поверхностей отклика и позволяющих проводить исследования по оптимизации условий с наименьшим количеством экспериментов по сравнению с другими статистическими подходами [21]. Результаты эксперимента были гомоскедастичны в соответствии с тестом Брауна-Форсайта на гомогенность дисперсии ($P \geq 0,05$). Это является обязательным условием для использования метода поверхностей отклика [22].

В результате проведенного исследования было получено полное квадратное полиномиальное регрессионное уравнение зависимости выхода пектина от факторов мицеллярно-ферментативной экстракции (2). Коэффициенты в данном уравнении рассчитаны исходя из не кодированных величин параметров экстракции. Это позволяет, подставляя реальные значения параметра, предсказывать выхода пектина при изменении условий экстракции.

$$\begin{aligned} \text{Пектин, \%} = & 6,97 + 0,0090 X_1 + 0,0374 X_2 + 0,3208 X_3 - 0,000088 X_1 \cdot X_1 - 0,001381 X_2 \cdot X_2 - \\ & - 0,004315 X_3 \cdot X_3 + 0,000317 X_1 \cdot X_2 + 0,000221 X_1 \cdot X_3 + 0,000017 X_2 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (2)$$

где X_1 – время, мин; X_2 – модуль, мл/г; X_3 – температура, °C.

На основании уравнения были получены расчетные значения, которые сравнивались с экспериментальными (средние из трех повторностей). Полученные значения представлены в таблице 2.

На основании данных таблицы 2 был проведен дисперсионный анализ (ANOVA). Данный

статистический метод был использован для проверки гипотез о значимости факторов выбранной математической модели [21, 22]. Результаты дисперсионного анализа представлены в таблице 3.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений было проведено с помощью коэффициента детерминации R^2 , а также значения P теста *lack-of-fit*. Суммарной мерой общего качества уравнения

Таблица 2. Сопоставление результатов полученных на основе уравнения регрессии с экспериментальными значениями

Table 2. Regression equation vs. experimental values

№ опыта	Факторы			Экспериментальное значение $Y_{\text{эксп}} \pm \text{SE}$	Расчетное значение $Y_{\text{расч}}$	Процент отклонения, %
	Время, мин	Модуль, мл/г	T, °C			
1	120	15	40	$11,96 \pm 0,12$	11,99	0,5
2	240	30	20	$14,90 \pm 0,18$	14,88	0,2
3	180	30	40	$12,73 \pm 0,17$	12,70	0,4
4	180	15	20	$14,47 \pm 0,21$	14,46	0,1
5	180	30	40	$12,53 \pm 0,23$	12,34	2,9
6	240	30	60	$14,60 \pm 0,24$	14,61	0,1
7	120	45	40	$12,94 \pm 0,15$	12,97	0,4
8	120	30	20	$14,47 \pm 0,07$	14,40	0,8
9	240	15	40	$13,16 \pm 0,13$	13,04	1,7
10	180	15	60	$13,18 \pm 0,11$	13,14	0,6
11	240	45	40	$13,34 \pm 0,16$	13,35	0,1
12	180	45	20	$15,00 \pm 0,14$	14,88	1,3
13	120	30	60	$13,38 \pm 0,19$	13,53	2,0
14	180	45	60	$14,73 \pm 0,23$	14,88	1,7
15	180	30	40	$13,18 \pm 0,26$	13,16	0,8

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа исследуемых параметров экстракции

Table 3. Results of analysis of variance of the studied extraction parameters

Источник вариации	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-критерий Фишера	P-критерий
Модель	13,4227	1,4914	34,37	0,001
Линейная	1,5931	0,5310	12,24	0,010
X_1	0,5202	0,5202	61,75	0,018
X_2	0,2665	0,2665	0,71	0,056
X_3	0,8065	0,8065	73,52	0,008
Квадратичная	11,2237	3,7412	86,22	0,000
$X_1 \cdot X_1$	0,3683	0,3683	262,38	0,033
$X_2 \cdot X_2$	0,3567	0,3567	560,20	0,035
$X_3 \cdot X_3$	10,9975	10,9975	393,52	< 0,001
С учетом взаимного влияния 2-х факторов	0,6059	0,2020	4,65	0,065
$X_1 \cdot X_2$	0,3249	0,3249	0,77	0,041
$X_1 \cdot X_3$	0,2809	0,2809	109,48	0,052
$X_2 \cdot X_3$	0,0001	0,0001	33,21	0,964
Ошибка	0,2170	0,0434	—	—
Тест <i>lack-of-fit</i>	0,1797	0,0599	3,21	0,246
Коэффициент детерминации, R^2	0,9814			

регрессии соответствия его статистическим данным и основной характеристикой прогностической силы выбранной модели является коэффициент детерминации R^2 . Значение P теста *lack-of-fit* показывает соответствие экспериментальных данных своей математической модели. Если P теста *lack-of-fit* принимает значения больше 0,05, то опытные данные соответствуют проверяемой модели. Сравнение экспериментального и модельного отклика представлено на рисунке 1. Значения

$R^2 = 0,9814$ и $P_{lack-of-fit} = 0,246$ подтверждают соответствие данных математической модели и ее возможность объяснить 98,14 % дисперсии [23].

На основе уравнения регрессии построены поверхности отклика, которые отражают влияние исследуемых переменных на выход пектина при его экстракции из плодов боярышника (рис. 2а–с). Светлой областью отмечены максимальные значения выхода пектина.

На рисунке 2а показано влияние времени экстракции и модуля на выход пектина. Экстракционный выход повышался с увеличением времени экстракции, достигая максимума при 160 мин. Анализ поверхностей отклика (рис. 2а, с) и результатов дисперсионного анализа (табл. 3) показал, что модуль, т. е. отношение объема растворителя на единицу навески, влиял на выход пектина в меньшей степени по сравнению с другими параметрами. Значимое влияние оказывал только квадрат этого фактора. Ранее в ряде работ было показано, что время экстракции пектина обуславливает эффективность процесса. При этом длительность процесса зависит от способа экстракции и вида растительного продукта [24].

Из рисунков 2б и 2с видно, что температура имела положительный линейный эффект и отрицательный квадратичный эффект на эффективность экстракции пектина из плодов боярышника. Самые высокие значения выхода были получены в средней точке. Повышение температуры до 40 °С увеличивало эффективность экстракции пектина. Однако дальнейшее увеличение этого параметра не приводило к увеличению его выхода. Температура является

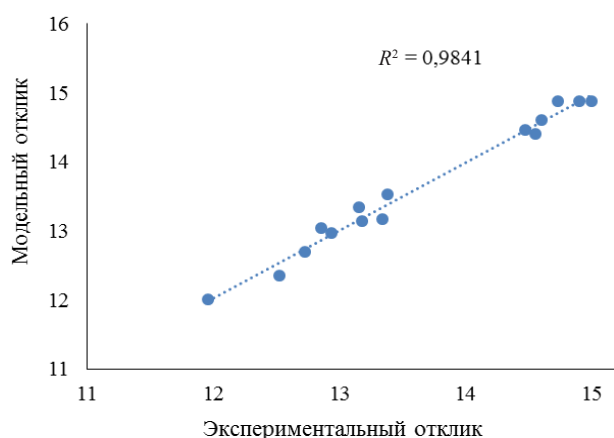


Рисунок 1. Сравнение экспериментальных и модельных откликов при мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из плодов боярышника

Figure 1. Experimental and model responses during enzyme-assisted extraction of pectin from hawthorn fruits

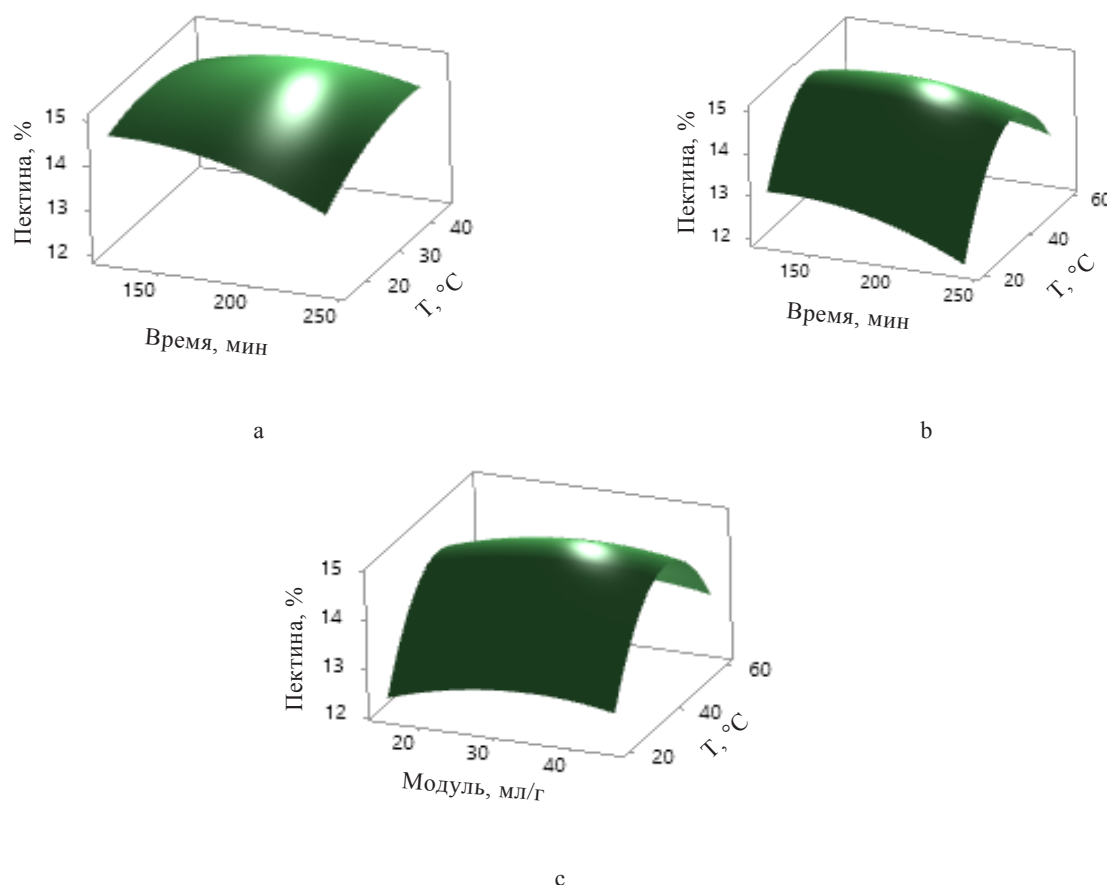


Рисунок 2. Поверхность отклика, отражающая зависимость содержания пектина от:
а – времени и модуля; б – времени и температуры; с – модуля и температуры

Figure 2. Response surface: effect of a – time and module; b – time and temperature; c – module and temperature on pectin content

важнейшим фактором, влияющим на выход пектина при экстракции [25]. Как правило, при оптимизации температурного режима кислотной экстракции пектина из продуктов растительного происхождения исследуются высокие температуры (в пределах от 40–50 до 80–90 °C). Большинство коммерческих пектинов экстрагируют горячими кислотами (HCl или HNO₃) при повышенной температуре ~ 85 °C [26]. Использование поверхностно-активного вещества совместно с ферментами позволило добиться максимального выхода пектина при низких температурах.

На основе проведенного анализа поверхностей отклика были определены оптимальные параметры экстракции, использование которых приводит к максимальному выходу пектина из плодов боярышника. Результаты анализа представлены в таблице 4.

Из данных, представленных в таблице 4, видно, что оптимальными являются следующие значения параметров: температура – 41 °C; время – 160 мин; модуль – 32 мл/г. При заданных параметрах расчетный

выход пектина составлял 14,9 %. Для валидации полученных результатов был проведен эксперимент по выделению пектина при указанных выше оптимальных параметрах. Выход пектина составил $15,2 \pm 0,4$ % ($n = 5$). Значимых различий между экспериментальными и прогнозируемым значениями выявлено не было ($P > 0,05$). Это доказало хорошую прогностическую способность математической модели и ее пригодность для оптимизации мицеллярно-

Таблица 4. Выбор оптимальных параметров мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из боярышника

Table 4. Optimal parameters for enzyme-assisted extraction of pectin from hawthorn

Параметры	Время, мин	Модуль, мл/г	Температура, °C
Верхний уровень	240	45	60
Оптимум	160	32	41
Нижний уровень	120	15	20

Таблица 5. Выбор оптимальных параметров мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из боярышника

Table 5. Optimal parameters for enzyme-assisted extraction of pectin from hawthorn

Показатель	Значение
Массовая доля галактуроновой кислоты, %	$58,5 \pm 1,2$
Степень этерификации, %	$51,5 \pm 0,7$
Комплексообразующая способность по отношению к ионам Cu^{2+} , мг $\text{Cu}^{2+}/\text{г}$	$564,0 \pm 7,6$
Комплексообразующая способность по отношению к ионам Pb^{2+} , мг $\text{Pb}^{2+}/\text{г}$	$253,8 \pm 4,4$
Комплексообразующая способность по отношению к ионам Co^{2+} , мг $\text{Co}^{2+}/\text{г}$	$120,4 \pm 3,1$

ферментативной экстракции пектина из плодов боярышника.

Полученный при оптимальных параметрах экстракции пектин проверялся по основным параметрам качества: массовая доля галактуроновой кислоты, степень этерификации и способность связываться с ионами тяжелых металлов (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+}). Результаты анализов представлены в таблице 5.

Полученные образцы пектина были лишены запаха и имели бежево-коричневатый цвет. Исследование содержания галактуроновой кислоты в образцах пектина, выделенного из плодов боярышника мицеллярно-ферментативной экстракцией, показало, что ее массовая доля составляла 58,5 %. Коммерческие образцы пектина характеризуются высоким содержанием галактуроновой кислоты (более 65 %). Полученное относительно низкое значение содержания галактуроновой кислоты в выделенном при оптимальных условиях пектине связано с пониженной температурой, при которой проводилась мицеллярно-ферментативная экстракция. Ранее было показано, что температура экстракции напрямую влияет на качественные показатели пектина. В работе J. Chen и др. установлено, что пектин, экстрагируемый из цитрусов при температуре 40 °C и ниже, содержит в 1,3 раз меньше галактуровой кислоты, чем пектин, выделенный при 85 °C [26]. Однако полученный при низких температурах пектин отличается высокой вязкостью, сохранением разветвленных остатков нейтральных сахаров в структуре и проявляет высокую биологическую активность.

Степень этерификации представляет собой отношение числа этерифицированных карбоксильных групп к общему их содержанию в пектине. Степень этерификации влияет на желирование пектина. Поэтому пектины делятся на две категории: низкоэтерифицированный (степень этерификации < 50 %) и высокоэтерифицированный (степень

этерификации > 50 %) [27]. Разные формы пектина имеют различное применение. Пектин с высоким содержанием метоксильных групп образует гели при нагревании в кислых растворах с низким pH (2,0–3,5) и в присутствии высоких концентраций сахара (55–75 %). Низкоэтерифицированный пектин может образовывать гель в широком диапазоне pH (2–6) с небольшим количеством сахара или без него в присутствии двухвалентных ионов, таких как кальций (Ca^{2+}) [15]. В образце пектина, выделенного из плодов боярышника, степень этерификации составила 51,5 %. Это говорит о том, что формально полученный пектин является высокоэтерифицированным. Однако на практике в пищевой промышленности обычно используются только пектины со степенью этерификации более 60 %. При рассмотрении вопроса о возможностях применения пектина из боярышника следует учитывать, что пектины со степенью этерификации менее 60 % являются хорошими комплексообразователями, способными связывать ионы тяжелых и радиоактивных металлов и выводить их из организма [28].

Результаты проведенных анализов по оценке комплексообразующей способности пектина, выделенного из плодов боярышника, показали, что он отличался высокой способностью связывать ионы меди (564 мг $\text{Cu}^{2+}/\text{г}$), свинца (254 мг $\text{Pb}^{2+}/\text{г}$) и кобальта (120 мг $\text{Co}^{2+}/\text{г}$). В работе М. Ю. Тамовой и др. было показано, что комплексообразующая способность свекловичного пектина составляет от 2 до 40 мг $\text{Cu}^{2+}/\text{г}$ и от 3 до 40 мг $\text{Co}^{2+}/\text{г}$, яблочного – от 3,5 до 50 мг $\text{Cu}^{2+}/\text{г}$ и от 2,5 до 40 мг $\text{Co}^{2+}/\text{г}$ в зависимости от pH и степени этерификации [19]. В работе Л. П. Мыкоц и др. исследовалась комплексообразующая способность пектина, выделенного из калины, по отношению к ионам свинца [20]. Авторами установлено, что 1 г пектина из калины способен связывать до 194 мг Pb^{2+} .

Таким образом, выделенный в результате мицеллярно-ферментативной экстракции пектин из плодов боярышника можно рекомендовать в диетическом питании тем, кому приходится работать с тяжелыми металлами. С другой стороны, степень этерификации полученного пектина (51,5 %) позволяет его рекомендовать для использования и в пищевой промышленности. Например, при изготовлении кондитерских изделий и выпечки жележных тортов, а также при приготовлении мармеладов и безалкогольных напитков. Продукты с высокими значениями комплексообразования катионов тяжелых металлов можно будет отнести к функциональным продуктам, характеризующимся лечебными и профилактическими свойствами.

Выводы

В ходе проведенного исследования было установлено, что применение мицеллярно-ферментативной экстракции с использованием смеси

ферментов (целлюлазы и ксиланазы в соотношении 4:1) и ПАВ (1 % раствора Полисорбата-20) позволяет эффективно экстрагировать пектин из боярышника без использования дополнительного оборудования (ультразвуковых и микроволновых установок) с хорошим выходом целевого продукта. Полученное в ходе работы регрессионное уравнение экстракционного процесса, показывающее количественное влияние каждого фактора на выход пектина в процессе экстракции, позволяет управлять этим процессом и добиваться наибольшей эффективности. Полученный из боярышника пектин может использоваться как в пищевой промышленности, так и для разработки продуктов функционального назначения.

Критерии авторства

А. Е. Новикова – проведение экспериментальных исследований, обработка данных, подготовка

первоначального варианта рукописи. Л. Н. Скрыпник – организация и руководство исследованиями, разработка методологии эксперимента, написание рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.E. Novikova performed the experimental research, processed the data processing, and drafted the manuscript. L.N. Skrypnik supervised the research, developed the experimental methodology, and proofread the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Bioactive compounds from date fruit and seed as potential nutraceutical and functional food ingredients / S. Maqsood [et al.] // Food Chemistry. 2020. Vol. 308. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125522>.
2. Therapeutic potential of natural antioxidants / K. V. Ramana [et al.] // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2018. Vol. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9471051>.
3. Durazzo A., Lucarini M. Editorial: The state of science and innovation of bioactive research and applications, health and diseases // Frontiers in Nutrition. 2019. Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00178>.
4. *Abelmoschus esculentus* (L.): Bioactive components' beneficial properties – focused on antidiabetic role – for sustainable health applications / A. Durazzo [et al.] // Molecules. 2019. Vol. 24. № 1. <https://doi.org/10.3390/molecules24010038>.
5. Molecules from nature: Reconciling biodiversity conservation and global healthcare imperatives for sustainable use of medicinal plants and fungi / M.-J. R. Howes [et al.] // Plants People Planet. 2020. Vol. 2. № 5. P. 463–481. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10138>.
6. *In vitro* and *in vivo* evaluation of antioxidant properties of wild-growing plants. A short review / R. C. Fierascu [et al.] // Current Opinion in Food Science. 2018. Vol. 24. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.08.006>.
7. Characterization of hawthorn (*Crataegus* spp.) genotypes by SSR markers / M. Güney [et al.] // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2018. Vol. 24. № 6. P. 1221–1230. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0604-6>.
8. Hawthorn (*Crataegus* spp.): An updated overview on its beneficial properties / A. Nazhand [et al.] // Forests. 2020. Vol. 11. № 5. <https://doi.org/10.3390/f11050564>.
9. Cloud A., Vilcins D., McEwen B. The effect of hawthorn (*Crataegus* spp.) on blood pressure: A systematic review // Advances in Integrative Medicine. 2020. Vol. 7. № 3. P. 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.aimed.2019.09.002>.
10. Physicochemical characterization, antioxidant activity, and phenolic compounds of hawthorn (*Crataegus* spp.) fruits species for potential use in food applications / A. Alirezalu [et al.] // Foods. 2020. Vol. 9. № 4. <https://doi.org/10.3390/foods9040436>.
11. Primary, secondary metabolites and molecular characterization of hawthorn (*Crataegus* spp.) genotypes / A. Gurlen [et al.] // Agronomy. 2020. Vol. 10. № 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111731>.
12. Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin – A Review / F. Naqash [et al.] // Carbohydrate Polymers. 2017. Vol. 168. P. 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.058>.
13. Physicochemical characterisation of hawthorn pectins and their performing in stabilising oil-in-water emulsions / J. C. Cuevas-Bernardino [et al.] // Reactive and Functional Polymers. 2016. Vol. 103. P. 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.03.024>.
14. Extraction and isolation of pectin rich in homogalacturonan domains from two cultivars of hawthorn berry (*Crataegus pinnatifida*) / L. Roman [et al.] // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 113. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106476>.

15. An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction / M. Marić [et al.] // Trends in Food Science and Technology. 2018. Vol. 76. P. 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.022>.
16. Skrypnik L., Novikova A. Response surface modeling and optimization of polyphenols extraction from apple pomace based on nonionic emulsifiers // Agronomy. 2020. Vol. 10. № 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010092>.
17. Pistachio green hull pectin: Optimization of microwave-assisted extraction and evaluation of its physicochemical, structural and functional properties / M. Kazemi [et al.] // Food Chemistry. 2019. Vol. 271. P. 663–672. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.212>.
18. Efficient extraction of pectin from sisal waste by combined enzymatic and ultrasonic process / Y. Yang [et al.] // Food Hydrocolloids. 2018. Vol. 79. P. 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.051>.
19. Тамова М. Ю., Починков Т. Б., Булыгина Г. С. Оценка связывающей способности различных пектинов по отношению к ионам меди и кобальта // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2002. Т. 267–268. № 2–3. С. 23–24.
20. Мыкоц Л. П., Романцова Н. А., Гущина А. В. Изучение сорбционной способности пектина, выделенного из плодов калины обыкновенной, по отношению к ионам свинца // Фундаментальные исследования. 2013. № 3–1. С. 197–200.
21. Box–Behnken design based statistical modeling for the extraction and physicochemical properties of pectin from sunflower heads and the comparison with commercial low-methoxyl pectin / X. Peng [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60339-1>.
22. Elsayed N., Hammad K. S. M., Abd El-Salam E. A. E.-S. Plum (*Prunus domestica* L.) leaves extract as a natural antioxidant: Extraction process optimization and sunflower oil oxidative stability evaluation // Journal of Food Processing and Preservation. 2020. Vol. 44. № 10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14813>.
23. Box–Behnken design based multi-response analysis and optimization of supercritical carbon dioxide extraction of bioactive flavonoid compounds from tea (*Camellia sinensis* L.) leaves / J. P. Maran [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2015. Vol. 52. № 1. P. 92–104. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0985-z>.
24. Dao T. A. T., Webb H. K., Malherbe F. Optimization of pectin extraction from fruit peels by response surface method: Conventional versus microwave-assisted heating // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 113. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106475>.
25. Dynamic modelling of pectin extraction describing yield and functional characteristics / N. M. Andersen [et al.] // Journal of Food Engineering. 2017. Vol. 192. P. 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.08.006>.
26. Extraction temperature is a decisive factor for the properties of pectin / J. Chen [et al.] // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 112. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106160>.
27. Rapid enzymatic method for pectin methyl esters determination / L. Łękańska-Andrinopoulou [et al.] // Journal of Analytical Methods in Chemistry. 2013. Vol. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/854763>.
28. Ptichkina N. M., Markina O. A., Romyantseva G. N. Pectin extraction from pumpkin with the aid of microbial enzymes // Food Hydrocolloids. 2008. Vol. 22. № 1. P. 192–195. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.04.002>.

References

1. Maqsood S, Adiamo O, Ahmad M, Mudgil P. Bioactive compounds from date fruit and seed as potential nutraceutical and functional food ingredients. Food Chemistry. 2020;308. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125522>.
2. Ramana KV, Reddy ABM, Ravi Kumar Majeti NV, Singhal SS. Therapeutic potential of natural antioxidants. Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9471051>.
3. Durazzo A, Lucarini M. Editorial: The state of science and innovation of bioactive research and applications, health and diseases. Frontiers in Nutrition. 2019;6. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00178>.
4. Durazzo A, Lucarini M, Novellino E, Souto EB, Daliu P, Santini A. *Abelmoschus esculentus* (L.): Bioactive components' beneficial properties – focused on antidiabetic role – for sustainable health applications. Molecules. 2019;24(1). <https://doi.org/10.3390/molecules24010038>.
5. Howes M-JR, Quave CL, Collemare J, Tatsis EC, Twilley D, Lulekal E, et al. Molecules from nature: Reconciling biodiversity conservation and global healthcare imperatives for sustainable use of medicinal plants and fungi. Plants People Planet. 2020;2(5):463–481. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10138>.
6. Fierascu RC, Ortan A, Fierascu IC, Fierascu I. *In vitro* and *in vivo* evaluation of antioxidant properties of wild-growing plants. A short review. Current Opinion in Food Science. 2018;24:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.08.006>.
7. Güney M, Kafkas S, Keles H, Aras S, Ercişli S. Characterization of hawthorn (*Crataegus* spp.) genotypes by SSR markers. Physiology and Molecular Biology of Plants. 2018;24(6):1221–1230. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0604-6>.
8. Nazhand A, Lucarini M, Durazzo A, Zaccardelli M, Cristarella S, Souto SB, et al. Hawthorn (*Crataegus* spp.): An updated overview on its beneficial properties. Forests. 2020;11(5). <https://doi.org/10.3390/f11050564>.

9. Cloud A, Vilcins D, McEwen B. The effect of hawthorn (*Crataegus* spp.) on blood pressure: A systematic review. *Advances in Integrative Medicine*. 2020;7(3):167–175. <https://doi.org/10.1016/j.aimed.2019.09.002>.
10. Alirezalu A, Ahmadi N, Salehi P, Sonboli A, Alirezalu K, Khaneghah AM, et al. Physicochemical characterization, antioxidant activity, and phenolic compounds of hawthorn (*Crataegus* spp.) fruits species for potential use in food applications. *Foods*. 2020;9(4). <https://doi.org/10.3390/foods9040436>.
11. Gurlen A, Gundogdu M, Ozer G, Ercisli S, Duralija B. Primary, secondary metabolites and molecular characterization of hawthorn (*Crataegus* spp.) genotypes. *Agronomy*. 2020;10(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy10111731>.
12. Naqash F, Masoodi FA, Rather SA, Wani SM, Gani A. Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin – A Review. *Carbohydrate Polymers*. 2017;168:227–239. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.058>.
13. Cuevas-Bernardino JC, Lobato-Calleros C, Román-Guerrero A, Alvarez-Ramirez J, Vernon-Carter EJ. Physicochemical characterisation of hawthorn pectins and their performing in stabilising oil-in-water emulsions. *Reactive and Functional Polymers*. 2016;103:63–71. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.03.024>.
14. Roman L, Guo M, Terekhov A, Grossutti M, Vidal NP, Reuhs BL, et al. Extraction and isolation of pectin rich in homogalacturonan domains from two cultivars of hawthorn berry (*Crataegus pinnatifida*). *Food Hydrocolloids*. 2021;113. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106476>.
15. Marić M, Grassino AN, Zhu Z, Barba FJ, Brnčić M, Rimac Brnčić S. An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction. *Trends in Food Science and Technology*. 2018;76:28–37. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.022>.
16. Skrypnik L, Novikova A. Response surface modeling and optimization of polyphenols extraction from apple pomace based on nonionic emulsifiers. *Agronomy*. 2020;10(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy10010092>.
17. Kazemi M, Khodaiyan F, Labbafi M, Saeid Hosseini S, Hojjati M. Pistachio green hull pectin: Optimization of microwave-assisted extraction and evaluation of its physicochemical, structural and functional properties. *Food Chemistry*. 2019;271:663–672. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.212>.
18. Yang Y, Wang Z, Hu D, Xiao K, Wu J-Y. Efficient extraction of pectin from sisal waste by combined enzymatic and ultrasonic process. *Food Hydrocolloids*. 2018;79:189–196. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.051>.
19. Tamova MYu, Pochinok TB, Bulygina GS. Otsenka svyazyvayushchey sposobnosti razlichnykh pektinov po otnosheniyu k ionam medi i kobal'ta [Evaluating the binding capacity of various pectins in relation to copper and cobalt ions]. *News of Institutes of Higher Education. Food Technology*. 2002;267–268(2–3):23–24. (In Russ.).
20. Mykots LP, Romantsova NA, Gushchina AV. Research of the pectin isolated from fresh fruits of cranberry high for sorption ability in relation to ion of lead. *Fundamental research*. 2013;(3–1):197–200. (In Russ.).
21. Peng X, Yang G, Shi Y, Zhou Y, Zhang M, Li S. Box–Behnken design based statistical modeling for the extraction and physicochemical properties of pectin from sunflower heads and the comparison with commercial low-methoxyl pectin. *Scientific Reports*. 2020;10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60339-1>.
22. Elsayed N, Hammad KSM, Abd El-Salam EAE-S. Plum (*Prunus domestica* L.) leaves extract as a natural antioxidant: Extraction process optimization and sunflower oil oxidative stability evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020;44(10). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14813>.
23. Maran JP, Manikandan S, Priya B, Gurumoorthi P. Box–Behnken design based multi-response analysis and optimization of supercritical carbon dioxide extraction of bioactive flavonoid compounds from tea (*Camellia sinensis* L.) leaves. *Journal of Food Science and Technology*. 2015;52(1):92–104. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0985-z>.
24. Dao TAT, Webb HK, Malherbe F. Optimization of pectin extraction from fruit peels by response surface method: Conventional versus microwave-assisted heating. *Food Hydrocolloids*. 2021;113. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106475>.
25. Andersen NM, Cognet T, Santacoloma PA, Larsen J, Armagan I, Larsen FH, et al. Dynamic modelling of pectin extraction describing yield and functional characteristics. *Journal of Food Engineering*. 2017;192:61–71. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.08.006>.
26. Chen J, Cheng H, Zhi Z, Zhang H, Linhardt RJ, Zhang F, et al. Extraction temperature is a decisive factor for the properties of pectin. *Food Hydrocolloids*. 2021;112. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106160>.
27. Łękawska-Andrinopoulou L, Vasiliou EG, Georgakopoulos DG, Yialouris CP, Georgiou CA. Rapid enzymatic method for pectin methyl esters determination. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2013;2013. <https://doi.org/10.1155/2013/854763>.
28. Ptichkina NM, Markina OA, Rumyantseva GN. Pectin extraction from pumpkin with the aid of microbial enzymes. *Food Hydrocolloids*. 2008;22(1):192–195. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.04.002>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-743-752>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Инновационные технологии очистки сточных вод для ресурсосберегающей деятельности комбикормовых предприятий



С. К. Мизанбекова^{1,*}, И. П. Богомолова²,
И. Н. Василенко², О. А. Уразова²

¹ Казахский национальный аграрный университет, Алматы, Республика Казахстан

² Воронежский государственный университет инженерных технологий^{ROR}, Воронеж, Россия

Поступила в редакцию: 12.04.2021

Принята после рецензирования: 30.08.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: salima-49@mail.ru

© С. К. Мизанбекова, И. П. Богомолова, И. Н. Василенко, О. А. Уразова, 2021

Аннотация.

Введение. Перспективным направлением инновационного развития отраслевых предприятий в области ресурсосбережения и минимизации негативного воздействия на окружающую среду является рациональное использование сточных вод. Содержащееся в их осадке значительное количество пригодных для извлечения, переработки и дальнейшего использования веществ актуализирует данное исследование. Цель работы – обосновать целесообразность применения новых технологий производства метионина, определение потенциальных рисков инноваций, повышающих ресурсный потенциал предприятий, а также расчет экологического и технико-экономического эффекта.

Объекты и методы исследования. Сточные воды от производственной деятельности предприятий комбикормовой промышленности. Использованы системные научные подходы и статистические методы. Расчеты базировались на описании эксперимента внедряемой технологии на предприятии, обобщении балансовой схемы извлечения аминокислоты и материального баланса (массы исходного сырья, вспомогательных веществ, готовой продукции и потерь в виде выбросов, сбросов и твердых отходов), анализе экологического ущерба, диалектическом сравнении результатов альтернативного и традиционного технологических решений.

Результаты и их обсуждение. Обоснованы потенциальные риски внедрения (необходимость частичной реорганизации производственной структуры предприятия и технологии выпуска комбикормов, дополнительная потребность в инвестиционных ресурсах и др.) и эколого-экономический эффект применения технологии производства метионина из сточных вод комбикормового производства. Расчетная часть была выполнена на примере отраслевого предприятия Воронежской области. За год планируется выпустить 1452 т продукции (метионина) на сумму 58080 тыс. руб., рентабельность реализованной продукции составит 616,76 %, валовая рентабельность продаж – 86,1 %, срок окупаемости проекта – 1,44 месяца, показатель эффективности капитальных вложений – 8,45. Была доказана экономическая целесообразность реализации данного проекта на базе комбикормового производства предприятия.

Выводы. Реализация инновационного проекта позволит снизить негативное влияние на окружающую среду, повысить ресурсоэффективность предприятия и обеспечить дополнительный доход. Оценка проекта подтверждает целесообразность его конструкторских, технических и технологических решений.

Ключевые слова. Комбикормовое производство, ресурсосбережение, эффективность, импортозамещение, метионин, сточные воды, экология

Финансирование. Работа выполнена на базе Казахского национального аграрного университета (КазНАУ) и Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ)^{ROR}.

Для цитирования: Инновационные технологии очистки сточных вод для ресурсосберегающей деятельности комбикормовых предприятий / С. К. Мизанбекова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 743–752. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-743-752>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Innovative Wastewater Treatment Technologies for Resource-Saving Activities of Feed Mills

Salima K. Mizanbekova^{1,*}, Irina P. Bogomolova²,
Irina N. Vasilenko², Olga A. Urazova²

¹ Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Republic of Kazakhstan

² Voronezh State University of Engineering Technologies , Voronezh, Russia

Received: April 12, 2021

Accepted in revised form: August 30, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: salima-49@mail.ru

© S.K. Mizanbekova, I.P. Bogomolova, I.N. Vasilenko, O.A. Urazova, 2021

Abstract.

Introduction. National economies are looking for tools to activate the explicit and hidden resource potential. Innovative resource-saving projects are such a tool. Feed production strives to increase its resource efficiency.

Study objects and methods. The present research featured the feed industry of the Russian Federation and regional feed mills. It involved structural, functional, and systematic approaches and standard research methods.

Results and discussion. Liquid waste proved to be an important resource potential of modern feed production. It contains substances with high nutritional, biological, and energy value and can be used to produce methionine. The experimental part featured an industrial enterprise in the Voronezh region, which expects to produce 1452 tons of methionine worth 58 080 thousand rubles. The profitability will be 616.76%, the gross return on sales – 86.1%, the payback time – 1.44 months, the efficiency of capital investments – 8.45.

Conclusion. The innovative project will reduce the negative impact on the environment, increase the resource efficiency of the enterprise, and provide additional income.

Keywords. Compound feed production, resource saving, efficiency, import substitution, methionine, waste water, ecology

Funding. The work was performed on the premises of the Kazakh National Agrarian Research University (KazNARU) and the Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET) .

For citation: Mizanbekova SK, Bogomolova IP, Vasilenko IN, Urazova OA. Innovative Wastewater Treatment Technologies for Resource-Saving Activities of Feed Mills. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):743–752. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-743-752>.

Введение

В настоящее время актуальность инновационных преобразований и разработок в различных областях и сферах экономической деятельности приобрела экстраординарный характер. Именно инновационные разработки и решения позволяют ведущим экономикам мира укреплять свои позиции и наращивать конкурентные преимущества.

Интенсивный формат экономического воспроизводства вышел на совершенно иной уровень приоритета, в основе которого находятся инновационные методы и подходы. Инновационные преобразования имеются в различных сферах и производственных процессах. Высокую перспективную значимость и актуальность в настоящее время приобрели ресурсосберегающие проекты инновационного типа.

Отмеченные тенденции актуальны для сферы агропромышленного производства, в частности для комбикормовой промышленности. Несмотря на положительный тренд развития отрасли, сегодня ей присущи многие проблемы системного порядка. Их разрешение требует разработки и применения новых/инновационных методов и подходов. Применение ресурсосберегающих технологий позволяет не только оптимизировать уровень ресурсопотребления и повысить эффективность использования всех

имеющихся в распоряжении предприятия ресурсов, но и выявить ресурсный потенциал и максимально использовать его в реальном производственном процессе.

Важным направлением применения инновационных решений в сфере комбикормового производства является рационализация использования сточных вод с целью достижения максимального уровня минимизации негативного воздействия на окружающую среду и получения дополнительного дохода. Сточные воды комбикормовых предприятий содержат большое количество веществ, пригодных для извлечения и дальнейшего использования. Среди них можно выделить такую аминокислоту, как метионин, относящуюся к числу незаменимых аминокислот, не способных синтезироваться в организме животного, поэтому при кормлении данную аминокислоту вводят в качестве пищевой добавки. Дефицит метионина в рационе животных приводит к нарушению синтеза белков, наступает жировая инфильтрация костной ткани, расстройство нервной системы и нарушается кроветворная функция костного мозга. Таким образом, можно сделать вывод о большой физиолого-биохимической роли метионина в организме животных.

Следовательно, одним из важнейших элементов ресурсного потенциала современного комбикормового

производства является осадок сточных вод, в котором содержится большое количество веществ, обладающих высокой пищевой, биологической и энергетической ценностью. В аспекте последнего в работе была поставлена цель – выполнить технико-экономическое обоснование инновационного проекта ресурсосберегающего типа (технология производства метионина из сточных вод комбикормового производства (патент на изобретение № 2737773)).

Проведенные оценочные расчеты были выполнены исходя из следующих начальных условий: плановый объем выпуска продукции – 1452 т продукции (метионина); отпускная цена реализации – 40 тыс. руб./т. Цена была определена исходя из показателя себестоимости и среднего уровня цен аналогичного товара на потребительском рынке. Это было сделано, чтобы обеспечить требуемый уровень конкурентоспособности товара. В ходе проведенных расчетов были получены следующие данные: рентабельность реализованной продукции – 616,76 %; валовая рентабельность продаж – 86,1 %; срок окупаемости проекта – 1,44 месяца; показатель эффективности капитальных вложений – 8,34; показатель эколого-экономической-эффективности – 8,27.

Исходя из полученных данных, а также учитывая результаты проведенного маркетингового исследования, которое доказало наличие устойчивого потребительского спроса на данную продукцию, можно сделать вывод о том, что данный инновационный проект обладает необходимым уровнем конструкторской, технико-технологической и экономической целесообразности. Его реализация на промышленно-производственной площадке обеспечит предприятию высокий уровень ресурсоэффективности, экологичности производства, дополнительный доход, а также повысит общий показатель эффективности и конкурентоспособности.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выступила комбикормовая промышленность России. Прикладные разработки были апробированы на примере одного из комбикормовых заводов Воронежской области.

В работе были использованы общенаучные подходы (структурный, функциональный, системный) и методы (анализ, синтез, дедукция, обобщение,

научное объяснение); диалектические методы познания; методы теоретического исследования (идеализация, мысленный эксперимент, гипотетико-дедуктивный метод); методы эмпирического исследования (описание, сравнение).

Результаты и их обсуждение

Комбикормовая промышленность является важнейшим структурно-функциональным звеном всего агропромышленного комплекса, находясь в центре всей производственно-технологической цепочки продовольственного рынка [1–4]. Последнее десятилетие отечественное комбикормовое производство развивается успешно (среднегодовой темп прироста – 6,7 %). Среди основных причин данной тенденции стоит выделить: перманентный рост спроса на корма со стороны основного потребителя – животноводческого сектора АПК; хорошую организацию системы сырьевого обеспечения (производство основных компонентов для выработки кормов) [5–8]. поголовье птицы в сельскохозяйственных предприятиях за последние 10 лет (2010–2020 гг.) увеличилось на 23,8 %, а свиней – в 2,2 раза.

Анализ данных показал, что в 2020 г. отечественной комбикормовой промышленностью было выработано порядка 30,8 млн т комбикормов (+ 3,9 % к предыдущему периоду). Необходимо подчеркнуть, что по факту объемы производства кормов выше, т. к. в данном отраслевом сегменте имеется теневой рынок (~ 25 %). Результаты его деятельности не отражаются в данных официальной статистики [9, 10].

Структура производства комбикормов соответствует уровню потребительского спроса. Около 50 % всех кормов приходится на птицеводство, доля свиноводства – 41,7 %, доля комбикормов для КРС составляет 7,8 % (табл. 1). Остальная часть (~ 0,5 %) приходится на долю кормов для аквакультуры, звероводства и прочих животных.

Исследование структуры рынка (баланс спроса и предложения) показало, что внутренние потребности в комбикормах полностью удовлетворяются отечественными производителями. При этом объемы экспортных и импортных поставок незначительны (доля экспорта менее 0,2 %).

Таблица 1. Динамика производства комбикормов в России, млн т [11]

Table 1. Dynamics of mixed feed production in Russia, million tons [11]

Вид комбикорма/Год	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Для сельскохозяйственной птицы	14,047	14,379	15,483	15,637	15,662	15,384
Для свиней	8,599	9,461	10,226	11,204	12,248	12,853
Для КРС	2,066	2,133	2,202	2,224	2,338	2,419
Итого	24,7	26,0	27,9	29,1	30,2	30,7

Основным сырьем для производства отечественных комбикормов являются зерновые и зернобобовые культуры и их смеси. Также находят применение отходы мукомольно-крупяной промышленности (отруби, сечка, дробленка). Доля зерновых в готовых комбикормах составляет порядка 45–70 % в зависимости от их вида. Кроме того, в рецептуру комбикормов могут входить следующие компоненты: мука (травяная и животного происхождения), белково-витаминно-минеральные концентраты и добавки, ферменты, аминокислоты и др. Современная комбикормовая промышленность России зависит от функционирования и тенденций развития зернового рынка, а также импортных поставок различных добавок и питательных компонентов (БВМД, ВМК, ферменты, аминокислоты). В настоящее время более 80 % кормовых добавок поставляются из-за рубежа. Основными поставщиками являются Китай, Дания, Норвегия, Германия, Белоруссия и Бразилия [9, 12].

Таким образом, несмотря на положительное развитие отрасли, сегодня ей присущи многие проблемы системного порядка. Их разрешение требует разработки и применения новых инновационных методов и подходов.

Важным направлением применения инновационных решений в сфере комбикормового производства является рационализация использования сточных вод с целью достижения максимального уровня минимизации негативного воздействия на окружающую среду и получения дополнительного дохода [2, 13].

Сточные воды комбикормовых предприятий содержат большое количество веществ, пригодных для извлечения и дальнейшего использования. Среди них можно выделить такую аминокислоту, как метионин. Он относится к числу незаменимых аминокислот, не способных синтезироваться в организме животного, поэтому при кормлении метионин вводят в качестве пищевой добавки. Дефицит метионина в рационе животных приводит к нарушению синтеза белков, наступает жировая инфильтрация костной ткани, расстройство нервной системы и нарушается кроветворная функция костного мозга. Таким образом, метионин играет большую физиолого-биохимическую роль в организме животных.

В реальном производственном процессе (откорм животных) потребности скота и птицы в метионине удовлетворяются за счет компонентов натурального или синтетического сырья. Отраслевые расчеты показывают, что 0,1 % метионина в рационе можно восполнить соевым шротом (16 %) или рыбной мукой (5,6 %). Кроме того, можно использовать синтетическую добавку метионина (DL-метионина) в объеме 0,1 %, что составляет порядка 31 тыс. т в год (табл. 1.). Использовать синтетический метионин экономически выгодно и целесообразно, т. к. животные не потребляют избыточный белок –

дорогой и негативно воздействующий на показатели их продуктивности [8].

Таким образом, предлагается к внедрению технология выделения метионина из сточных вод комбикормовых заводов. Она позволит получить целевой продукт с последующей его реализацией при приготовлении премиксов, комбикормов и кормовых добавок с более низкой себестоимостью из-за снижения затрат на транспортировку и выделения целевых продуктов из отходов производства. Данная технология ориентирована на решение экологических проблем, поскольку внедренная инновация позволит снизить объем сточных вод предприятия.

Так как современная отечественная комбикормовая промышленность зависит от импортных поставок различных белково-витаминно-минеральных добавок, в том числе аминокислот, то реализация данного инновационного проекта позволит не только минимизировать издержки отдельных отраслевых предприятий, но и усилить позиции страны в плане импортозамещения. Метионин, выделенный по предлагаемой технологии, будет иметь более низкую себестоимость из-за снижения затрат на транспортировку и выделения целевого продукта из отходов производства. Средняя цена на рынке кормового метионина отечественного производства по данным 2019 г. равна 70 руб./кг, в то время как цена зарубежного аналога 100 руб./кг. Стоимость метионина, выделенного предлагаемым способом, будет значительно ниже даже отечественных цен – 40 руб./кг [14, 15].

В таблице 2 представлены основные отечественные и зарубежные производители метионина.

Было выполнено (по данным 2019–2020 гг.) технико-экономическое обоснование проекта применения технологии извлечения метионина из сточных вод на примере одного из комбикормовых заводов Воронежской области. Основные риски внедрения технологии извлечения метионина из сточных вод приведены на рисунке 1.

Грамотная постановка задач менеджмента является важнейшим фактором, влияющим на успех реализации проекта. На рисунке 2 представлена балансовая схема извлечения аминокислоты, являющаяся основой всех дальнейших расчетов.

Таблица 2. Основные производители метионина

Table 2. Main producers of methionine

Отечественные производители	Зарубежные поставщики
АО «АминоСиб» (Тюменская область)	«CheilJedang» (Индонезия)
ЗАО «Завод премиксов № 1» (Белгородская область)	«Bio-Chem» (Китай)
ООО «Волжский Оргсинтез» (Волгоградская область)	

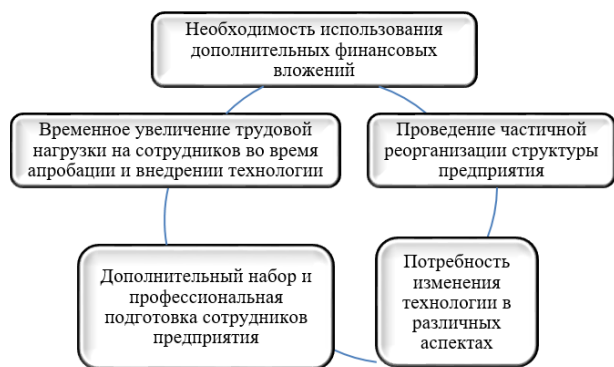


Рисунок 1. Потенциальные риски реализации проекта [8, 16, 17]

Figure 1. Potential risks [8, 16, 17]

Расчет проводился по методике В. И. Данилова-Данильяна. Исходные данные для расчета: производительность линии – 4400 кг/сут.; годовой фонд рабочего времени – 330 дней (оставшиеся дни планируется отвести под промывку, дезинфекцию и наладку оборудования); извлечению подвергается 98 % содержащегося в сточной воде метионина – 1452 т/год; 2 % составляют потери (29,6 т/год). Приведенные характеристики описаны в технологии извлечения метионина из сточных вод – патент на изобретение № 2737773.

Материальный баланс должен удовлетворять условию:

$$M_1 + M_2 = M_3 + M_4 \quad (1)$$

где M_1 – масса исходного сырья, т/год; M_2 – масса вспомогательных веществ, т/год; M_3 – масса готовой

продукции, т/год; M_4 – потери (выбросы, сбросы, твердые отходы), т/год.

Рассчитали показатель предотвращенного экологического ущерба водным ресурсам, чтобы понять, сколько можно сэкономить финансовых ресурсов на уплате налога за негативное влияние на окружающую среду. Данный показатель определяется по следующей аналитической формуле:

$$Y^B = Y_{уд}^B \times K_{эгр}^B \times \sum_{i=1}^n M_i \times K_{и} \quad (2)$$

где Y^B – экологический ущерб водным ресурсам в рассматриваемом r -ом регионе в течение отчетного периода, руб.; $Y_{уд}^B$ – показатель удельного ущерба водным ресурсам, наносимого единицей (условная тонна) приведенной массы загрязняющих веществ на конец отчетного периода для j -го водного объекта в рассматриваемом r -ом регионе, руб./усл. т (для бассейнов рек Воронежской области на период с 2015 по 2019 гг. в медианном значении составляет 9772 руб./усл. т); M_i – приведенная масса загрязняющих веществ, поступивших в j -й водный источник с k -го объекта в r -ом регионе в течение отчетного периода времени, тыс. усл. т; $K_{эгр}^B$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния водных объектов по бассейнам основных рек (для бассейнов рек Воронежской области за аналогичный период равен 1,15); $K_{и}$ – коэффициент индексации базовых нормативов платы (равен 5,43).

$$M_i = \sum (m_i^B \times K_{эгр}^B) \quad (3)$$

где m_i^B – фактическая масса i -го загрязняющих веществ, поступившего в водный объект в течение отчетного периода, т; $K_{эгр}^B$ – коэффициент эколого-экономической опасности i -го загрязняющих веществ или группы веществ; i – индекс загрязняющего вещества или группы веществ.



Рисунок 2. Балансовая схема извлечения аминокислоты [8]

Figure 2. Balance scheme of amino acid extraction [8]

Таблица 3. Показатели предотвращенного ущерба водным объектам

Table 3. Indicators of prevented water pollution

Вещество	$K_{гр}^B$	$y_{уд}^B$	$K_{и}$	K_i^B	Фактический сброс, т/год	Ущерб водным объектам, руб.
Аминокислота метионин	1,15	9772	5,43	90	29,6	16260620,65

Рассчитали показатель предотвращенного экологического ущерба водным ресурсам (табл. 3).

Далее провели расчет технико-экономических показателей работы проектируемой технологической линии. Затраты определяются капитальными затратами на сооружение установок и эксплуатационными расходами, обеспечивающими нормальную эксплуатацию установки, руб./год.

Исходные данные для расчетов, в соответствии с информацией 2019 г., приведены в таблицах 4 и 5.

Характеристики закупаемых производственных аппаратов с совокупной закупочной стоимостью более 2,5 млн руб. представлены в таблице 5.

Далее необходимо рассчитать капитальные затраты на основное и дополнительное оборудование, его транспортировку, затраты на монтаж и строительные работы. В таблице 6, в соответствии со статистическими данными 2019 г., представлена сводная характеристика капитальных вложений

Затем необходимо провести расчет эксплуатационных расходов, в состав которых входят стоимость сырья, энергетические затраты, заработная плата сотрудников и т. д. В таблице 7, по информации указанного периода, представлена сводная характеристика эксплуатационных расходов.

Таблица 4. Характеристика параметров технологического процесса извлечения метионина

Table 4. Technological process of methionine extraction

Наименование параметра	Значение параметра
Производительность предприятия, кг/ч	183,3
Время работы производства: дней в году	330
часы	24
смены	2
Стоимость исходных материалов, руб./т: соляная кислота	16500
аммиак	4191,3
Стоимость готовой продукции, руб./т	40 000
Заработная плата, руб.: производственные рабочие	22000
инженерно-технические работники	27000
Количество работников: производственные рабочие	7
ИТР	6
	1

Провели расчет прибыли от реализации продукции и эколого-экономической эффективности. Планируется, что предприятие будет выпускать 1452 т/год готовой продукции. Цена реализации данной продукции составит порядка 40 тыс руб./т. Таким образом, годовая выручка от реализации продукции составит:

$$B_{гп} = 1452 \times 40000 = 58080 \text{ тыс. руб.}$$

Используя исходные данные, эколого-экономическая эффективность для предлагаемой к проектированию технологической линии для извлечения аминокислот из производственных

Таблица 5. Характеристики производственных аппаратов [16]

Table 5. Characteristics of production equipment [16]

Наименование аппарата	Количество, шт.	Мощность, кВт/ч
Емкость для хранения	2	1,35
Ионообменная колонна «ABC EnvironmentTech»	1	3,50
Регенерационная колонна «ABC EnvironmentTech»	1	3,50
Распылительная сушилка PC 1000	1	15,00
Вакуум-выпарной аппарат МЗС-320	1	10,75
Упаковочная установка «LIEBFRIED»	1	2,50

Таблица 6. Сводная характеристика капитальных вложений

Table 6. Capital investments

Виды затрат	Сумма, руб.
Основное технологическое оборудование, K_1	2547000,00
Дополнительное оборудование, K_2	509400,00
Полная стоимость оборудования, $K_{об}$	3056400,00
Транспорт, K_3	259794,00
Металлоконструкции, K_4	1528200,00
Монтаж оборудования, K_5	458460,00
Строительные работы, K_6	611280,00
Всего, $K_{кап}$	5914134,00

Таблица 7. Сводная характеристика эксплуатационных расходов

Table 7. Operating costs

Виды затрат	Сумма, руб.
Энергетические затраты, C_1	1352538
Основная и дополнительная заработная плата рабочих и ИТР, C_2	1908000
Отчисления на социальное страхование, C_3	696420
Расходы на текущий ремонт, C_4	232126
Амортизация, C_5	376854
Общепроизводственные расходы, C_6	1842700
Общехозяйственные расходы, C_7	916296
Стоимость сырья, C_8	778152
Всего, $C_{\text{сб}}$	8103086

сточных вод пищевых предприятий определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{э}} = \frac{Y_{\text{пр}} + B_{\text{гп}}}{C_{\text{а}} + E_{\text{н}} \cdot K_{\text{а}}} \quad (4)$$

где $Y_{\text{пр}}$ – общий предотвращенный экологический ущерб, руб.; $B_{\text{гп}}$ – выгоды от реализации готовой продукции за год, руб.; $C_{\text{а}}$ – годовые эксплуатационные расходы, руб.; $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности ($E_{\text{н}} = 0,15$); $K_{\text{а}}$ – капитальные затраты на строительство, руб.

$$\mathcal{E}_{\text{э}} = \frac{16260620,65 + 58080000}{8103085,96 + 0,15 \times 5914134} = 8,27$$

Расчеты свидетельствуют о целесообразности проведения работ в данной области, т. к. эколого-экономическая эффективность имеет положительное значение.

Далее рассчитали экономические показатели, определяющие эффективность проекта.

Рентабельность реализованной продукции рассчитали по формуле:

$$P_{\text{рп}} = ((B_{\text{гп}} - C)/C) \times 100 \quad (5)$$

где P – уровень рентабельности продукции; Π – прибыль от реализации продукции, тыс. руб.; C – полная себестоимость реализованной товарной продукции, тыс. руб.

Затраты на 1 руб. товарной продукции:

$$3 = C/B_{\text{гп}} \quad (6)$$

Валовую рентабельность продаж рассчитали по следующей формуле:

$$P_{\text{вп}} = ((B_{\text{гп}} - C)/B_{\text{гп}}) \times 100 \quad (7)$$

Производительность труда (тыс. руб./чел.) определили по следующей формуле:

Таблица 8. Показатели эффективности проекта

Table 8. Project effectiveness

Показатель	Значение
Годовой объем продукции, т/год	1452
Отпускная цена реализации, тыс. руб./т	40
Объем капитальных вложений, тыс. руб.	5914,1
Выручка от продаж, тыс. руб.	58080
Себестоимость продаж, тыс. руб.	8103,1
Прибыль от реализации продукции, тыс. руб.	49976,9
Эколого-экономическая эффективность	8,27
Рентабельность реализованной продукции, %	616,8
Валовая рентабельность продаж, %	86,1
Затраты на 1 руб. товарной продукции, коп.	0,14
Производительность труда, тыс. руб./чел.	8297142,9
Срок окупаемости инвестиций, год	0,12
Эффективность капитальных вложений	8,34

$$\Pi_{\text{т}} = \Pi / \mathcal{E}_{\text{ппп}} \quad (8)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ппп}}$ – численность промышленно-производственного персонала.

Срок окупаемости инвестиций для вновь строящихся предприятий ($T_{\text{ок}}$) рассчитали по формуле:

$$T_{\text{ок}} = K/\Pi \quad (9)$$

где K – объем капитальных инвестиций, тыс. руб.

Показатель эффективности капитальных вложений ($\mathcal{E}_{\text{к}}$) рассчитали по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{к}} = \Pi/K = 1/T_{\text{ок}} \quad (10)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 8.

Предприятия комбикормовой промышленности являются стратегическими объектами любой экономики. Комбикорма играют важную роль, т. к. они служат для откорма животных и птицы в сельском хозяйстве. Следовательно, они являются основой для других социально значимых отраслей промышленности, выпускающих продукты питания для населения страны. Стабильный рост цен на зерно в отсутствие механизмов государственного регулирования зернового рынка обуславливает рост цен на готовую продукцию технологической цепи «сельское хозяйство (растениеводство) – комбикормовое производство – животноводство – перерабатывающая промышленность – оптовые и розничные рынки» [5, 18, 19].

Ограниченность инвестиционных ресурсов определяет необходимость проведения многовариантных альтернативных расчетов и выбор оптимального варианта инвестиционного проекта: новое строительство, проведение работ по модернизации, расширение или техническое перевооружение действующего предприятия. Строительство новых предприятий, как и

реконструкция действующих, а также открытие новых цехов на действующих предприятиях должны способствовать повышению эффективности производства, более полному удовлетворению потребностей населения в продуктах питания, созданных на основе животного сырья, содействовать развитию экономики страны и повышению ее продовольственной безопасности [8, 15, 20].

Выводы

В работе предложено инновационное решение по совершенствованию управления ресурсоэффективностью на предприятии на основе технологии извлечения метионина из сточных вод (патент на изобретение № 2737773). Реализация проекта направлена на решение стратегических задач импортозамещения белково-витаминных-минеральных добавок для производства полноценных комбикормов. Она позволит предприятию снизить негативное влияние на окружающую среду, повысить ресурсоэффективность деятельности и получить дополнительный доход. Все это будет достигнуто благодаря снижению затрат на транспортировку и выработку целевого продукта (метионин) из отходов собственного производства. За год планируется выпустить дополнительно 1452 т продукции, рентабельность реализованной продукции составит 616,8 %, валовая рентабельность продаж – 86,1 %, срок окупаемости проекта – 1,44 месяца, показатель эффективности капитальных вложений – 8,45 (один рубль инвестиций принесет 8,45 руб. прибыли), эколого-экономическая эффективность составит – 8,27.

Таким образом, расчеты доказали целесообразность конструкторских, технико-технологических и экономических решений проекта.

Критерии авторства

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за достоверность информации и уникальность разработок.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы работы выражают благодарность авторам патента № 2737773 (сотрудникам ФГБОУ ВО «ВГУИТ» Е. Н. Пономаревой, И. Н. Пугачевой, С. В. Шахову, А. Е. Куцовой, Л. В. Молокановой), а также руководству комбикормового предприятия за предоставленную информацию и участие в качестве независимых экспертов оценки результатов научного исследования.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the authors of patent No. 2737773 E.N. Ponomareva, I.N. Pugacheva, S.V. Shakhov, A.E. Kutsova, and L.V. Molokanova for the information and expertise.

Список литературы

1. Bolotova Yu. V. Agricultural supply management and market power: evidence from the U.S. dairy and potato industries // *Agribusiness*. 2016. Vol. 32. № 4. P. 563–568. <https://doi.org/10.1002/agr.21485>.
2. Закшевский В. Г., Богомолова И. П., Василенко И. Н. Управление развитием отраслевого предприятия на основе активизации механизма риск-менеджмента // *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2020. Т. 58. № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.33938/201-3>.
3. Костарева Л. «Витомэ»: новинки для разных отраслей животноводства // *Комбикорма*. 2020. № 2. С. 20–21.
4. Перспективы развития комбикормового производства в России на основе совершенствования ресурсного обеспечения / Л. Т. Печеная [и др.] // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2019. № 3. С. 8–19.
5. Resource-saving waste-free production as an innovative method of improving enterprises' business performance in the meat production / I. P. Bogomolova [et al.] // *International Transaction Journal of Engineering, Management, and Applied Sciences and Technologies*. 2019. Vol. 10. № 12. <https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2019.163>.
6. Mapping potential implications of temporary COVID-19 export bans for the food supply in importing countries using precrisis trade flows / M. Koppenberg [et al.] // *Agribusiness*. 2021. Vol. 37. № 1. P. 25–43. <https://doi.org/10.1002/agr.21684>.
7. Postbiotics and paraprobiotics: A review of current evidence and emerging trends / B. Vallejo-Cordoba [et al.] // *Advances in Food and Nutrition Research*. 2020. Vol. 94. P. 1–34. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2020.06.001>.
8. Инновации в комбикормовой отрасли. URL: <https://ikonews.ru/industry/novyyj-nedorogoj-istochnik> (дата обращения: 22.03.2021).

9. Обзор кормовой отрасли по итогам 2019. URL: <https://www.dairynews.ru/news/rynok-kormov-itogi-2019-obzor-kormovoy-otrasli-po-.html> (дата обращения: 23.03.2021).
10. Экспресс-обзор российского рынка комбикормов. URL: <https://3dpro.info/site/reviews/russian-compound-feed-market-2020> (дата обращения: 25.03.2021).
11. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.gks.ru> (дата обращения: 24.03.2021).
12. Modernization of the raw material base for the Russian meat production subcomplex in the conditions of improving the production innovativeness / A. V. Kotarev [et al.] // *Revista San Gregorio*. 2019. № 34. P. 288–298.
13. Kühne B., Gellynck X., Weaver R. D. Enhancing innovation capacity through vertical, horizontal, and third-party networks for traditional foods // *Agribusiness*. 2015. Vol. 31. № 3. P. 294–313. <https://doi.org/10.1002/agr.21408>.
14. Савинцев Д. И. Выбор стратегии развития комбикормового производства региона: подходы и принципы // *Общество: политика, экономика, право*. 2018. № 5. С. 14–18.
15. Сыроватка В. И., Обухов А. Д. Инновационные технологии производства комбикормов в хозяйствах // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2017. Т. 1. № 1. С. 74–77.
16. Kotarev A. Analytical study of agribusiness as a tool for competitive development of the region in the context of globalization and integration risk // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 274. № 1. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/274/1/012035>.
17. Комбикорма, кормовые добавки и ЗЦМ для животных: состав и применение / В. А. Крохина [и др.]. М.: Агропромиздат, 1990. 304 с.
18. Consumer perception of organic food in emerging markets: Evidence from Saint Petersburg, Russia / V. Bruschi [et al.] // *Agribusiness*. 2015. Vol. 31. № 3. P. 414–432. <https://doi.org/10.1002/agr.21414>.
19. Mishurov N. P., Voytyuk V. A., Sypok S. I. Management of export activities of agricultural enterprises using digital technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 723. № 3. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032056>.
20. Assessing differences in levels of food trust between European countries / B. Murphy [et al.] // *Food Control*. 2021. Vol. 120. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107561>.

References

1. Bolotova YuV. Agricultural supply management and market power: evidence from the U.S. dairy and potato industries. *Agribusiness*. 2016;32(4):563–568. <https://doi.org/10.1002/agr.21485>.
2. Zakshevskii VG, Bogomolova IP, Vasilenko IN. Managing the development of an industry enterprise based on the activation of the risk management mechanism. *Ehkonomika, trud, upravlenie v sel'skom khozyaystve* [Economy, labor, and management in agriculture]. 2020;58(1):3–9. (In Russ.). <https://doi.org/10.33938/201-3>.
3. Kostareva L. “Vitomeh”: novinki dlya raznykh otrasley zhivotnovodstva [“Vitome”: novelties for different branches of animal husbandry]. *Kombikorma* [Compound Feed]. 2020;(2):20–21. (In Russ.).
4. Pechenaya LT, Bogomolov AV, Vasilenko IN, Shatokhina NM. Prospects for the development of feed production in Russia on the basis of improving resource support. *Storage and Processing of Farm Products*. 2019;(3):8–19. (In Russ.).
5. Bogomolova IP, Kotarev AV, Prostenko AN, Dobrunova AI, Chugay DYU. Resource-saving waste-free production as an innovative method of improving enterprises’ business performance in the meat production. *International Transaction Journal of Engineering, Management, and Applied Sciences and Technologies*. 2019;10(12). <https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2019.163>.
6. Koppenberg M, Bozzola M, Dalhaus T, Hirsch S. Mapping potential implications of temporary COVID-19 export bans for the food supply in importing countries using precrisis trade flows. *Agribusiness*. 2021;37(1):25–43. <https://doi.org/10.1002/agr.21684>.
7. Vallejo-Cordoba B, Castro-López C, García HS, González-Córdova AF, Hernández-Mendoza A. Postbiotics and paraprobiotics: A review of current evidence and emerging trends. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2020;94:1–34. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2020.06.001>.
8. Innovatsii v kombikormovoy otrasli [Innovations in the feed industry] [Internet]. [cited 2021 Mar 22]. Available from: <https://ikonews.ru/industry/novyy-nedorogoj-istochnik>.
9. Obzor kormovoy otrasli po itogam 2019 [Feed Industry Review-2019] [Internet]. [cited 2021 Mar 23]. Available from: <https://www.dairynews.ru/news/rynok-kormov-itogi-2019-obzor-kormovoy-otrasli-po-.html>.
10. Ehkspress-obzor rossiyskogo rynka kombikormov [Express review of the Russian market of compound feed] [Internet]. [cited 2021 Mar 25]. Available from: <https://3dpro.info/site/reviews/russian-compound-feed-market-2020>.
11. Federal State Statistics Service [Internet]. [cited 2021 Mar 24]. Available from: <https://www.gks.ru>.
12. Kotarev AV, Vasilenko IN, Kotareva AO, Dorofeev AF, Lebed VN. Modernization of the raw material base for the Russian meat production subcomplex in the conditions of improving the production innovativeness. *Revista San Gregorio*. 2019;(34):288–298.

13. Kühne B, Gellynck X, Weaver RD. Enhancing innovation capacity through vertical, horizontal, and third-party networks for traditional foods. *Agribusiness*. 2015;31(3):294–313. <https://doi.org/10.1002/agr.21408>.
14. Savintsev DI. Choosing a strategy of feed milling in the region: approaches and principles. *Society: Politics, Economics, Law*. 2018;(5):14–18. (In Russ.).
15. Syrovatka VI, Obukhov AD. Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva kombikormov v khozyaystvakh [Innovative technologies for animal feed]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Livestock Mechanization]. 2017;1(1):74–77. (In Russ.).
16. Kotarev A. Analytical study of agribusiness as a tool for competitive development of the region in the context of globalization and integration risk. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;274(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/274/1/012035>.
17. Krokhina VA, Kalashnikov AP, Fisinin VI, Smekalov NA, Khadanovich IV, Antonov AY, et al. Kombikorma, kormovye dobavki i ZTSM dlya zhivotnykh: sostav i primeneniye [Compound feed, feed additives, and milk replacer for animals: composition and application]. Moscow: Agropromizdat; 1990. 304 p. (In Russ.).
18. Bruschi V, Shershneva K, Dolgoplova I, Canavari M, Teuber R. Consumer perception of organic food in emerging markets: Evidence from Saint Petersburg, Russia. *Agribusiness*. 2015;31(3):414–432. <https://doi.org/10.1002/agr.21414>.
19. Mishurov NP, Voytyuk VA, Sypok SI. Management of export activities of agricultural enterprises using digital technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032056>.
20. Murphy B, Benson T, Lavelle F, Elliott C, Dean M. Assessing differences in levels of food trust between European countries. *Food Control*. 2021;120. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107561>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-753-758>
Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Supercritical Extraction Technology of Obtaining Polyunsaturated Acids from Starfish (*Lysastrosoma anthosticta* Fisher, 1922)



Alexander M. Zakharenko^{1,2,*}, Konstantin Yu. Kirichenko¹,
Igor A. Vakhniuk¹, Kirill S. Golokhvast¹

¹ Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Science, Krasnoobsk, Russia

² Far Eastern Federal University^{ROR}, Vladivostok, Russia

Received: October 01, 2021

Accepted in revised form: October 25, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: zakharenko@sfscs.ru

© A.M. Zakharenko, K.Yu. Kirichenko, I.A. Vakhniuk, K.S. Golokhvast, 2021

Abstract.

Introduction. Starfish (*Asteroidea*) are marine echinoderms with more than 160 species. Starfish are a valuable source of protein and fats. The present research featured the chemical composition of starfish, which can be used as a commercial source of lipids.

Study objects and methods. The study defined the optimal parameters for extracting the lipid fraction of *Lysastrosoma anthosticta* with supercritical carbon dioxide, as well as the qualitative composition of the obtained extracts.

Results and discussion. The yield of fatty acids obtained with supercritical carbon dioxide co-solvent was 1.8 times higher than that obtained with standard extraction according to the Folch method. The content of impurities was lower than in the samples with chloroform-methanol system. The polyunsaturated fatty acids isolated from *L. anthosticta* mainly belonged to ω -3 (18.0%), ω -6 (11.7%), ω -7 (21.2%), ω -9 (10.1%), and ω -11 (6.5%). The rest was saturated fatty acids, mainly palmitic (14%) and myristic (6%). The qualitative composition of the lipid fraction did not depend significantly from the isolation method. However, the supercritical extraction increased the product yield, extraction rate, and the quality of the extraction residue. Supercritical carbon dioxide left a dry residue, which had no typical smell and was brittle enough for grinding. Such residue can presumably be used to produce protein concentrate.

Conclusion. Supercritical extraction with chloroform can be recommended to isolate fatty acids from marine organisms at 60°C and 400 bar.

Keywords. Starfish, echinodermata, unsaturated fatty acids, lipids, sea

Funding. This research was supported by the Grant from the President of the Russian Federation (SP-3156.2019.4).

For citation: Supercritical Extraction Technology of Obtaining Polyunsaturated Acids from Starfish (*Lysastrosoma anthosticta* Fisher, 1922). Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):753–758. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-753-758>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-753-758>

Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Применение технологии сверхкритической экстракции для получения полиненасыщенных кислот из морской звезды (*Lysastrosoma anthosticta* Fisher, 1922)

А. М. Захаренко^{1,2,*}, К. Ю. Кириченко¹,
И. А. Вахнюк¹, К. С. Голохваст¹

¹ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Краснообск, Россия

² Дальневосточный федеральный университет^{ROR}, Владивосток, Россия

Поступила в редакцию: 01.10.2021

Принята после рецензирования: 25.10.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: zakharenko@sfscs.ru

© А. М. Захаренко, К. Ю. Кириченко, И. А. Вахнюк, К. С. Голохваст, 2021

Аннотация.

Введение. Морские звезды (*Asteroidea*) насчитывают более 160 видов, что делает их ценным сырьем для производства белков и жиров. Настоящее исследование позволило определить химический состав морских звезд и доказало целесообразность использования этого ресурса в качестве коммерческого источника жиров.

Объекты и методы исследования. В ходе исследования были определены оптимальные параметры экстракции липидной фракции *Lysastrosoma anthosticta* сверхкритическим диоксидом углерода, а также описан качественный состав полученных экстрактов.

Результаты и их обсуждение. Выход жирных кислот, полученных со сверхкритическим соразтворителем диоксида углерода, был в 1,8 раза выше, чем при стандартной экстракции по методу Фолча. Содержание примесей оказалось ниже, чем в образцах, где использовалась система хлороформ-метанол. Полиненасыщенные жирные кислоты, выделенные из *L. anthosticta*, принадлежали к ω -3 (18,0 %), ω -6 (11,7 %), ω -7 (21,2 %), ω -9 (10,1 %) и ω -11 (6,5 %). Остальное составляли насыщенные жирные кислоты: пальмитиновая (до 14 %) и миристиновая (до 6 %). Качественный состав липидной фракции не отличался от метода выделения. Однако сверхкритическая экстракция увеличила выход продукта, скорость экстракции и качество экстракционного остатка. Сверхкритический диоксид углерода оставил твердый осадок, который не имел характерного запаха и был достаточно хрупким для дальнейшего измельчения. В будущем такой остаток можно использовать для получения белкового концентрата.

Выводы. Сверхкритическая экстракция хлороформом может быть рекомендована для выделения жирных кислот из морских организмов при 60°C и 400 бар.

Ключевые слова. Морская звезда, иглокожие, ненасыщенные жирные кислоты, липиды, море

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (SP-3156.2019.4).

Для цитирования: Применение технологии сверхкритической экстракции для получения полиненасыщенных кислот из морской звезды *Lysastrosoma anthosticta* Fisher, 1922 / А. М. Захаренко [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 753–758. (На англ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-753-758>.

Introduction

The population of the earth is growing every year, which makes technologies for food obtaining and processing very important for humanity. Efficient processing technologies produce more useful products while doing less harm to the environment. The oceans are the least explored part of the earth. Every year, dozens of new compounds are isolated from marine aquatic organisms around the world. Many of them possess various beneficial biological properties that can be used, for instance, in pharmacology. Every year, new secondary metabolites of great practical and fundamental interest are extracted from echinoderms.

Starfish (*Asteroidea*) are widespread marine echinoderms of more than 160 species. Starfish are predators that damage shellfish plantations and coral reefs. In the XX–XXI centuries, world fisheries have been busy looking for new sources of nutrients, especially for marine carriers of biologically active substances that can be used to obtain highly effective medicines [1]. The present research featured *Lysastrosoma anthosticta*; the research objective was to select a promising method of supercritical extraction.

Supercritical fluid extraction and supercritical fluid chromatography have been used since the late 1970s in food analysis for determining lipids and toxicants. Supercritical fluid extraction is an effective means of natural product extraction. The supercritical extraction process has potential advantages over conventional

extraction processes, such as shorter extraction time, reduced organic solvent volume, and more selective extraction [2].

Study objects and methods

Samples of *Lysastrosoma anthosticta* Fisher, 1922 were harvested in the Peter the Great Bay (Russia, Sea of Japan) in 2020. Starfish with a total weight of 42 000 g were gutted, cut with scissors into small pieces (about 1 cm long), and stored in a plastic bag at –70°C. Frozen samples were lyophilized and crushed. The dry weight was 3630 g. After that, 30 g of aliquots was used for extraction. All experiments were done in triplicates. Extraction with supercritical CO₂ was performed using THAR SFC 500 (USA). Figure 1 shows the technological scheme of the supercritical extraction unit. Extraction was carried out using supercritical CO₂: pressure – 200, 400, and 600 bar per square inch; t – 30, 40, 50, 60, and 70°C; flow rate – 20 g/min. At the second step, the experiment extraction was carried out using CO₂ and 5% solvent (chloroform): pressure – 200, 400, and 600 bar per square inch; t – 30, 40, 50, 60, and 70°C; flow rate – 20 g/min. The control extraction of 30 g of dried starfish was carried out using the Folch method with a mix of chloroform-methanol (2:1) at the rate of 20 parts of the extraction mixture per one part of the tissue at 30, 40, 50, 60, and 70°C [3].

The extracts were analyzed by high-performance liquid chromatography (HPLC) with tandem mass spectrometry

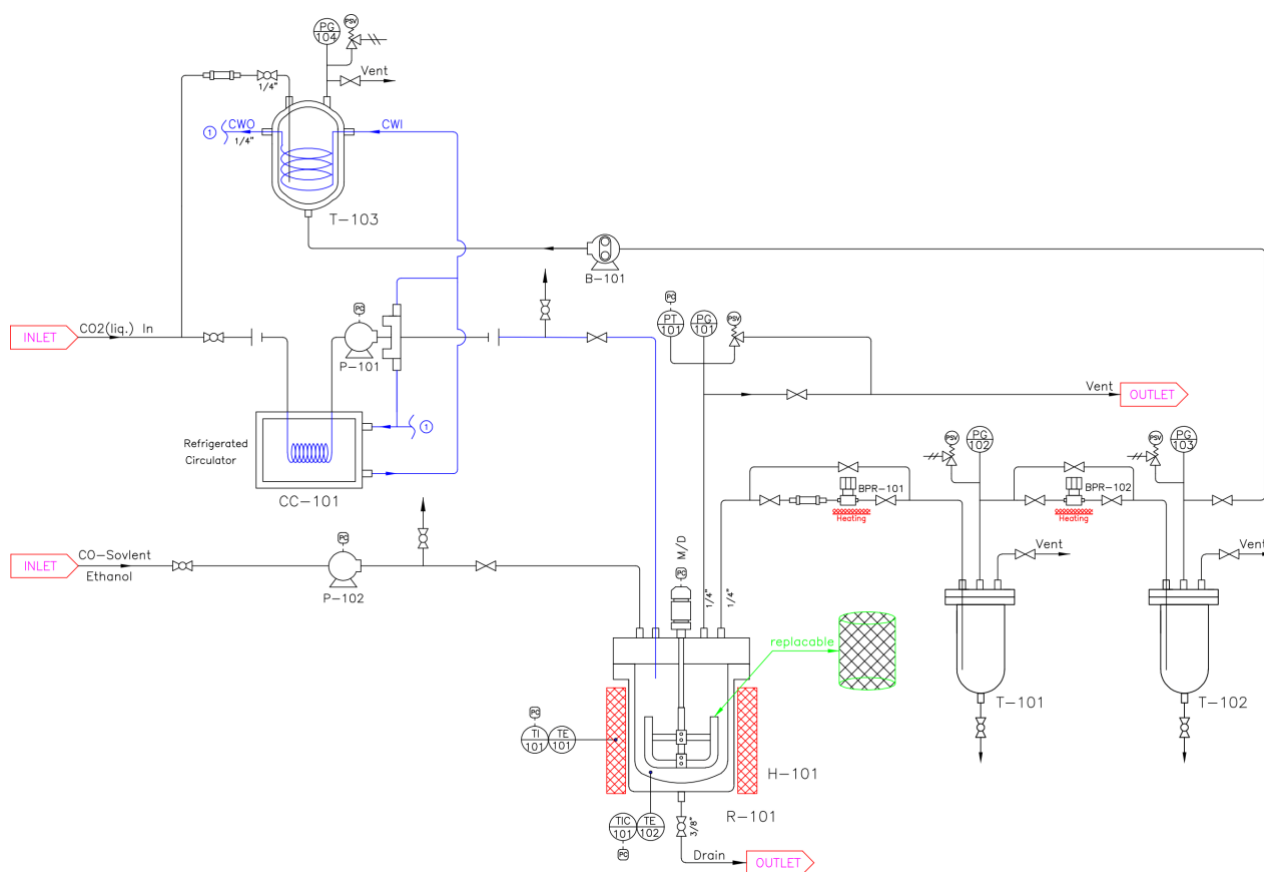


Figure 1. Technological scheme of the supercritical extraction unit



Figure 2. HPLC and ion trap joint system with tandem mass spectrometry

(LC-MS/MS). Reverse-phase HPLC was performed using a Shimadzu LC-20 liquid chromatograph (Shimadzu, Japan) equipped with a CTO-20A thermostat (Shimadzu, Japan) and a UV-VIS SPD-20A detector (Shimadzu,

Japan). ZORBAX Eclipse XDB C₁₈ (150×4.6 mm, particle size: 5 microns) was used as an analytical column at a temperature of 30°C and a total flow rate of 0.22 mL/min. Gradient elution with two mobile phases

(A – deionized water; B – acetonitrile with formic acid 0.1% v/v) was programed as follows: 0 min 0% V, 25 min 100% V, 60 min 100% V. The chromatograph and the mass spectrometric detector were linked by the Compass software, which made it possible to integrate the entire system into a single complex (Fig. 2).

The mass spectra of electrospray ionization mass spectrometry (ESI-MS) and electrospray ionization tandem mass spectrometry (ESI-MSN) were performed using an Amazon SL ion trap (Bruker, Germany) equipped with an electrospray ionization source. The ESI MS ionization parameters were optimized as follows: capillary voltage of 4500 V, nitrogen spraying at 29 psi, dry gas consumption of 10 l/min at 160°C. Mass spectra were recorded in the mass range m/z 50–2000 in the mode of negative and positive ions. The mass spectra of the ions were recorded in the auto MS/MS mode.

Results and discussion

An analysis of yields of lipids fraction from *Lysastrosoma anthosticta* under various conditions showed that the extraction with supercritical carbon dioxide with no co-solvent was less effective than the standard extraction according to the Folch method (Fig. 3). However, when extra 5% chloroform was added to the extraction system as a co-solvent, it significantly increased the yields of the total fatty acid fraction. The choice of the solvent and the extraction range parameters was based on the results of previous works where starfish material was treated with a plant matrix [4, 5]. Despite the fact that the main target components are soluble in

liquid CO₂ only above 200 bar, it is possible to separate significant amounts of the lipid fraction [6, 7]. The lipid fraction obtained by supercritical extraction with chloroform was 1.8 times higher than in the standard Folch method. The extraction was found to be quite effective only when a co-solvent was used. The optimal parameters for extraction with a co-solvent included a temperature of 60°C and a pressure of 400 bar. The data obtained correlated with the most frequently selected parameters. Most often, when using this technology, the authors chose a pressure of 300–350 bar as the optimal one [8–11]. With these parameters, a good yield of lipids can be obtained as quickly as possible; a further increase in the temperature and extraction pressure did not lead to a significant increase in the yield.

Obtaining chemical profiles is an extremely important result for any biological analysis system. In this work, we used the HPLC-ESI-MS/MS method with additional ionization and analysis of fragmented ions. High accuracy mass spectrometric data were recorded on an ion trap amaZon SL BRUKER DALTONIKS equipped with an ESI source in the mode of negative and positive ions. The experiment used a four-stage ion separation mode (MS/MS mode). A qualitative analysis showed that the ratio of polyunsaturated to saturated fatty acids did not depend on the extraction method (Table 1). An analysis of polyunsaturated fatty acids isolated from *L. anthosticta* showed that they mainly belonged to ω -3 (18.0%), ω -6 (11.7%), ω -7 (21.2%), ω -9 (10.1%), and ω -11 (6.5%). The rest was saturated fatty acids, mainly palmitic (up to 14%) and myristic (up to 6%).

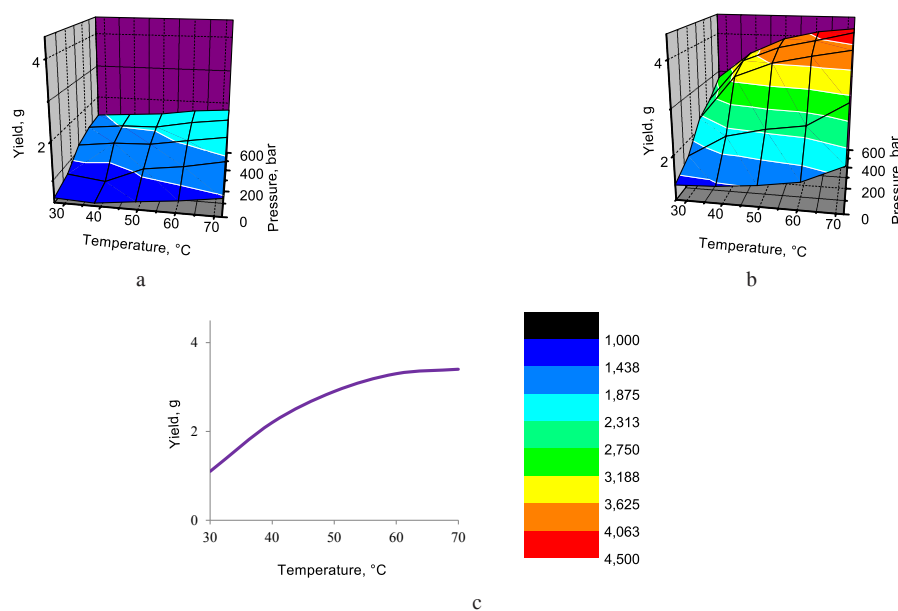


Figure 3. Effect of extraction conditions on the yield of the fatty acid: a – extraction with supercritical CO₂; b – extraction with supercritical CO₂ with a solvent (chloroform); c – extraction according to the Folch method at various temperatures

Table 1. Fatty acids analysis of extracts

Fatty acids	Yield, %		
	Control	Supercritical fluid extraction with CO ₂	Supercritical fluid extraction with CO ₂ and co-solvent
12:0	0.2	0.1	0.2
14:0	6.0	5.9	6.1
15:0	0.2	0.2	0.2
16:0	14.5	14.2	14
17:0	0.7	0.8	0.8
18:0	0.3	0.3	0.3
19:0	0.6	0.7	0.6
20:0	0.1	0.1	0.2
22:0	1.0	0.9	0.9
ω-3	17.8	18.0	18.0
ω-4	2.2	2.2	2.1
ω-5	0.3	0.2	0.3
ω-6	11.8	11.6	11.7
ω-7	21.0	20.9	21.2
ω-9	10.2	10.4	10.1
ω-11	6.1	6.3	6.5
ω-13	4.8	4.7	4.5
Other	2.2	2.5	2.3

The predominance of polyunsaturated acids is typical of starfish [12, 13].

A review of scientific publications showed that starfish can be considered as a valuable source of feed additives for agricultural animals and birds. For instance, Danish compound feed producers are considering the possibility of industrial use of starfish to produce additives for compound feeds. According to recent studies, such compound feed can reduce the excretion of nitrogen in pigs. Scientists from the Center for Aquatic Animals in Denmark proved that starfish can be an effective alternative to traditional sources of feed protein, e.g. soybeans. Starfish meal could replace the most commonly used protein sources and increase the weight gain in piglets. In fact, starfish-based animal

feed may be more economically rational than traditional protein sources. In addition, starfish are being rigorously tested as a possible protein source for bird nutrition. If the results are confirmed, starfish will become a rich source of protein, which will create high demand from egg producers, who are constantly searching for new sources of protein [14].

Conclusion

Starfish are a valuable raw material for protein and lipid production. The chemical composition of starfish makes it possible to use it in food and feed industry. The content of proteins was 9.5–14.0%, lipids – 0.5–3.5%, minerals – 1.5–32.0%. In comparison with the integumentary tissue, the internal organs of starfish have a higher content of potassium and iron [15, 16].

The yields of fatty acids obtained under conditions of supercritical carbon dioxide co-solvent were 1.8 times higher than those obtained with the standard Folch method, while the content of impurities was lower than when the extraction was performed using a chloroform-methanol system. The analysis of polyunsaturated fatty acids isolated from *Lysastrosoma anthosticta* showed that they mainly belonged to ω-3 (18.0%), ω-6 (11.7%), ω-7 (21.2%), ω-9 (10.1%), and ω-11 (6.5%). The rest was saturated fatty acids: palmitic (14%) and myristic (6%). Thus, isolating fatty acids from marine organisms using supercritical extraction with chloroform can be recommended as an effective commercial method.

In addition, supercritical carbon dioxide with a solvent left a dry residue, brittle enough for further grinding and without typical smell. Such a residue can presumably be used to produce protein concentrate.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

References

1. Yavnov SV. Atlas morskikh zvezd dal'nevostochnykh morey Rossii [Atlas of starfish of the Far Eastern seas of Russia]. Vladivostok: Russian Island; 2010. 240 p. (In Russ.).
2. Taylor SL, King JW, Montanari L, Fantozzi P, Blanco MA. Enrichment and fractionation of phospholipid concentrates by supercritical fluid extraction and chromatography. Italian Journal of Food Science. 2000;12(1):65–76.
3. Pan M, Qin C, Han X. Quantitative analysis of polyphosphoinositide, bis(monoacylglycerol)phosphate, and phosphatidylglycerol species by shotgun lipidomics after methylation. Methods in Molecular Biology. 2021;2306:77–91. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1410-5_6.
4. Zakharenko A, Romanchenko D, Thinh PD, Pikula K, Thuy Hang CT, Yuan W, et al. Features and advantages of supercritical CO₂ extraction of sea cucumber *Cucumaria frondosa japonica* Semper, 1868. Molecules. 2020;25(18). <https://doi.org/10.3390/molecules25184088>.

5. Razgonova MP, Zakharenko AM, Ercisli S, Grudev V, Golokhvast K. Comparative analysis of far east sikhotsky rhododendron (*Rh. sichotense*) and East Siberian Rhododendron (*Rh. adamsii*) using supercritical CO₂-extraction and HPLC-ESI-MS/MS spectrometry. *Molecules*. 2020;25(17). <https://doi.org/10.3390/molecules25173774>.
6. Kas'yanov GI, Nematullaev I, Shaftan EhA, Shaposhnikov VG. Rastvorimost' natural'nykh veshchestv v zhidkom dioksida ugleroda [Solubility of natural substances in liquid carbon dioxide]. *News of Institutes of Higher Education. Food Technology*. 1997;237–238(2–3):54–57. (In Russ.).
7. Buranachokpaisan K, Muangrat R, Chalermchat Y. Supercritical CO₂ extraction of residual oil from pressed sesame seed cake: Optimization and its physicochemical properties. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021;45(9). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15722>.
8. Zhou J, Gullón B, Wang M, Gullón P, Lorenzo JM, Barba FJ. The application of supercritical fluids technology to recover healthy valuable compounds from marine and agricultural food processing by-products: A review. *Processes*. 2021;9(2). <https://doi.org/10.3390/pr9020357>.
9. Gong T, Liu S, Wang H, Zhang M. Supercritical CO₂ fluid extraction, physicochemical properties, antioxidant activities and hypoglycemic activity of polysaccharides derived from fallen *Ginkgo* leaves. *Food Bioscience*. 2021;42. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101153>.
10. Guzmán-Albores JM, Bojórquez-Velázquez E, De León-Rodríguez A, Calva-Cruz ODJ, Barba de la Rosa AP, Ruiz-Valdiviezo VM. Comparison of *Moringa oleifera* oils extracted with supercritical fluids and hexane and characterization of seed storage proteins in defatted flour. *Food Bioscience*. 2021;40. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100830>.
11. Muangrat R, Jirattananarangsri W. Physicochemical properties and antioxidant activity of oil extracted from Assam tea seeds (*Camellia sinensis* var. *assamica*) by supercritical CO₂ extraction. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020;44(3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14364>.
12. Svetashev VI, Kharlamenko VI. Fatty acids of abyssal Echinodermata, the sea star *Eremicaster vicinus* and the sea urchin *Kamptosoma abyssale*: A new polyunsaturated fatty acid detected, 22:6(n-2). *Lipids*. 2020;55(3):291–296. <https://doi.org/10.1002/lipd.12227>.
13. Beppu F, Li H, Yoshinaga K, Nagai T, Yoshinda A, Kubo A, et al. Dietary starfish oil prevents hepatic steatosis and hyperlipidemia in C57BL/6N mice fed high-fat diet. *Journal of Oleo Science*. 2017;66(7):761–769. <https://doi.org/10.5650/jos.ess17038>.
14. Bogdanov VD, Maximova SN, Tungusov NG, Shadrina EV. Techno-chemical description of starfish as an object of industrial processing. *Izvestiya TINRO*. 2015;181:241–251. (In Russ.).
15. Stonik VA. Morskie polyarnye steroid [Marine polar steroids]. *Russian Chemical Reviews*. 2001;70(8):763–808. (In Russ.).
16. Malyarenko TV. Izuchenie struktury i biologicheskoy aktivnosti asterosaponinov i drugikh polyarnykh steroidnykh soedineniy morskikh zvezd [Study of the structure and biological activity of asterosaponins and other polar steroid compounds of starfish]. *Cand. sci. chem. diss.* Vladivostok: G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry; 2012. 134 p.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-759-767>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Технологический потенциал зерна яровой твердой пшеницы Саратовской селекции



М. К. Садыгова^{1,*}, С. Н. Гапонов², Г. И. Шутарева²,
Н. М. Цетва², Т. В. Кириллова¹, Д. К. Филина¹

¹ Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова^{ROR}, Саратов, Россия

² Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока^{ROR}, Саратов, Россия

Поступила в редакцию: 01.04.2021

Принята после рецензирования: 25.06.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: sadigova.madina@yandex.ru© М. К. Садыгова, С. Н. Гапонов, Г. И. Шутарева,
Н. М. Цетва, Т. В. Кириллова, Д. К. Филина, 2021

Аннотация.

Введение. Твердая пшеница является единственным сырьем для производства высококачественных макаронных изделий. В статье исследовано качество сортов твердой пшеницы Саратовской селекции, которые имеют стабильно реализуемый высокий технологический потенциал. Цель работы – исследование влияния качества зерна твердой пшеницы на качество макаронных изделий.

Объекты и методы исследования. Сорта твердой пшеницы: Саратовская золотистая, Валентина, Ник, Краснокутка 13, Луч 25, Памяти Васильчука, Безенчукская 182 и Аннушка. Макароны изделия изготавливали на оригинальном прессе ПСЛ-13, предназначенном для получения стандартных спагетти диаметром 1,8 мм в лабораторных условиях. Содержание белка, сырой клейковины и ее качество определяли стандартным методом. Варочные свойства изделий оценивали по методике, разработанной в лаборатории селекции и семеноводства яровой твердой пшеницы ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока».

Результаты и их обсуждение. Между показателями содержания сырой клейковины и белка существует прямая корреляционная зависимость. У сортов Саратовская золотистая и Луч 25 высокое содержание белка (15,3–15,6 %) и высокое содержание сырой клейковины (33,2–35,1 %). Качество сырой клейковины сортов Саратовской селекции характеризуется как хорошее, тогда как у других сортов – удовлетворительно слабое. Этому соответствует показатель микроSDS-седиментации (30–36 мм), относимый к слабой группе. Прочность спагетти повышается при содержании сырой клейковины 33–35 % и с увеличением содержания белка до 15,3–15,6 %. Наблюдается высокая зависимость прочности спагетти, коэффициента детерминации $R^2 = 0,98$ и усилия перекуса $R^2 = 0,92$ от содержания белка.

Выводы. Установлены критерии отбора сортов твердой пшеницы для производства спагетти с повышенной прочностью: оптимальное значение показателя стекловидности не менее 80 %, содержание сырой клейковины 33–35 %, содержание белка выше на 5–7 %. Для показателя усилия перекуса спагетти оптимальное качество сырой клейковины в пределах 72–80 ед. пр. ИДК-1 у таких сортов, как Саратовская золотистая, Валентина, Аннушка и Луч 25.

Ключевые слова. Пшеница, спагетти, развариваемость, прочность, усилие перекуса, белок, клейковина

Для цитирования: Технологический потенциал зерна яровой твердой пшеницы Саратовской селекции / М. К. Садыгова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 759–767. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-759-767>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Technological Potential of Saratov Spring Durum Wheat Grain

Madina K. Sadygova^{1,*}, Sergei N. Gaponov², Galina I. Shutareva²,
Natalya M. Tsetva², Tatyana V. Kirillova¹, Darya K. Filina¹

¹ N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University^{ROR}, Saratov, Russia

² Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region^{ROR}, Saratov, Russia

Received: April 01, 2021

Accepted in revised form: June 25, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



Abstract.

Introduction. Durum wheat is vital for high-quality pasta production. The present research tested the high technological potential of durum wheat varieties developed in the Saratov region. The research objective was to study the effect of the quality of durum wheat on the quality of pasta.

Study objects and methods. The study featured durum wheat of the following varieties: Saratovskaya Zolotistaya, Valentina, Nik, Krasnokutka 13, Luch 25, Pamyati Vasilchuka, Bezenchukskaya 182 and Annushka. The experiment involved an original PSL-13 press for standard spaghetti with a diameter of 1.8 mm. The content of protein, raw gluten, and their quality were determined by standard methods. The cooking properties of the pasta were evaluated according to the method developed in the South-Eastern Federal Agricultural Research Center.

Results and discussion. The indicators of raw gluten and protein are known to correlate. The samples of Saratovskaya Zolotistaya and Luch 25 had a high protein content of 15.3 and 15.6%, respectively, as well as a high content of raw gluten (33.2 and 35.1%, respectively). The raw gluten of Saratov varieties proved to be much better than in the control samples. The indicator of microSDs sedimentation was 30–36 mm. The strength of spaghetti followed the increase in crude gluten (33–35%) and protein (15.3–15.6%), which is typical of this type of pasta. The strength, coefficient of determination ($R^2 = 0.98$), and sharing force ($R^2 = 0.92$) depended on the protein content.

Conclusion. The study established the following optimal selection criteria for durum wheat varieties to be used in strong spaghetti production: virtuosity – 80%, raw gluten – 33–35%, protein content – 5–7% higher than normal, raw gluten – 72–80 units.

Keywords. Wheat, spaghetti, digestibility, strength, sharing force, protein, gluten

For citation: Sadygova MK, Gaponov SN, Shutareva GI, Tsetva NM, Kirillova TV, Filina DK. Technological Potential of Saratov Spring Durum Wheat Grain. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):759–767. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-759-767>.

Введение

Для производства качественных макаронных изделий подходит только один вид сырья – твердая пшеницы. Она характеризуется высокой прочностью, янтарно-желтоватым оттенком, низкой развариваемостью, малой потерей веществ при варке, приятным вкусом и биологической ценностью.

Мировое производство твердой пшеницы в 2019–2020 гг. составило 33,6 млн т, в т. ч. в Евросоюзе – 7,5, в Мексике – 1,7, в США – 1,5 и в Канаде – 5,0 млн т. Согласно прогнозам Canadian Wheat Board (CWB) объемы мировой торговли твердой пшеницей (дурум) в 2020–2021 гг. составят до 34,3 млн т. Важнейшим фактором, влияющим на ценовую конъюнктуру и торговлю на рынке, является увеличение объема мирового предложения пшеницы (дурум). К сожалению, в России площади под твердую пшеницу сокращаются. В 2020 г. посевы пшеницы (дурум) заняли 661 тыс. га плодородных полей, в том числе в Саратовской области – 45 тыс. га. Это третье место после Оренбурга (265 тыс. га) и Челябинска (160 тыс. га). По данным Национального Союза Селекционеров и Семеноводов (НССиС), общий валовый сбор зерна по стране, при среднем урожае 12,6 ц/га, составил всего 822 тыс. т. Производителям макаронной продукции, таким как «Макфа», «МакПром» и «Барилла», ежегодно требуется от 80 до 220 тыс. т зерна твердой пшеницы с хорошим качеством клейковины, содержанием белка и каротиноидных пигментов.

Из-за нехватки сырья и крупки из твердой пшеницы макаронные изделия стали производить из муки мягкой пшеницы. Себестоимость таких изделий гораздо ниже. Поэтому основное количество покупок приходится на долю дешевых и средних по цене, но низких по качеству изделий. Такое положение обостряет конкуренцию между российскими производителями, но не стимулирует производство надлежащего сырья – высококачественного зерна яровой твердой пшеницы.

Сравнивая два вида пшениц (твердую и мягкую), можно говорить о том, что макаронные изделия из второй значительно уступают в пищевой и биологической ценности для организма человека. Такой продукт способствует набору веса, в то время как большинство людей склонны к полноте. В связи с этим в ряде стран производство макаронных изделий из мягкой пшеницы запрещено полностью.

В Италии, несмотря на запрет изготовления макаронных изделий из фарины (крупки) мягкой пшеницы, ученые проводят исследования по изучению реологических свойств теста на основе композитной смеси из сортов твердой (семолины) и мягкой (фарины) пшеницы. Было выявлено, что для усиления прочности изделий из подобных смесей в рецептуру следует добавлять соль.

Исследования ученых направлены на повышение пищевой ценности макаронных изделий [1–6]. В Научно-исследовательском институте пищевых концентратной промышленности и специальной пищевой технологии – филиале ФГБУН «ФИЦ

питания, биотехнологии и безопасности пищи» разработаны макаронные изделия с использованием гречневой муки и овощных порошков в рецептуре макаронного теста из цельнозерновой полбяной муки. Это повысило содержание селена в макаронных изделиях на 40,7–186,2 % [7].

S. Savita и др. считают, что среди всех источников белка, используемых на различных уровнях, 15 % муки из бобов мунг, 10 % концентрата сывороточного белка и 6 % яичного белка дали макароны высокого качества [12]. Ученые из Алматинского технологического университета установили на основании полученных экспериментальных данных, что использование ионной озонированной воды при приготовлении теста способствует улучшению качества макаронных изделий на основе муки из зерновых и бобовых культур [8].

Создание и внедрение в производство новых и перспективных сортов озимой твердой пшеницы – один из факторов в решении стабильности производства зерна твердой пшеницы высокого качества. Об этом говорят ученые из Федерального аграрного научного центра «Донской» [9].

По данным Е. П. Мелешкиной, на улучшение качества можно надеется только в том случае, если будут соблюдаться все современные подходы к качеству. Эффективное и рациональное применение зерновых культур может обеспечиваться соединением всех этапов производства в единую аграрно-пищевую технологическую цепь, в которой конечный продукт определяет требования к сырью [10].

По мнению ученых ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока», экономический кризис и задачи по импортозамещению ставят целью ускорить создание адаптированных к условиям Поволжья скороспелых, засухоустойчивых, конкурентоспособных и коммерчески ценных сортов, которые бы могли давать стабильный урожай качественного зерна [11–13]. В связи с этим первостепенная задача производителей – уделить внимание производству яровой твердой пшеницы на базе существующих на сегодняшний день сортов.

Целью работы является исследование влияния качества зерна твердой пшеницы на качество макаронных изделий.

Большинство научных сотрудников и технологов, которые являются авторами множества трудов, связанных с изучением сортов твердой пшеницы, выделяют уникальные свойства макаронных изделий как продукта потребления:

- способность длительного хранения без резкого падения вкусовых и питательных свойств; при этом макаронные изделия имеют меньший показатель гигроскопичности, чем сухари, галеты и бисквиты; хорошо переносят транспортировку;
- малые временные затраты на приготовление: продолжительность варки колеблется от 3–5 до 15–20 мин;

- высокая питательность, значительно превышающая пшеничный хлеб, т. к. для производства макаронных изделий выбирается мука с высоким содержанием белковых веществ;

- большая усвояемость углеводов и белковых веществ, что важно для диетического и детского питания.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в лаборатории селекции и семеноводства яровой твердой пшеницы ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока». Объекты исследования – сорта яровой твердой пшеницы Саратовской селекции.

Для увеличения конкурентоспособности зерна твердой пшеницы на мировом рынке был разработан и предложен к выращиванию в 1993 г. сорт Саратовская золотистая. Он характеризуется высоким содержанием каротиноидных пигментов и белка, уникальным индексом желтизны (семолины) и отличным качеством клейковины (табл. 1). Готовые макаронные изделия выделяются товарным видом и кулинарными свойствами.

Сорт Валентина, допущенный к использованию в производстве в 1998 г., сочетает высокую продуктивность, массу 1000 зерен с хорошим показателем натуры зерна. Содержание каротиноидов в зерне у него выше, чем у сорта Краснокутка 13 (стандарт), но ниже, чем у Саратовской золотистой. Высокая масса 1000 зерен и хорошая натура зерна обеспечивают высокий выход семолины (крупки) при размоле зерна.

Сорт яровой твердой пшеницы Ник характеризуется способностью в засушливые годы сохранять высокий показатель урожайности в Саратовской области. По качеству массы 1000 зерен, клейковины и содержанию каротиноидов находится на уровне сорта Саратовская золотистая. Это подтверждается индексом желтизны (*B*): 20,3 % против 23 % у Саратовской золотистой.

Сорт Аннушка выделяется высокой натурой и отличными технологическими качествами зерна. Содержание сырой клейковины держится в диапазоне от 28,0 до 40,0 %, а спагетти характеризуются красивым желтым цветом и устойчивы к переварке.

Сорт Луч 25 характеризуется высокой продуктивностью и показателями качества зерна на уровне сорта Саратовская золотистая.

По содержанию каротиноидов сорт Памяти Васильчука превышает сорт Луч 25 на 2,0 мг/кг, а Краснокутку 13 на 2,4 мг/кг. Это подтверждается индексом желтизны *B* = 22,2 %. Преимуществом этого сорта является качество клейковины: очень прочная и упругая.

Сорт яровой твердой пшеницы Краснокутка 13 выведен на Краснокутской селекционно-опытной станции НИИСХ Юго-Востока. Характеризуется высокой засухоустойчивостью, скороспелостью и урожайностью.

Таблица 1. Показатели качества зерна твердой пшеницы за 2016–2020 гг.

Table 1. Indicators of durum wheat quality (2016–2020)

Сорта	Содержание белка, %	Содержание сырой клейковины, %	Качество сырой клейковины, ед. ИДК	МикроSDS-седиментация, мм	Индекс желтизны, B%	Содержание каротиноидов, мг/кг
Саратовская золотистая	15,3	35,1	79	40	23,0	6,8
Валентина	14,9	32,7	76	49	19,5	4,8
Ник	14,3	29,2	72	53	20,3	6,4
Аннушка	14,7	33,6	80	56	20,0	5,8
Луч 25	15,6	33,2	81	52	19,5	4,7
Памяти Васильчука	14,2	29,6	62	52	22,2	6,7
Краснокутка 13, st	13,8	27,2	85	36	17,7	4,3
Безенчукская 182	14,8	30,7	89	30	18,5	4,7
Среднее	14,7	31,4	78	48	20,1	5,5
НСР _{0,05}	0,4	2,7	2,9	1,4	3,2	0,5

При сотрудничестве с Самарским и Оренбургским НИИСХ выведен сорт Безенчукская 182. Он характеризуется высоким показателем урожайности, который обеспечивается за счет высокой массы 1000 зерен. Что касается качества клейковины и кулинарных достоинств макаронных изделий, а также показателей приборов ИДК и SDS-седиментации, то сорт находится на уровне стандартных сортов Харьковская 46 и Безенчукская 139. Однако лучше их по содержанию каротиноидных пигментов в среднем на 17 %.

Все сорта высевались на делянках площадью 10 м² в четырехкратной повторности. Нормативные показатели посева составили 4 млн всхожих зерен на 1 га. Делянки располагались рендомизированно по методике полевого опыта. Способ посева – сплошной. Модель сеялки СКС-6-10, предшественник которой был черный пар. Материал для изучения выращивался на специализированных полях селекционного севооборота по типичной агротехнике в условиях Саратовской области.

Зерно твердой пшеницы оценивали по следующим показателям качества:

- содержание сырой клейковины и ее качество по ГОСТ 27839-88 (способность оказывать сопротивление прикладываемой силе при сжатии образца на приборе ИДК-1);
- содержание белка по ГОСТ 10846;
- варочные свойства изделий оценивали по методике, разработанной в лаборатории селекции и семеноводства яровой твердой пшеницы ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока» [14].

По методике микроSDS-седиментации был проведен анализ прочности клейковины. Навеску размолотого зерна в 1 г помещали в пробирку, приливали 4 мл дистиллированной воды и взбалтывали 2–3 мин. Затем оставляли в спокойном состоянии еще на 7,5 мин. Добавляли 12 мл рабочего раствора

(1 часть 9,4 %-ого раствора молочной кислоты и 48 частей 2 %-ого раствора додецилсульфата натрия), закрывали пробкой и перемешивали, переворачивая пробирку минимум 10 раз. Через 15 мин измеряли высоту осадка, что и являлось микроSDS-седиментационным числом [15].

Индекс желтизны семолины (B%) определялся на приборе SPEKOL-11, снабженным отражающей приставкой [16]. Отражение образца семолины измерялось при длине волны $\lambda = 546$ нм и $\lambda = 436$ нм. Вычисление индекса желтизны (B%) проводилось по формуле 1.

$$B\% = \frac{7(Y-Z)}{\sqrt{Y}} \quad (1)$$

где Y – процент отражения семолины при $\lambda = 546$ нм; Z – процент отражения семолины при $\lambda = 436$ нм.

Ученые Всероссийского научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки – филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН для получения цифрового изображения исследуемой пробы определяли цветовые характеристики на экспериментальном образце сканирующего анализатора муки (САМ). Он был разработан во ВНИИЗ совместно с ООО «НИЦ ИСС». Компоненты (продукцию) оценивают по оптическим свойствам: показателю «желтизна», рассчитанному по специальному алгоритму с учетом трех базовых цветов (зеленого G, синего B и красного R), и по характеристике цвета в синем участке спектра в цветовом пространстве RGB [20].

На приборе ИПС-2 (измеритель прочности спагетти), разработанном Н. С. Васильчуком и Е. Н. Смирновым, оценивали следующие параметры: усилие необходимое для перекуса готовых спагетти (измерялось в граммах), а также прочность продукта. Интеграл деформации говорит о «работе», затраченной на перекус и измеряется в г·см. Оборудование

позволяло без участия человека плавно увеличивать усилие на «зубе» и максимально точно фиксировать момент перелома и/или перекуса с одновременным определением диаметра.

Пресс спагетный лабораторный ПСЛ-13 разработан и изготовлен Н. С. Васильчуком совместно с инженером-конструктором Е. Н. Смирновым и техником Ю. В. Головенко [10]. Спагетти диаметром до 1,8 мм изготавливали в лаборатории путем выпресовывания тестового полуфабриката массой 25–50 г через цилиндр и калибровочные отверстия матрицы в нем.

Определение влажности семолины производилось перед замесом тестового полуфабриката путем отбора навески в 50 г в стакан тестомесилки ТЛ1-75, а также добавлением дистиллированной воды температурой не выше 55 °С. Если клейковина слабая (например, у сортов Безенчукская 182, Краснокутка 13), то воду добавляли в количестве необходимом для достижения влажности 34 %, если клейковина сильная (Саратовская золотистая, Валентина, Луч 25) – 35 %. Замес производился в течение минуты. Затем собирались все крошки, а полуфабрикат проминали вручную зубчатыми валиками на подставке из дерева в течение 3 мин. Тесту придавали форму жгута диаметром 20–23 мм и помещали в разогретый до температуры 50 °С рабочий цилиндр прессы ПСЛ-13 с завернутой заглушкой вместо матрицы. В цилиндр вставляли прилагаемый поршень, после чего помещали под винтовой пресс. Прессом задавали максимально возможное давление на тесто, которое удерживали в течение 10 мин для лучшей его гомогенизации. Затем усилие снимали и вместо заглушки ставили матрицу, а цилиндр помещали строго под поршнем прессы ПСЛ-13.

По окончании цикла выдавливания спагетти вешали на 1 мин в комнате на бастуны. Сам процесс сушки происходит следующим образом: в заранее прогретый термостат до 40 °С помещают ванночку с водой, в которую опускают двойные листы фильтровальной бумаги вдоль боковых стенок. Это необходимо для обеспечения относительной влажности воздуха в камере до 80 %. Далее в камеру термостата на 24 ч при температуре 40 °С помещают подвешенные на «палочках» спагетти. После извлечения спагетти из камеры их охлаждают при комнатной температуре и заворачивают в темную бумагу для хранения.

Результаты и их обсуждение

Важными показателями для рынка макаронной продукции является содержание и структура белка (качество клейковины), а также цвет изделий (макаронны, крупа) [20]. Желтый пигмент накапливается путем повышения содержания каротиноидов в эндосперме, обладающих прови-

тами антиоксидантными свойствами. Т. С. Штейнберг и др. методом регрессионного анализа установили, что цвет макаронных изделий, изготовленных из муки сортов твердой пшеницы, зависит от содержания каротиноидов в муке, от крупности частиц муки и от содержания нездоспермных включений [20].

По содержанию каротиноидов выделяются сорта Саратовская золотистая, Ник и Памяти Васильчука. По сравнению с сортом Краснокутка 13 (стандарт) содержание каротиноидов в них выше на 55–58 % (табл. 1).

Как видно из данных таблицы 1, у сорта Саратовская золотистая и Луч 25 самое высокое содержание белка, которое превышает сорт Краснокутка 13. Между показателями содержания сырой клейковины и содержанием белка существует прямая корреляционная зависимость. Поэтому высокое содержание сырой клейковины у сортов Саратовская золотистая и Луч 25 закономерно. Однако такая зависимость отсутствует, если анализировать данные по сортам Валентина и Безенчукская 182.

Учеными ФГБНУ ВНИИК им. И. Г. Калинина установлена взаимосвязь SDS-седimentации с главными признаками качества зерна озимой твердой пшеницы. Это дает возможность применять этот метод оценки для выборки высококачественных генотипов [19].

Согласно классификации ВНИИЗК по показателю седimentации твердой пшеницы выделяют следующие группы: первая – очень сильная клейковины (40 и > мл), вторая – сильная (35–39 мл), третья – средняя (30–34 мл), четвертая – слабая (29 и < мл).

Качество сырой клейковины сортов Саратовской селекции характеризуется как хорошее, тогда как у сортов Безенчукская 182 и Краснокутка 13 удовлетворительно слабое. Этому соответствует и показатель микроSDS-седimentации, относимый к слабой группе. Изучение по методу SDS-седimentации качества зерна сортов твердой пшеницы различного происхождения показало, что существует варьирование (от 30 до 56 мл) и статистически значимая дифференциация. Распределение образцов по объему седimentационного осадка было следующим: 6 отличались очень сильной клейковиной (40 мл и более), 1 – средней (31–36 мл) и 1 – слабой (28–30 мл).

Макаронные изделия высокого качества содержат не менее 12 % белковых веществ и более 72 % углеводов, не более 13 % влаги, 0,5–0,7 % жиров (нежелательных в продуктах, предназначенных для длительного хранения, т. к. растительные жиры быстро прогоркают), малое количества минеральных солей и минимум клетчатки, не усваиваемой человеческим организмом. Усвояемость белковых веществ и углеводов изделий должна быть выше 90 %, содержание каротиноидных пигментов не менее 6,0 мг/кг при индексе желтизны не менее 22 % [21].

Таблица 2. Показатели качества спагетти

Table 2. Spaghetti quality indicators

Сорта и линии	Коэффициент развариваемости	Прочность спагетти, г·см	Сухие вещества, перешедшие в варочную воду, %	Усилие перекуса, г
Саратовская золотистая	3,0	5,1	4,8	48,9
Валентина	3,0	4,6	4,8	45,7
Ник	3,0	4,6	4,9	45,9
Аннушка	2,9	4,4	4,5	44,2
Луч 25	3,0	5,1	4,4	50,7
Памяти Васильчука	2,8	4,2	4,4	44,0
Красноутка 13, st	3,0	4,5	4,6	46,7
Безенчукская 182	3,0	4,8	4,5	48,4
Среднее	3,0	4,7	4,6	46,8
НСР _{0,05}	0,2	1,1	0,4	7,2

Ученые из Оренбургского ГУ считают, что на качество макаронных изделий влияет крупность помола муки. При крупитчатой структуре изделия получаются лучше по цвету и стекловиднее в изломе. Оптимальный размер частиц должен быть 200–350 мкм. Такая мука имеет наилучшее соотношение прочности и пластичности [20].

Спагетти получали по вышеуказанной методике. Показатели качества представлены в таблице 2.

Развариваемость макаронных изделий зависит от стекловидности зерна, содержания сырой клейковины и ее качества. Высокая корреляционная зависимость прочности спагетти от содержания сырой клейковины представлена на рисунке 1. Кулинарные показатели макаронных изделий оцениваются при термической обработке (варке). Прочность и упругость спагетти, количество сухих веществ, перешедших в варочную воду, развариваемость продукта за определенный промежуток времени, изменение в оттенке – особенности, которые зависят не только

от сортовых особенностей семолины, но и от ее качества [14].

Рядом исследователей было установлено, что высокое качество белка говорит об устойчивости продукта к перевариванию, что дает высокие кулинарные достоинства [19].

Как видно из данных рисунка 1, прочность спагетти повышается при содержании сырой клейковины 33–35 % и с увеличением содержания белка, что характерно для этого вида макаронных изделий. Для других видов макаронных изделий при увеличении содержания клейковины в муке выше 40 % требуется более длительное время варки, а готовые изделия имеют резинообразную текстуру. Однако коэффициент развариваемости практически одинаков для всех образцов исследуемых сортов твердой пшеницы (рис. 2).

На способность макаронных изделий вбирать в себя воду в процессе варки указывает коэффициент развариваемости, представляющий собой отношение

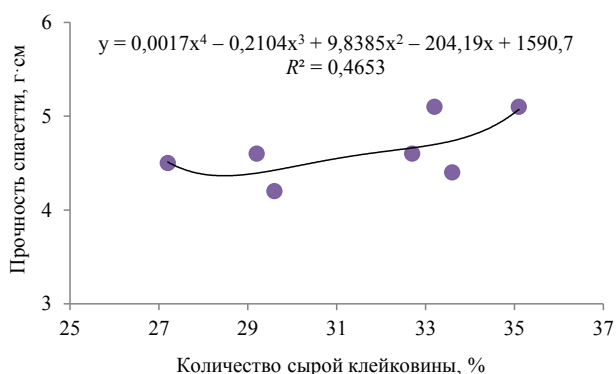


Рисунок 1. Влияние содержания сырой клейковины и белка на прочность спагетти

Figure 1. Effect of crude gluten and protein content on spaghetti strength

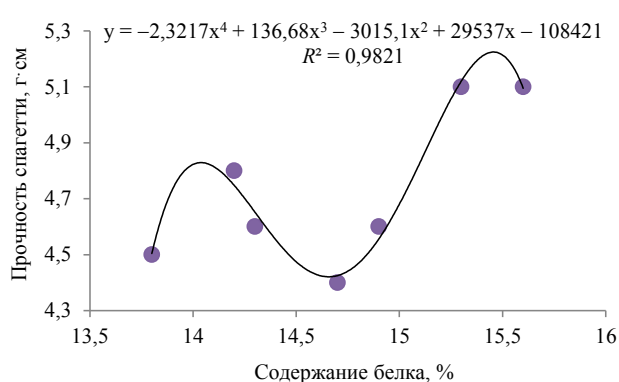


Рисунок 2. Влияние содержания клейковины на коэффициент развариваемости изделий

Figure 2. Effect of gluten content on cooking quality

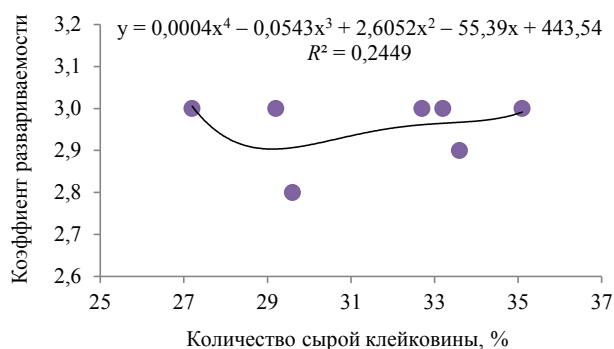


Рисунок 3. Влияние содержания сырой клейковины и белка на сухой остаток и усилие перекуса спагетти

Figure 3. Effect of crude gluten and protein on dry matter and sharing force

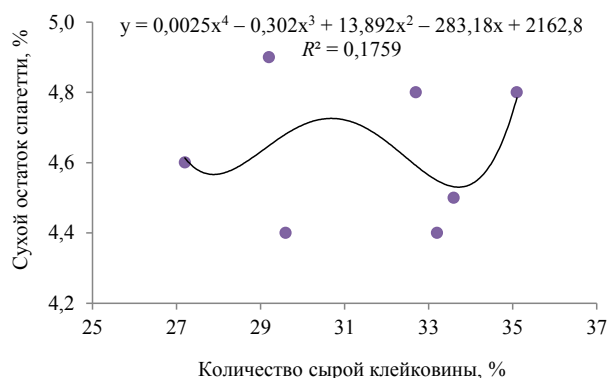


Рисунок 4. Влияние качества сырой клейковины на усилие перекуса спагетти

Figure 4. Effect of raw gluten quality on sharing force

веса спагетти до и после варки. Он должен быть в 2,8–3,5 раза больше веса сухих спагетти [11].

Как видно из данных рисунка 2, коэффициент развариваемости изделий отличается, что обусловлено сортавыми особенностями.

Упругость макаронных изделий и количество сухих веществ, перешедших в варочную воду, зависит от качества и количества сырой клейковины в муке (рис. 3) [11]. В данной работе сухой остаток в варочной воде гораздо меньше допустимых 6 %, принятых в международных оценках на кулинарное качество готовой продукции.

Как видно из данных рисунка 4, усилие перекуса спагетти увеличивается при показателе качества сырой клейковины 74–82 ед. пр. ИДК-1. По данным ученых Федерального аграрного научного центра Юго-Востока для получения макаронных изделий с повышенной прочностью нужно, чтобы зерно твердой пшеницы имело качество клейковины 80–85 ед. пр. ИДК-1 [13].

Кулинарные достоинства также зависят от усилия перекуса и пресности продукта. Прочность и развариваемость макаронных изделий оказывают влияние на вкусовые достоинства и способность организма человека усвоить спагетти. Излишнее набухание, склеивание и слипание в комья превращают продукт в неприятную на вкус вязкую массу, плохо проникаемую для пищеварительных соков. Хорошая прочность после 12-ти минутной варки должна быть 5–7 г·см [13].

Выводы

В результате проведенных исследований установлены критерии отбора сортов твердой пшеницы для производства спагетти. Сорта твердой пшеницы Саратовской селекции имеют стабильно реализуемый высокий технологический потенциал. Содержание каротиноидов в зерне твердой пшеницы сортов Саратовской селекции выше на 55–58 %, по

сравнению с сортом Краснокутка 13, а содержание белка выше на 5–7 %. Качество сырой клейковины сортов Саратовской селекции характеризуется как хорошее, тогда как у сортов Безенчукская 182 и Краснокутка 13 удовлетворительно слабое. Этому соответствует показатель микроSDS-седиментации, относимый к группе слабых.

Установлено, что для повышения прочности спагетти необходимо содержание сырой клейковины 32–35 %, тогда как для других видов макаронных изделий это неприемлемо. Для показателя усилия перекуса спагетти оптимальное качество сырой клейковины в пределах 74–82 ед. пр. ИДК-1, тогда как для других видов макаронных изделий оптимально качество клейковины в пределах 80–85 ед. пр. ИДК-1.

Критерии авторства

М. К. Садыгова руководила проектом. Селекционеры С. Н. Гапонов, Г. Н. Шутарева, Н. М. Цетва проводили селекционные работы на своих опытных полях. Т. В. Кириллова статистически обрабатывала материал. Д. К. Филина ассистировала всем участникам проекта.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что конфликт интересов отсутствует.

Contribution

M.K. Sadygova supervised the project. S.N. Gaponov, G.N. Shutareva, and N.M. Tsetva performed the selection work on experimental fields. T.V. Kirillova was responsible for statistical processing. D.K. Filina was the project assistant.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Thomas C., Maître I., Symoneaux R. Consumer-led eco-development of food products: a case study to propose a framework // *British Food Journal*. 2021. Vol. 123. № 7. P. 2430–2448. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2020-1050>.
2. A generalized phenological model for durum wheat: application to the Italian peninsula / A. Di Paola [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. Vol. 100. № 11. P. 4093–4100. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9864>.
3. Effect of drying methods on the physical properties of durum wheat pasta / M. Piwińska [et al.] // *CYTA – Journal of Food*. 2015. Vol. 14. № 4. P. 523–528. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1149226>.
4. High moisture extrusion of wheat gluten: Relationship between process parameters, protein polymerization, and final product characteristics / V. L. Pietsch [et al.] // *Journal of Food Engineering*. 2019. Vol. 259. P. 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.006>.
5. Zula A. T., Ayele D. A., Egigayhu W. A. Proximate composition, antinutritional content, microbial load, and sensory acceptability of noodles formulated from moringa (*Moringa oleifera*) leaf powder and wheat flour blend // *International Journal of Food Science*. 2021. Vol. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6689247>.
6. Смирнова С. О., Фазуллина О. Ф. Использование нетрадиционного сырья в производстве макаронных изделий повышенной пищевой ценности // *Техника и технология пищевых производств*. 2019. Т. 49. № 3. С. 454–469. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-454-469>.
7. Содержание селена в макаронных изделиях на основе полбяной и гречневой муки, а также овощных порошков / О. Ф. Фазуллина [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50. № 2. С. 242–251. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-242-251>.
8. Influence of different protein sources on cooking and sensory quality of pasta / S. Savita [et al.] // *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2013. Vol. 3. № 2. P. 1757–1763.
9. The improvement of quality of pasta on the basis of the vegetable raw materials / A. I. Iztaev [et al.] // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2015. Vol. 12. № 3. P. 2117–2124. <https://doi.org/10.13005/bbra/1881>.
10. Характеристика сортов озимой твердой пшеницы по качеству зерна и макаронным свойствам / Н. С. Кравченко [и др.] // *Зерновое хозяйство России*. 2020. Т. 69. № 3. С. 26–31. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-69-3-26-31>.
11. Мелешкина Е. П. Современные аспекты качества зерна пшеницы // *Аграрный вестник Юго-Востока*. 2009. Т. 3. № 3. С. 4–7.
12. Основные достижения и направления селекции яровой твердой пшеницы в ФГБНУ «НИИСХ Юго-Востока» / С. Н. Гапонов [и др.] // *Зерновое хозяйство России*. 2017. Т. 52. № 4. С. 17–21.
13. Оценка прочности клейковины в процессе селекции твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) / Н. С. Васильчук [и др.] // *Аграрный вестник Юго-Востока*. 2009. Т. 3. № 3. С. 34–40.
14. Использование метода SDS-седиментации в оценке исходного материала твердой озимой пшеницы на качество / Н. Е. Самофалова [и др.] // *Зерновое хозяйство России*. 2014. № 4. С. 25–31.
15. К разработке системы прослеживаемости при производстве макаронных изделий группы А по оптическим свойствам компонентов / Т. С. Штейнберг [и др.] // *Хлебопродукты*. 2020. № 1. С. 52–55. <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2020-29-1-52-55>.
16. Штейнберг Т. С., Семикина Л. И., Морозова О. В. Оперативный контроль качества муки из зерна твердой пшеницы по показателю «цвет» взамен показателя «зольность» // *Хлебопродукты*. 2014. № 12. С. 54–57.
17. Лещенко М. А., Самофалов А. П. Сравнительная характеристика групп сортов и линий озимой твердой пшеницы с разным уровнем показателя SDS-седиментации // *Молодой ученый*. 2015. Т. 89. № 9–2. С. 106–108.
18. Усовершенствование метода реологической оценки качества зерна в селекции яровой твердой пшеницы / С. Н. Гапонов [и др.] // *Зерновое хозяйство России*. 2020. Т. 67. № 1. С. 49–53. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-67-1-49-53>.
19. Тарасенко С. С., Владимирова Н. П. Реологические характеристики макаронной муки // *Хлебопродукты*. 2016. № 8. С. 47–49.
20. Sissons M. Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Food*. 2008. Vol. 2. № 2. P. 75–90.
21. Identification of early represented gluten proteins during durum wheat grain development / M. F. Mazzeo [et al.] // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. Vol. 65. № 15. P. 3242–3250. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00571>.

References

1. Thomas C, Maître I, Symoneaux R. Consumer-led eco-development of food products: a case study to propose a framework. *British Food Journal*. 2021;123(7):2430–2448. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2020-1050>.
2. Di Paola A, Ventura F, Vignudelli M, Bombelli A, Severini M. A generalized phenological model for durum wheat: application to the Italian peninsula. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020;100(11):4093–4100. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9864>.

3. Piwińska M, Wyrwisz J, Kurek MA, Wierzbicka A. Effect of drying methods on the physical properties of durum wheat pasta. CYTA – Journal of Food. 2015;14(4):523–528. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1149226>.
4. Pietsch VL, Werner R, Karbstein HP, Emin MA. High moisture extrusion of wheat gluten: Relationship between process parameters, protein polymerization, and final product characteristics. Journal of Food Engineering. 2019;259:3–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.006>.
5. Zula AT, Ayele DA, Egigayhu WA. Proximate composition, antinutritional content, microbial load, and sensory acceptability of noodles formulated from moringa (*Moringa oleifera*) leaf powder and wheat flour blend. International Journal of Food Science. 2021;2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6689247>.
6. Smirnov SO, Fazullina OF. Non-traditional raw materials in pasta production of high nutrition value. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(3):454–469. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-454-469>.
7. Fazullina OF, Ponomareva SM, Smirnov SO, Semenova LI. Selenium content in spelt, buckwheat, and vegetable pasta. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(2):242–251. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-242-251>.
8. Savita S, Arshwinder K, Gurkirat K, Vikas N. Influence of different protein sources on cooking and sensory quality of pasta. International Journal of Engineering Research and Applications. 2013;3(2):1757–1763.
9. Iztaev AI, Iskakova GK, Kulazhanov KS, Baimagambetova G, Iztaev BA. The improvement of quality of pasta on the basis of the vegetable raw materials. Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015;12(3):2117–2124. <https://doi.org/10.13005/bbra/1881>.
10. Kravchenko NS, Samofalova NE, Oldyreva IM, Makarova TS. The characteristics of the winter durum wheat varieties according to grain quality and pasta properties. Grain Economy of Russia. 2020;69(3):26–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-69-3-26-31>.
11. Meleshkina EP. Modern aspects of wheat grain quality. Agrarian Reporter of South-East. 2009;3(3):4–7. (In Russ.).
12. Gaponov SN, Popova VM, Shutareva GI, Eremenko LV, Tsetva NM, Parshikova TM. The main achievements and trends of spring durum wheat breeding in FSBSI “RIA of South-East”. Grain Economy of Russia. 2017;52(4):17–21. (In Russ.).
13. Vassiltchouk NS, Gaponov SN, Yeremenko LV, Parshikova TM, Popova VM, Tsetva NM, et al. Gluten strength estimation during durum wheat breeding (*Triticum durum* Desf.). Agrarian Reporter of South-East. 2009;3(3):34–40. (In Russ.).
14. Samofalova NE, Leshchenko MA, Samofalov AP, Kopus MM. Use of SDS-sedimentation in qualitative evaluation of initial material of durum winter wheat. Grain Economy of Russia. 2014;(4):25–31. (In Russ.).
15. Shteinberg TS, Shvedova OG, Morozova OV, Kolomietz SN, Koval AI. On the development of a traceability system in the production of group “A” pasta by optical properties of components. Bread products. 2020;(1):52–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2020-29-1-52-55>.
16. Shteinberg TS, Semikina LI, Morozova OV. Operational control of the quality of flour from durum wheat in terms of color instead of the indicator ash. Bread products. 2014;(12):54–57. (In Russ.).
17. Leshchenko MA, Samofalov AP. Comparative characteristics of groups of varieties and lines of winter durum wheat with different levels of indicator SDS-sedimentation. Young Scientist. 2015;89(9–2):106–108. (In Russ.).
18. Gaponov SN, Shutareva GI, Tsetva NM, Tsetva IS, Milovanov IV. Improvement of the method of rheological assessment of grain quality in the spring wheat breeding. Grain Economy of Russia. 2020;67(1):49–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-67-1-49-53>.
19. Tarasenko SS, Vladimirov NP. Rheological characteristics of pasta flour. Bread products. 2016;(8):47–49. (In Russ.).
20. Sissons M. Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. Food. 2008;2(2):75–90.
21. Mazzeo MF, Di Stasio L, D’Ambrosio C, Arena S, Scaloni A, Corneti S, et al. Identification of early represented gluten proteins during durum wheat grain development. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2017;65(15):3242–3250. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00571>.

Технологические особенности и теоретическое обоснование применения механически активированной воды в производстве мучных изделий



С. Д. Руднев¹, Т. В. Шевченко¹, Ю. В. Устинова^{1,*},
Р. В. Крюк¹, В. В. Иванов², А. М. Чистяков¹

¹ Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

² ООО «Кузбассхлеб», Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 11.05.2021

Принята после рецензирования: 20.09.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: yul48888048@yandex.ru

© С. Д. Руднев, Т. В. Шевченко, Ю. В. Устинова, Р. В. Крюк, В. В. Иванов, А. М. Чистяков, 2021

Аннотация.

Введение. В питании населения Российской Федерации мучные изделия занимают ведущее место. Для повышения их качества используют активацию воды. Целью работы является воздействие на воду подведенной механической энергии для изменения физико-химических свойств теста, приготовленного на активированной воде, с одновременной оценкой энергетической эффективности предлагаемого технологического процесса и определение качественных показателей хлеба.

Объекты и методы исследования. Мука пшеничная первого сорта; вода питьевая; дрожжи хлебопекарные прессованные вида *Saccharomyces cerevisiae*. Для оценки физико-химических свойств воды использовали стандартные методы исследования: определение показателя кислотности (рН), коэффициентов поверхностного натяжения и биологической активности. Физико-химические свойства полученного теста на активированной воде изучали реологическими методами: определение предельного напряжения сдвига и адгезионно-когезионной прочности (адгезия).

Результаты и их обсуждение. Определены технологические свойства активированной воды: увеличение кислотности за счет снижения величины рН до 6,05; поверхностное натяжение снижается на 10 % при общем времени перемешивания 10 мин, а через 5 мин – на 4 %; биологическая активность активированной воды увеличилась в 1,5 раза. Механически обработанная вода, используемая для производства хлеба, способствует общему энергосбережению при замесе теста и повышению его водосвязывающей способности. Влага на 30–40 % интенсивнее удаляется из теста, замешанного с водой, не подвергнутой механоактивации. Отмечено изменение качества клейковины, основанное на повышении напряжения сдвига, придающей полученному тесту повышенные формуемые свойства, необходимые для производства качественного хлеба. С применением механоактивированной воды удельный объем хлеба повысился с 2,05 до 2,38 см³/г.

Выводы. Доказана возможность изменять физико-химические и реологические свойства опытных партий теста, а также основные органолептические и качественные показатели хлеба: пористость и повышение упругости хлебного мякиша.

Ключевые слова. Мучные изделия, хлеб, механоактивация воды, поверхностное натяжение, биологическая активность воды, приготовление теста, энергозатраты, качество хлеба

Финансирование. Исследования были выполнены на базе ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (КемГУ)^{ROR}.

Для цитирования: Технологические особенности и теоретическое обоснование применения механически активированной воды в производстве мучных изделий / С. Д. Руднев [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 768–778. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-768-778>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Technology and Theory of Mechanically Activated Water in Bakery Industry

Sergey D. Rudnev¹, Tatyana V. Shevchenko¹, Yulia V. Ustinova^{1,*},
Roman V. Kryuk¹, Viktor V. Ivanov², Andrey M. Chistyakov¹

¹ Kemerovo State University , Kemerovo, Russia

² LLC Kuzbasskhrleb, Kemerovo, Russia

Received: May 11, 2021

Accepted in revised form: September 20, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: yul48888048@yandex.ru

© S.D. Rudnev, T.V. Shevchenko, Yu.V. Ustinova, R.V. Kryuk, V.V. Ivanov, A.M. Chistyakov, 2021

Abstract.

Introduction. Bakery products are an important part of traditional Russian menu. Activated water helps to improve the quality of flour products. The present research objective was (1) to activate water with mechanical energy to change the physico-chemical properties of the dough; (2) to evaluate the energy efficiency of the new technological process, and (3) to determine the quality indicators of bread.

Study objects and methods. The research featured high quality wheat flour, drinking water, and pressed baking yeast (*Saccharomyces cerevisiae*). Standard research methods were used to assess the physical and chemical properties of water, namely acidity index (pH), surface tension coefficient, and biological activity. The physico-chemical properties of the dough were studied by maximum shear stress and adhesion.

Results and discussion. The samples of activated water demonstrated the following technological properties. Its acidity due decreased as pH fell down to 6.05. With a total mixing time of 10 min, the surface tension decreased by about 10%; after 5 min, it decreased by 4%, while the biological activity of activated water increased by 1.5 times. Mechanically treated water used for bread production contributed to the overall energy saving during kneading and increased its water-binding ability. Moisture removal was by 30–40% more intensive than in the control dough sample. Also, the quality of gluten changed as a result of higher shear stress, which gave the experimental dough better forming properties necessary for the production of high-quality bread. The mechanically activated water increased the specific volume of bread from 2.05 to 2.38 cm³/g.

Conclusion. The activated water improved the physico-chemical and rheological properties of dough, as well as the main sensory indicators of bread, e.g. porosity and bread crumb elasticity.

Keywords. Flour products, bread, mechanical activation of water, surface tension, biological activity of water, dough preparation, energy consumption, quality of bread

Funding. The research was carried out on the premises of the Kemerovo State University (KemSU) .

For citation: Rudnev SD, Shevchenko TV, Ustinova YuV, Kryuk RV, Ivanov VV, Chistyakov AM. Technology and Theory of Mechanically Activated Water in Bakery Industry. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):768–778. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-768-778>.

Введение

Хлеб – это один из универсальных пищевых продуктов, содержащих комплекс жизненно необходимых веществ (углеводы, белки, жиры, витамины и др.) [1]. Он обеспечивает около 30 % необходимых для человека питательных веществ при ежегодной потребности хлеба для одного человека 120–125 кг/год. По количеству и качеству выпекаемого хлеба судят о степени развития и благосостоянии страны. Хлебобулочные изделия всегда присутствуют в рационе человека.

Основным направлением прогресса в хлебопекарной промышленности является повышение эффективности производства и качества выпекаемых хлебобулочных изделий. Производство хлеба – многостадийный технологический процесс. При его проведении используются такие традиционные сырьевые компоненты, как мука, вода, дрожжи, пищевая соль и некоторые второстепенные добавки, относящиеся к пищевым улучшителям. На сегодняшний день существует

множество разновидностей хлеба и различных технологий его приготовления. В последние годы возросла потребность в муке высших сортов и качественной воде. Одновременно с ростом объема производства необходимо обеспечить дальнейшее повышение качества сырья и готовой продукции. Эти задачи могут быть решены только на основе повышения эффективности производства путем совершенствования технологии, модернизации оборудования и внедрения научных разработок в производство. Технологический процесс производства хлебобулочных изделий относится к сложным процессам, где свойства сырья оценивают выходом и качеством готовой продукции [2, 3].

Мука – основной пищевой компонент хлеба, содержащий, в зависимости от сорта, природные высокомолекулярные соединения в различных соотношениях. Они относятся к различным классам органических соединений с отличающимися друг от друга функциональными группами: углеводы (крахмал) – более 80 %, растительные белки – 14–15 % и др.

Дрожжи – основа биохимических процессов при созревании теста. Это одноклеточные живые микроорганизмы, являющиеся натуральными разрыхлителями. Углекислый газ, выделяемый при активной работе биологической системы, придает пористость и воздушность готовой хлебной выпечке. Важно обеспечить при производстве такие условия, при которых дрожжи «съедают» муки меньше, а углекислого газа выделяют больше. Поэтому основной задачей является создание всех необходимых условий для активного выделения дрожжами углекислого газа.

Вода – необходимый компонент в хлебопечении, являющийся одновременно и растворителем, и реагентом в сложных физико-химических, коллоидных и биохимических процессах при хлебопечении. Это объясняется ее особыми физико-химическими характеристиками.

Растворение происходит за счет образования водородных мостиков с гидроксильными группами сахаров и спиртов, карбонильными группами альдегидов и кетонов. При приготовлении теста вода играет важную роль, т. к. от ее массовой доли, состояния, активности и химического состава зависит интенсивность физико-химических, биохимических, микробиологических и коллоидных процессов, влажность хлебопекарных полуфабрикатов и их консистенция, влажность готового хлеба и его пищевая ценность.

Активация воды как способ повышения качества хлебобулочных изделий стала использоваться недавно и применяется ограниченно. Существуют данные о целесообразности применения воды активированной термообработкой, дегазацией, ионизацией серебром, акустическими и оптическими воздействиями, а также другими способами [4]. Подвергнутая униполярному воздействию, активированная вода переходит в неравновесное состояние и в течение времени релаксации проявляет аномально высокую химическую активность. Это может оказать положительное влияние на качество хлебобулочных изделий.

Повышенную диэлектрическую проницаемость имеют молекулы воды. Линейный размер небольшой и составляет 0,276 нм. Дипольный момент составляет 1,84 Дб. Кроме того, вода – это особое многофункциональное вещество, являющееся неорганическим полимером сложной кластерной организации, образованной за счет сетки водородных связей. Между отдельными кластерами $(H_2O)_{15-16}$ с размером до 120 мкм при комнатной температуре находится некоторое количество молекулярной воды, которая является простейшим кластером (рис. 1).

При подведении к водной системе различных видов энергии (тепловая, волновая, световая и др.) возможно разрушение больших кластеров с образованием малых, более активных. Например, $(H_2O)_{3-5}$. Активированная вода с диспергированными кластерами при любом способе активации обладает

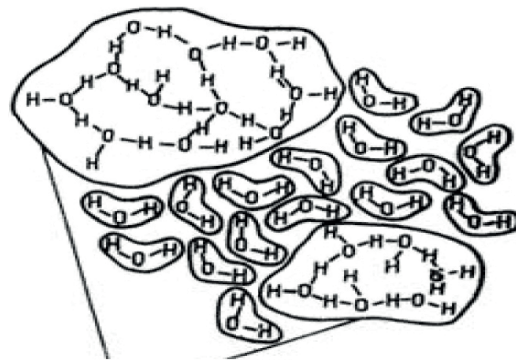


Рисунок 1. Структура воды

Figure 1. Water structure

высокой поверхностной активностью за счет сниженного поверхностного натяжения, повышенной растворяющей способности и увеличенной биологической активности (повышенная скорость прохождения через биологические клеточные мембраны, канцерогены и радионуклиды) [5]. Установлено, что продолжительность жизни клеток живых организмов в активированной воде увеличивается в 10–15 раз [6].

В настоящее время особое внимание уделяется водоподготовке для хлебопечения с целью ее предварительного активирования различными физико-химическими способами: электрохимическими, ультразвуком, радиацией, микроволнами и др. [7–11]. Наиболее доступным и простым технологическим приемом активирования воды является ее механическая или механохимическая обработка при перемешивании, т. е. механохимия является перспективным направлением интенсификации многих технологических процессов [12–15].

Цель настоящей работы: количественная оценка изменения физико-химических свойств воды под действием подведенной механической энергии и определение технологических параметров активации воды; количественная оценка изменения физико-химических свойств теста, приготовленного на активированной воде, с одновременной оценкой энергетической эффективности предлагаемого технологического процесса; определение качественных показателей хлеба, выпеченного при использовании активированной воды.

Объекты и методы исследования

В работе использовались следующие сырьевые компоненты: мука пшеничная первого сорта с показателями по ГОСТ 26574-2017; вода питьевая по СанПиН 2.1.4.107-01; дрожжи хлебопекарные-сахаромикеты.

Работа состояла из трех стадий: 1 – подготовка воды с помощью интенсивного механического

перемешивания и исследование изменений некоторых физико-химических свойств: показателя кислотности pH, коэффициента поверхностного натяжения, биологической активности (*A*); 2 – приготовление теста на активированной воде, определение физико-химических и технологических свойств полученного теста; 3 – выпечка хлеба из полученного теста и оценка его потребительских свойств.

Подготовка активированной воды. В качестве основного объекта исследований использовалась вода питьевая. При комнатной температуре ее перемешивали венчиковой мешалкой с угловой скоростью 180 об/мин. После механической обработки определены физико-химические свойства полученной активированной воды.

Оценка физико-химических свойств воды. pH воды определялся после различного времени перемешивания на стандартном лабораторном потенциометре со стеклянным и хлорсеребряным электродами (pH-метр АНИОН 4100). Температура контролировалась этим же прибором. Для определения поверхностного натяжения применялись стеклянные капилляры диаметром 0,25 мм.

Оценку биологической активности полученной активированной воды проводили с использованием тест-объектов (пекарские дрожжи вида *Saccharomyces cerevisia*), которые широко используются для производства хлеба. Методика оценки основана на способности дрожжей в процессе брожения в присутствии полисахаридов выделять углекислый газ и повышать скорость размножения дрожжей. Повышение биологической активности воды (*A*) определялось при сравнении объемов выделяющегося углекислого газа для неактивированной (V_0) и активированной воды (V_a) по формуле:

$$A = (V_a - V_0)/V_0 \quad (1)$$

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены результаты испытаний оценки физико-химических свойств воды.

Таблица 1. Зависимость pH воды от времени перемешивания

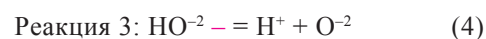
Table 1. Effect of pH of water on kneading time

t, мин	pH	t, мин	pH
0	7,00	6	6,03
1	6,50	7	6,02
2	6,25	8	6,01
3	6,15	9	6,00
4	6,10	10	6,00
5	6,05	11	6,00

Из результатов, представленных в таблице 1, следует, что значение величины pH монотонно снижается (нарастание кислотности) с увеличением времени перемешивания. Из-за повышенной растворимости кислорода воздуха в воде происходит изменение свойств механически обработанной воды. При температуре 25 °С и стандартных равновесных условиях растворимость кислорода в чистой воде составляет 8,3 мг/л. Возможно увеличение растворимости в несколько раз при принудительном контакте кислорода воздуха с водой (закон Генри) [16–20]. При этом образуется реакция 1 с одновременным образованием перекиси водорода. Константа равновесия составляет $K = 1,4 \times 10^{-12}$ [20].



В молекулах полученного пероксида водорода связь О–О непрочная, поэтому перекись водорода легко разрушается по двум ступеням [10]:



Распад перекиси водорода идет по первой стадии (реакция 2). Вторая стадия распада (реакция 3) реализуется слабо.

Из проведенных испытаний следует, что механически обработанная вода подкисляется и одновременно имеет повышенную концентрацию кислорода. Это может оказывать положительное воздействие на биохимические процессы при замесе теста.

Результаты эксперимента определения поверхностного натяжения (σ) представлены в таблице 2.

Из таблицы 2 следует, что поверхностное натяжение воды уменьшается при увеличении времени механической обработки экспоненциально. Установлено, что на первой стадии обработки (5 мин) при общем времени перемешивания 10 мин оно снижается примерно на 10 %, а через 5 мин – еще на 4 %. Обработанная вода приобретает некоторые

Таблица 2. Зависимость поверхностного натяжения воды от времени перемешивания

Table 2. Effect of kneading time on surface tension

t, мин	$\sigma \times 10^3$, Дж/м ²	t, мин	$\sigma \times 10^3$, Дж/м ²
0	72,0	6	62,0
1	71,5	7	61,5
2	70,8	8	61,3
3	65,2	9	61,2
4	64,0	10	61,0
5	63,0	11	61,0

свойства ПАВ, обладая высокой текучестью и повышенной растворяющей способностью.

При оценке биологической активности полученной активированной воды экспериментально установлено, что в образце с ее использованием объем выделенного углекислого газа повысился в 1,5 раза по сравнению с объемом газа в неактивированной воде. Это указывает на повышенную биологическую активность механически обработанной воды. Механизм увеличения ее активности можно объяснить повышенной концентрацией кислорода, а также изменением кластерной структуры.

Теоретический анализ. Взаимодействие воды с белками растительного происхождения изучалось в замесе теста хлебопекарного. Процесс структурообразования теста определяет качество полуфабриката и готового изделия (хлеба), влияет на последующие технологические процессы и работу всего технологического оборудования.

При замесе выделяют физико-механические процессы превращения отдельно существующих сыпучих и жидких компонентов в однородную смесь заданного соотношения; коллоидные процессы смачивания, диффундирования и растворения; возникновение губчато-сетчатой структурной основы – клейковинного каркаса теста.

На наш взгляд, важнейшим является начальный период замеса – образование однородной смеси. Получить однородную смесь порошка с водой, когда удельная поверхность контакта составляет 250–350 м²/кг, непростая задача. Можно попытаться представить, что 0,3–0,4 л воды растекаются на поверхности площадью 300 м². Нетрудно посчитать, какой толщины должна получиться пленка воды – менее 1–2 мкм. Следовательно, стоит задача диспергировать воду до размеров ее частиц в 1 мкм. Тогда мы получим однородную дисперсную структуру. Но сделать это надо до того, как начнется вторая стадия процесса. Иначе образуются конгломераты, препятствующие смесеприготовлению. Их разрушение – дополнительные затраты энергии и потеря качества. Кроме диспергирования воды, основная задача – обеспечить максимальное смачивание водой поверхности частиц, размеры которых составляют 45–50×10⁻⁶ м. Форма частиц – сложная, поверхность их неоднородная. Здесь на первый план выходит фактор снижения поверхностной энергии на границе контакта «вода – частица муки».

Обратимся к классической термодинамике. Процесс смачивания описывается равенством Юнга:

$$\sigma_T = \sigma_{TЖ} + \sigma_{Ж} \cdot \cos\varphi \quad (5)$$

где σ_T – равновесное поверхностное натяжение твердого тела, Н/м; $\sigma_{Ж}$ – равновесное поверхностное натяжение жидкости, Н/м; $\sigma_{TЖ}$ – межфазное поверхностное натяжение на границе твердое тело – жидкость, Н/м; φ – кажущийся краевой угол, град.;

Обратимая работа адгезии жидкости W_A к поверхности частиц сыпучего материала аналитически выражается уравнением Дюпре:

$$W_A = \sigma_T + \sigma_{Ж} - \sigma_{TЖ} \quad (6)$$

Сочетание (5) и (6) дает выражение:

$$W_A = \sigma_{Ж} (1 + \cos\varphi) \quad (7)$$

На основе выражения (5) удельная обратимая работа когезии W_K :

$$W_K = 2 \cdot \sigma_{Ж} \quad (8)$$

При условии самопроизвольного растекания жидкости по поверхности твердого тела:

$$\sigma_{Ж} (\cos\varphi - 1) > 0 \quad (9)$$

Разница W_A и W_K дает коэффициент растекания S :

$$[S = W_A - W_K] = \sigma_{Ж} (1 + \cos\varphi) \quad (10)$$

Из уравнения (6) следует, что поверхностная энергия и жидкости, и частицы для возникновения контакта между ними может быть высокой, но поверхностную энергию их взаимодействия необходимо снижать каким-либо способом. При этом

$$\sigma_T > \sigma_{Ж} \quad (11)$$

Отсюда следует технологическая задача: снизить поверхностную энергию воды при ее смешивании с сыпучим материалом.

Лабораторные испытания. Осуществлялись на исследовательском оборудовании кафедры машин и аппаратов технологических систем КемГУ. Для исследований применялись анализатор текстуры «Структурометр СТ-2» и анализатор влажности МХ-50 (Япония). Исследовался процесс замеса теста в соотношении, которое соответствует составу хлебопекарного изделия. Использовали лабораторное оборудование: миксер планетарный бытовой с процессной емкостью объемом 3 л, венчиковой мешалкой и дискретным числом ее оборотов (100, 180, 260, 320 об/мин). Мощность, потребляемая миксером при замесе, контролировалась ваттметром и фиксировалась видеосъемкой для дальнейшей обработки в среде Microsoft Excel. Измерялась мощность при замесе, изучалась релаксация и процесс влагоудаления при сушке, определялось предельное напряжение сдвига полученного теста.

Графики потребляемой при замесе мощности представлены на рисунке 2: тонкими линиями – экспериментальные кривые, основными линиями – линии тренда (полиномы 3 порядка). Анализ результатов показывает, что тесто с механически активированной водой легче замешивается на первом этапе и в начале второго, но затем

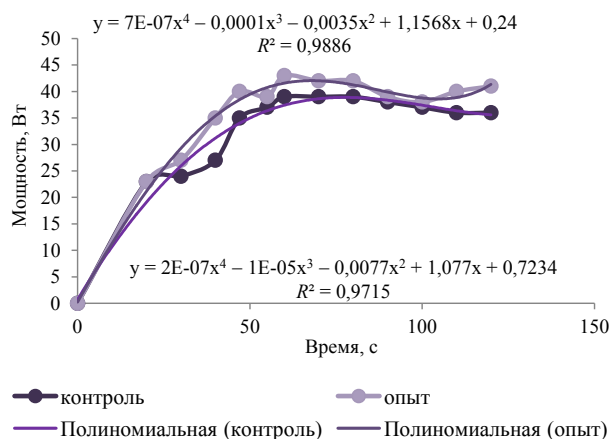


Рисунок 2. Графики потребляемой при замесе мощности

Figure 2. Energy consumption during kneading

энергопотребление значительно вырастает. Это свидетельствует об ускоренном формировании белковой каркасной структуры теста.

При том же составе структура теста стала более упругой (рис. 3). Его адгезия снизилась на 40 % (рис. 4). Адгезия влияет на сцепление поверхностей разнородных твердых или жидких тел [21]. Предельное напряжение сдвига теста экспериментального образца, измеренное сразу же после замеса, было выше на 30 % (рис. 5). Со временем напряжения, возникшие в процессе формирования структуры в тесте, релаксируют, но упругость по-прежнему превышает этот показатель для контрольного образца.

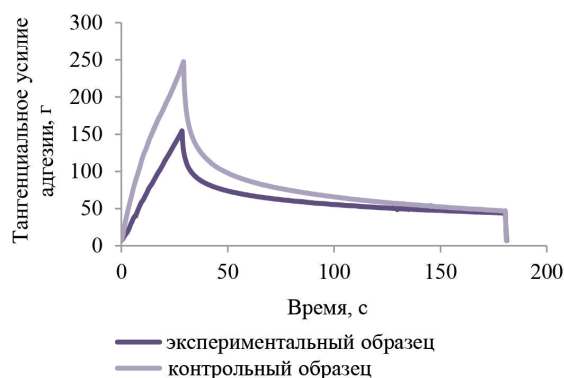


Рисунок 4. Зависимость тангенциальной адгезии для теста пшеничного

Figure 4. Dependence of tangential adhesion for wheat dough

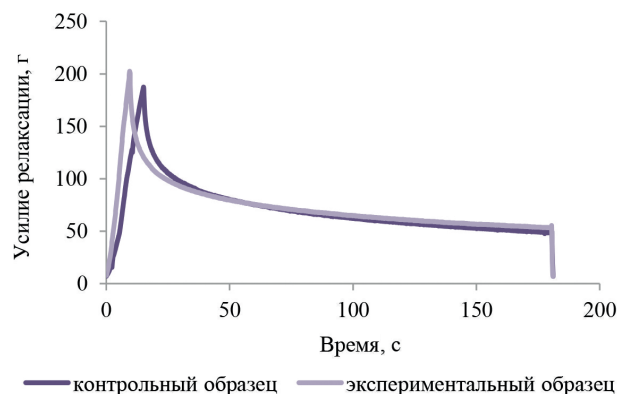


Рисунок 3. Зависимость усилия релаксации напряжений для теста пшеничного

Figure 3. Dependence of stress relaxation effort for wheat dough

Рисунок 6 иллюстрирует повышение водосвязывающей способности теста с предварительной механоактивацией воды. Влага из теста, замешанного с водой, не подвергнутой механоактивации, на 30–40 % интенсивнее покидает материал.

Производственные испытания. Замесы теста с механоактивацией воды проводились на хлебозаводе № 1 ООО «Кузбассхлеб» в месильной емкости миксером для строительных смесей со спиральным рабочим органом в течение 300 с. Для хлеба формового сорта «Кемеровский» изучалось влияние механоактивации при замесе теста хлебопекарного. В работе использовалась мука пшеничная 1 сорта. Опытные испытания проводились с использованием тестомесильной машиной Г4-МТМ-330-01 (рис. 7). Из графиков следует, что в начальный период

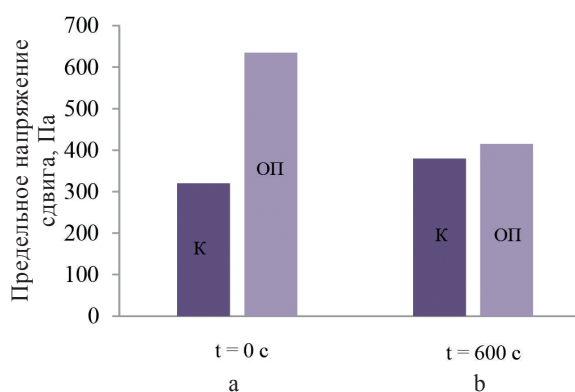


Рисунок 5. Изменение предельного напряжения сдвига теста пшеничного во времени: а – сразу после замеса; б – через 600 с после замеса

Figure 5. Changes in the ultimate shear stress of wheat dough: а – immediately after kneading; б – 600 s after kneading

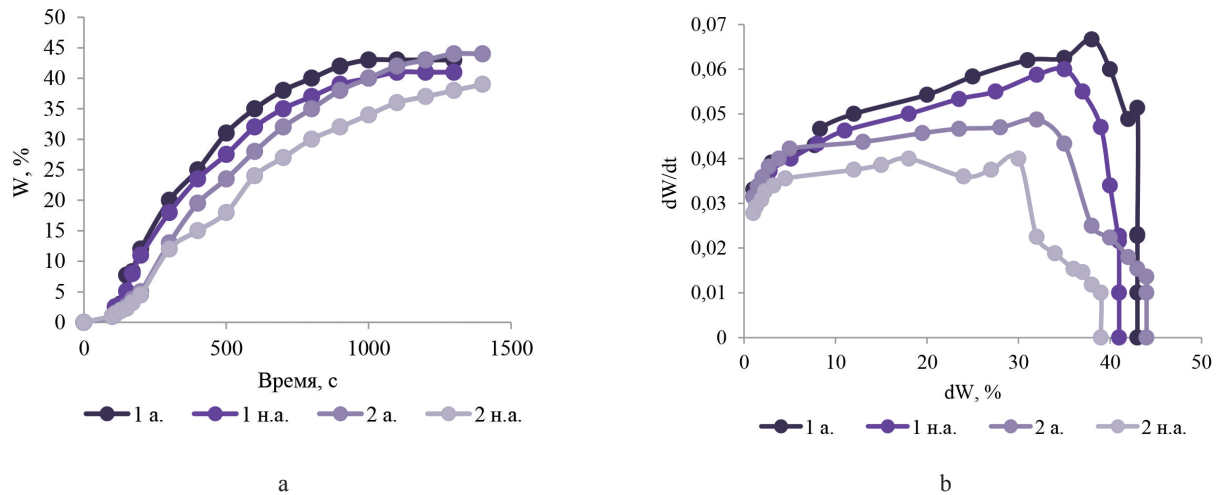


Рисунок 6. Графики влагуудаления (а) и кинетики сушки (б) теста хлебопекарного с временным интервалом 2700 с: 1н.а. и 2н.а. – контрольный образец; 1а. и 2а. – образец с активированной водой

Figure 6. Moisture removal (a) and drying kinetics (b) of bakery dough with a time interval of 2700 s: 1н.а., 2н.а. – control sample; 1а., 2а. – sample with activated water

времени (до 200 с) при равных технологических и технических параметрах потребление мощности значительно ниже (примерно на 40 %). Проведенные опыты привели к ускоренному структурообразованию в тесте. Установлено, что снижение поверхностного натяжения резко улучшилось при смачиваемости муки водой. Максимальная мощность была достигнута через 220–240 с, а максимальная мощность у контрольного образца наблюдался через 300–330 с. Экспериментальный образец оказался выше на 30 % при предельном напряжении сдвига теста.

Из проведенных исследований можно сделать вывод о влиянии механоактивации на начальном периоде взаимодействия муки с водой, когда смачиваемость муки резко улучшается за счет

снижения поверхностного натяжения активированной воды. Высокое предельное напряжение сдвига, водосвязывающая способность и структура теста отличаются в опытном образце. Это объясняется тем, что энергия активированной воды передается компонентам муки (углеводы и белки), которые при взаимодействии во время замеса теста образуют прочную клейковину и увеличивают водопоглощение получаемого теста [22–32].

Оценка потребительских свойств хлеба на активированной воде. Экспериментально установлено, что для образцов хлеба, полученного с применением механоактивированной воды, удельный объем хлеба повысился с 2,05 до 2,38 см³/г, а характер пористости хлеба изменился. Для контрольного образца поры

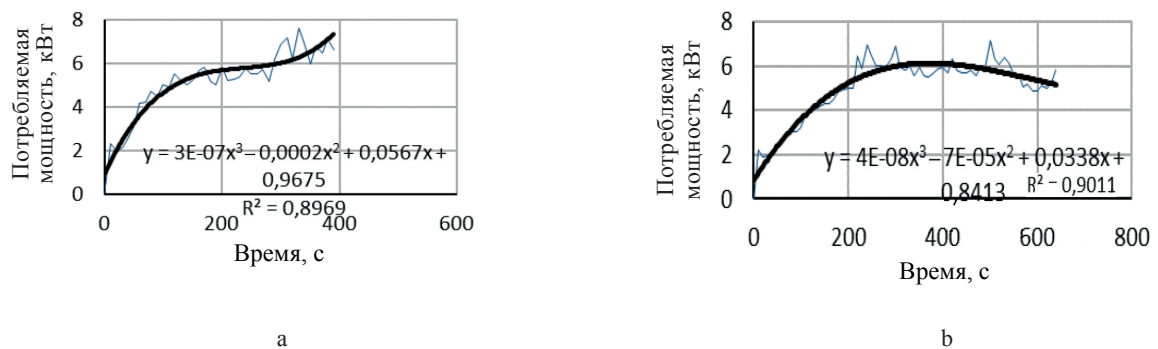


Рисунок 7. Зависимости потребляемой мощности во времени при замесе теста пшеничного из муки 1 сорта тестомесильной машиной Г4-МТМ-330-01: а – контрольный замес; б – замес с механоактивированной водой

Figure 7. Power consumption and kneading time for high-quality wheat dough with a dough mixer G4-MTM-330-01: а – control sample; б – sample with mechanically activated water

Таблица 3. Сравнительная характеристика образцов хлеба

Table 3. Comparative characteristics of bread samples

Образец	Контроль № 1	Опыт № 1	Контроль № 2	Опыт № 2
Масса остывшего хлеба, г	400	403	493	497
Пористость, %	66,1	66,6	71,4	71,5
Объем хлеба, см ³	820	830	1175	1200

неравномерные, вытянутые, надрывистые, с преобладанием пор большего диаметра (5–6 мм) и значительным их уплотнением возле нижней корки формового хлеба. Для экспериментального образца пористое пространство хлеба изменилось: образующиеся без подрывов поры со средним диаметром 3–4 мм равномерно распределяются по всему объему выпеченного хлеба. Это изменение пористости хлеба способствовало изменению и других его потребительских свойств. Результаты экспериментов показали, что мякиш экспериментального образца в 1,4 раза был более упругим, чем в контрольном образце.

В таблице 3 представлены потребительские характеристики хлеба по результатам испытаний двух его образцов.

Из таблицы 3 следует, что для опытных образцов увеличиваются масса остывшего хлеба, благодаря повышению водосвязывающей способности теста, пористость за счет более совершенной работы дрожжей и общий объем остывшего хлеба.

Выводы

Изучено изменение физико-химических свойств воды после ее механической обработки (рН, поверхностное натяжение, биологическая активность). Механически обработанная вода подкисляется, имеет повышенную биологическую активность и пониженное поверхностное натяжение, обладает высокой текучестью и повышенной растворяющей способностью. Установлено влияние механоактивации воды в начальный период взаимодействия муки и воды. Доказано, что при повышении смачиваемости энергия перемешивания воды и муки снижается

на 30–40 %. Сформированная структура теста обладает высоким предельным напряжением сдвига и повышенной водосвязывающей способностью.

Предварительная механоактивация воды перед замесом теста вносит изменения в качество хлеба: наблюдается повышение объема хлеба и его упругости с одновременным равномерным распределением пор.

В результате проведенных исследований выявлено, что применение механоактивации воды позволит регулировать качество теста и получать продукцию высокого качества, тем самым повысит конкурентоспособность предприятия на рынке.

Критерии авторства

С. Д. Руднев и Т. В. Шевченко – организация исследований, получение фактического материала, написание рукописи. Ю. В. Устинова и Р. В. Крюк – общая редакция рукописи. В. В. Иванов и А. М. Чистяков – аналитический обзор литературы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.D. Rudnev and T.V. Shevchenko organized the research, obtained factual data, and drafted the manuscript. Yu.V. Ustinova and R.V. Kryuk revised the manuscript. V.V. Ivanov and A.M. Chistyakov performed the analytical review.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Hussein A. M. S., Ibrahim G. E. Effects of various brans on quality and volatile compounds of bread // *Foods and Raw Materials*. 2019. Vol. 7. № 1. P. 42–50. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-42-50>.
2. Барышникова Н. И., Резниченко И. Ю., Вайскрובה Е. С. Разработка системы управления безопасностью на основе принципов ХАССП при производстве хлеба из пшеничной муки // *Техника и технология пищевых производств*. 2017. Т. 47. № 4. С. 115–122. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-115-122>.
3. Reasons for the ways of using oilcakes in food industry / M. S. Bochkarev [и др.] // *Foods and Raw Materials*. 2016. Vol. 4. № 1. P. 4–12. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-4-12>.

4. Науменко Н. В. К вопросу о качестве хлеба и хлебобулочных изделий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2013. Т. 1. № 2. С. 45–49.
5. Способ изменения поверхностного натяжения водных растворов поверхностно-активных веществ / Т. В. Шевченко [и др.] // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–26. С. 5787–5790.
6. Кравченко В. Н., Мазаев Ю. В., Яшин И. С. Основные показатели активированной воды с учетом ее разбавления // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2018. Т. 31. № 3. С. 174–177.
7. Сокол Н. В., Атрощенко Е. А. Исследование влияния электрохимически активированной воды на реологические свойства теста и качество хлеба // Новые технологии. 2019. № 1. С. 170–177. <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10117>.
8. Изменение свойств воды и водосодержащих систем при использовании низкоэнергетических воздействий / Г. Н. Сидоренко [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2018. № 2. С. 99–119. <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2018.2.08>.
9. Оценка процессов структурообразования в воде и водосодержащих средах с использованием электрофизических методов и термометрии / Г. Н. Сидоренко [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 2. С. 202–214. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-2-202-214>.
10. Прилипка А. В., Иванов В. В. О влиянии предварительной обработки воды на технологические процессы и качество хлеба // Пищевые инновации в биотехнологии: сборник тезисов VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2018. С. 56–59.
11. Electrochemical activation as a fat rendering technology / M. V. Gorbacheva [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 32–42. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-32-42>.
12. Руднев С. Д., Иванов В. В., Крюк Р. В. Совершенствование процесса структурообразования пшеничного теста // Новые технологии. 2019. № 1. С. 149–161. <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10115>.
13. Comparison of dispersion behavior of agglomerated particles in liquid between ultrasonic irradiation and mechanical stirring / S. Sumitomo [et. al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 40. P. 822–831. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.023>.
14. Brown P. S., Bhushan B. Bioinspired materials for water supply and management: water collection, water purification and separation of water from oil // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. № 2073. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0135>.
15. Sun C. Q., Sun Y. The attribute of water. Single notion, multiple myths. Singapore: Springer, 2016. 494 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0180-2>.
16. Comparison of liquid state anomalies in Stillinger-Weber models of water, silicon and germanium / D. Dhabal [et al.] // Journal of Chemical Physics. 2016. Vol. 145. № 21. <https://doi.org/10.1063/1.4967939>.
17. On the time required for freezing water / J. R. Espinosa [et al.] // Journal of Chemical Physics. 2016. Vol. 145. № 21. <https://doi.org/10.1063/1.4965427>.
18. Rogers J. M., Ichie T. Multipole moments of water molecules and water solvation of monovalent ions // Journal of Molecular Liquids. 2017. Vol. 228. P. 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.007>.
19. Torres-Carbajal A., Castañeda-Priego R. Characterization of the thermodynamics, structure and dynamics of a water-like model in 2- and 3-dimensions // Physical Chemistry Chemical Physics. 2016. Vol. 18. № 26. P. 17335–1730. <https://doi.org/10.1039/c6cp01565d>.
20. Izadi S., Onufriev A. V. Accuracy limit of rigid 3-point water models // Journal of Chemical Physics. 2016. Vol. 145. № 7. <https://doi.org/10.1063/1.4960175>.
21. Руднев С. Д., Вайман Е. Ф., Яремчук А. И. Интенсификация и повышение качества селективной дезинтеграции адгезионным разупрочнением растительной ткани // Техника и технология пищевых производств. 2010. Т. 17. № 2. С. 50–55.
22. Modeling molecular interactions in water: from pairwise to many-body potential energy functions / G. A. Cisneros [et al.] // Chemical Reviews. 2016. Vol. 116. № 13. P. 7501–7528. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00644>.
23. Ben-Amots D. Water-mediated hydrophobic interactions // Annual Review of Physical Chemistry. 2016. Vol. 67. P. 617–638. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112412>.
24. Kronberg B. The hydrophobic effect // Current Opinion in Colloid and Interface Science. 2016. Vol. 22. P. 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.Cocis.2016.02.001>.
25. Grdadolnik J., Marsel F., Avbel F. Origin of hydrophobicity and enhanced water hydrogen bond strength near purely hydrophobic solutes // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2017. Vol. 114. № 2. P. 322–327. <https://doi.org/10.1073/pnas.1612480114>.
26. Xi E., Patel A. J. The hydrophobic effect, and fluctuations: The long and the short of it // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2016. Vol. 113. № 17. P. 4549–4551. <https://doi.org/10.1073/pnas.1603014113>.
27. Hillyer M. B., Gibb B. C. Molecular shape and the hydrophobic effect // Annual Review of Physical Chemistry. 2016. Vol. 67. P. 307–329. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112316>.

28. Water determines the structure and dynamics of proteins / M.-C. Bellissent-Funel [et al.] // *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116. № 13. P. 7673–7697. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00664>.
29. Direct synthesis of hydrogen peroxide from plasma-water interactions / J. Liu [et al.] // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. <https://doi.org/10.1038/srep38454>.
30. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system / E. G. Kivrak [et al.] // *Journal of Microscopy and Ultrastructure*. 2017. Vol. 5. № 4. P. 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.07.003>.
31. Bread and health / L. Kourkouta [et al.] // *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2017. Vol. 5. P. 821–826. <https://doi.org/10.17265/2328-2150/2017.11.005>.
32. Vladilo G., Hassanali A. Hydrogen bonds and life in the Universe // *Life*. 2018. Vol. 8. № 1. <https://doi.org/10.3390/life8010001>.

References

1. Hussein AMS, Ibrahim GE. Effects of various brans on quality and volatile compounds of bread. *Foods and Raw Materials*. 2019;7(1):42–50. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-42-50>.
2. Baryshnikova NI, Reznichenko IYu, Vayskrobova ES. Development of the safety management system based on hazard analysis and critical control points approach at wheat bread production. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2017;47(4):115–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-115-122>.
3. Bochkarev MS, Egorova EYu, Reznichenko IYu, Poznyakovskiy VM. Reasons for the ways of using oilcakes in food industry. *Foods and Raw Materials*. 2016;4(1):4–12. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-4-12>.
4. Naumenko NV. On bread and bakery products quality. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2013;1(2):45–49. (In Russ.).
5. Shevchenko TV, Novikova YaA, Sannikov YuN, Berdova KA. Method of changing the surface tension of aqueous surfactant solutions. *Fundamental research*. 2015;(2–26):5787–5790. (In Russ.).
6. Kravchenko VN, Mazaev YuV, Yashin IS. The main indicators of activated water taking into account their dilution. *Journal of VNIIMZH*. 2018;31(3):174–177. (In Russ.).
7. Sokol NV, Atroshchenko EA. Study of the effect of electrochemically activated water on rheological properties of dough and quality of bread. *New Technologies*. 2019;(1):170–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10117>.
8. Sidorenko GN, Laptev BI, Gorlenko NP, Antoshkin LV. Changes in the properties of water and water-containing systems using low-energy influences. *PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology*. 2018;(2):99–119. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2018.2.08>.
9. Sidorenko GN, Laptev BL, Gorlenko NP, Sarkisov YuS, Antoshkin LV. Electrophysical and temperature calculations of structurization in water and water-containing media. *Journal of Construction and Architecture*. 2019;21(2):202–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-2-202-214>.
10. Prilipko AV, Ivanov VV. O vliyanii predvaritel'noy obrabotki vody na tekhnologicheskie protsessy i kachestvo khleba [Pretreatment of water on technological processes and the quality of bread]. *Pishchevye innovatsii v biotekhnologii: sbornik tezisov VI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Food Innovations in Biotechnology: Proceedings of the VI International scientific conference of students, graduate students, and young scientists]; 2018; Kemerovo. Kemerovo: Kemerovo State University; 2018. p. 56–59. (In Russ.).
11. Gorbacheva MV, Tarasov VE, Kalmanovich SA, Sapozhnikova AI. Electrochemical activation as a fat rendering technology. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(1):32–42. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-32-42>.
12. Rudnev SD, Ivanov VV, Kryuk RV. Improvement of wheat dough structuring process. *New Technologies*. 2019;(1):149–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10115>.
13. Sumitomo S, Koizumi H, Uddin MA, Kato Y. Comparison of dispersion behavior of agglomerated particles in liquid between ultrasonic irradiation and mechanical stirring. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;40:822–831. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.023>.
14. Brown PS, Bhushan B. Bioinspired materials for water supply and management: water collection, water purification and separation of water from oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016;374(2073). <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0135>.
15. Sun CQ, Sun Y. The attribute of water. Single notion, multiple myths. Singapore: Springer; 2016. 494 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0180-2>.
16. Dhabal D, Chakravarty C, Molinero V, Kashyap HK. Comparison of liquid state anomalies in Stillinger-Weber models of water, silicon and germanium. *Journal of Chemical Physics*. 2016;145(21). <https://doi.org/10.1063/1.4967939>.
17. Espinosa JR, Navarro C, Sanz E, Valeriani C, Vega C. On the time required for freezing water. *Journal of Chemical Physics*. 2016;145(21). <https://doi.org/10.1063/1.4965427>.
18. Rogers JM, Ichie T. Multipole moments of water molecules and water solvation of monovalent ions. *Journal of Molecular Liquids*. 2017;228:54–62. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.007>.

19. Torres-Carbajal A, Castañeda-Priego R. Characterization of the thermodynamics, structure and dynamics of a water-like model in 2- and 3-dimensions. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2016;18(26):17335–1730. <https://doi.org/10.1039/c6cp01565d>.
20. Izadi S, Onufriev AV. Accuracy limit of rigid 3-point water models. *Journal of Chemical Physics*. 2016;145(7). <https://doi.org/10.1063/1.4960175>.
21. Rudnev SD, Vaiman EF, Yaremchuk AI. Intensification and quality improvement of selective disintegration with adhesive softening of plant tissue. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2010;17(2):50–55. (In Russ.).
22. Cisneros GA, Wikfeldt KT, Ojamäe L, Lu J, Xu Y, Torabifard H, et al. Modeling molecular interactions in water: from pairwise to many-body potential energy functions. *Chemical Reviews*. 2016;116(13):7501–7528. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00644>.
23. Ben-Amots D. Water-mediated hydrophobic interactions. *Annual Review of Physical Chemistry*. 2016;67:617–638. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112412>.
24. Kronberg B. The hydrophobic effect. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. 2016;22:14–22. <https://doi.org/10.1016/j.Cocis.2016.02.001>.
25. Grdadolnik J, Marsel F, Avbel F. Origin of hydrophobicity and enhanced water hydrogen bond strength near purely hydrophobic solutes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017;114(2):322–327. <https://doi.org/10.1073/pnas.1612480114>.
26. Xi E, Patel AJ. The hydrophobic effect, and fluctuations: The long and the short of it. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2016;113(17):4549–4551. <https://doi.org/10.1073/pnas.1603014113>.
27. Hillyer MB, Gibb BC. Molecular shape and the hydrophobic effect. *Annual Review of Physical Chemistry*. 2016;67:307–329. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112316>.
28. Bellissent-Funel M-C, Hassanali A, Havenith M, Henchman R, Pohl P, Sterpone F, et al. Water determines the structure and dynamics of proteins. *Chemical Reviews*. 2016;116(13):7673–7697. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00664>.
29. Liu J, He B, Chen Q, Li J, Xiong Q, Yue G, et al. Direct synthesis of hydrogen peroxide from plasma-water interactions. *Scientific Reports*. 2016;6. <https://doi.org/10.1038/srep38454>.
30. Kivrak EG, Yurt KK, Kaplan AA, Alkan I, Altun G. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*. 2017;5(4):167–176. <https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.07.003>.
31. Kourkouta L, Koukourikos K, Iliadis C, Ouzounakis P, Monios A, Tsaloglidou A. Bread and health. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2017;5:821–826. <https://doi.org/10.17265/2328-2150/2017.11.005>.
32. Vladilo G, Hassanali A. Hydrogen bonds and life in the Universe. *Life*. 2018;8(1). <https://doi.org/10.3390/life8010001>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-779-783>Краткое сообщение
<http://fptt.ru>

Биологически активные вещества порошков из плодов барбариса и калины



Г. Н. Дубцова^{1,*}, А. А. Ломакин², И. У. Кусова¹,
Е. И. Буланникова¹, Д. И. Быстров¹

¹ Московский государственный университет пищевых производств^{ROR}, Москва, Россия

² ООО «Пуратос», Подольск, Россия

Поступила в редакцию: 27.09.2021

Принята после рецензирования: 18.10.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: doubtsova@mail.ru

© Г. Н. Дубцова, А. А. Ломакин, И. У. Кусова, Е. И. Буланникова, Д. И. Быстров, 2021

Аннотация.

Введение. Применение растительного сырья, продукты переработки которого богаты биологически активными веществами, позволяет повысить пищевую ценность продуктов питания. Цель исследования состоит в определении содержания биологически активных веществ в порошках из плодов калины и барбариса.

Объекты и методы исследования. Порошки из плодов калины обыкновенной (*Viburnum opulus* L.) и барбариса (*Berberis vulgaris* L.), высушенные конвективным способом и измельченные до размера частиц не более 50 мкм.

Результаты и их обсуждение. Изучен состав фенольных соединений порошков. Общее содержание фенольных соединений в порошке калины составило 3114,07 мг/100 г, в порошке барбариса – 2272,7 мг/100 г. Содержание флавоноидов в порошке калины – 324,52 мг/100 г, в порошке барбариса – 390,00 мг/100 г. Исследован профиль флавоноидов порошков, включающий рутин, гиперозид, кверцитрин, изокверцитрин и астралагин. Установлено общее содержание катехинов: 446 и 506 мг/100 г порошка для калины и барбариса соответственно. Преимущественный состав катехинов: эпигаллокатехин и катехин. Для порошка калины преобладает эпикатехин – 196, катехин – 118 и эпигаллокатехин – 89 мг/100 г порошка, а для барбариса эпигаллокатехин – 173, катехин – 111 и эпикатехин – 74 мг/100 г порошка. Антирадикальная активность по отношению к тролоксовому эквиваленту в порошке калины составила 7560 мг/100 г, в порошке барбариса – 9460 мг/100 г.

Выводы. Полученные порошки из плодов калины и барбариса могут быть рекомендованы для обогащения пищевых продуктов биологически активными веществами и расширения ассортимента.

Ключевые слова. Растительное сырье, калина, барбарис, порошок, флавоноиды, фенольные соединения, витамин С

Для цитирования: Биологически активные вещества порошков из плодов барбариса и калины / Г. Н. Дубцова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 779–783. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-779-783>.

Research Brief

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Biologically Active Substances from Powdered Barberry and Viburnum

Galina N. Dubtsova^{1,*}, Alexander A. Lomakin²,
Irina U. Kusova¹, Ekaterina I. Bulannikova¹, Dmitriy I. Bystrov¹

¹ Moscow State University of Food Production^{ROR}, Moscow, Russia

² LLC Puratos, Podolsk, Russia

Received: September 27, 2021

Accepted in revised form: October 18, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: doubtsova@mail.ru

© G.N. Dubtsova, A.A. Lomakin, I.U. Kusova, E.I. Bulannikova, D.I. Bystrov, 2021

Abstract.

Introduction. Plant raw materials can be a source of biologically active substances and increase the nutritional value of food

products. The present research objective was to determine the content of biologically active substances in powdered viburnum and barberry.

Study objects and methods. The study featured viburnum (*Viburnum opulus* L.) and barberry (*Berberis vulgaris* L.), dried by convection and crushed into particles of 50 microns.

Results and discussion. The total content of phenolic compounds in powdered viburnum was 3114.07 mg/100 g, in powdered barberry – 2272.7 mg/100 g. The content of flavonoids in powdered viburnum was 324.52 mg/100 g, in powdered barberry – 390.00 mg/100 g. The flavonoid profile of the powders included rutin, hyperoside, quercitrin, isoquercitrin, and astralagin. The total content of catechins was 446 mg/100 g for viburnum and 506 mg/100 g for barberry. The catechins included mainly epigallocatechin and catechin. In powdered viburnum, the catechin composition was as follows: epicatechin – 196, catechin – 118, and epigallocatechin – 89 mg/100 g; in powdered barberry: epigallocatechin – 173, catechin – 111, and epicatechin – 74 mg/100 g. The antiradical activity in relation to trolox equivalent was 7560 mg/100 g in powdered viburnum and 9460 mg/100 g in powdered barberry.

Conclusion. The obtained viburnum and barberry powders can fortify food with biologically active substances and expand the range of functional products.

Keywords. Vegetable raw materials, viburnum, barberry, powder, flavonoids, phenolic compounds, vitamin C

For citation: Dubtsova GN, Lomakin AA, Kusova IU, Bulannikova EI, Bystrov DI. Biologically Active Substances from Powdered Barberry and Viburnum. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):779–783. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-779-783>.

Введение

Один из способов улучшить состояния здоровья – питание. Благодаря правильно выбранному питанию можно не только помочь собственной иммунной системе в противостоянии различным микробным и вирусным заболеваниям, но и избежать ряда алиментарных заболеваний. Такое стремление потребителей требует от научного и производственного сообщества искать новые источники сырья, которые могут повысить пищевую ценность готовых продуктов, насыщая их полезными макро- и микронутриентами [1].

Таковыми источниками является плодово-ягодное сырье, содержащее пищевые волокна, витамины, минеральные вещества, органические кислоты и широкий спектр флавоноидных соединений. Включение в рецептуру традиционных продуктов питания плодово-ягодного сырья, содержащего комплекс ценных природных биологически активных веществ, позволит расширить ассортимент продукции здорового питания [2–5]. Также это актуальное направление в решении проблемы коррекции структуры питания.

Растительный мир представлен множеством дикорастущих плодовых и ягодных растений. В настоящее время интенсивно ведутся работы для создания научно-обоснованных рекомендаций их рационального использования [6–11].

В связи с сезонностью сбора и закупки плодово-ягодного сырья современные технологии переработки нацелены на получение технологичных плодово-ягодных полуфабрикатов, удобных в хранении, транспортировке и применении. Технологии получения порошкообразных продуктов являются наиболее перспективными. Их применение при

производстве разнообразных продуктов питания позволит обогатить пищевую продукцию макро- и микронутриентами.

Из числа нетрадиционных источников плодово-ягодного сырья, произрастающего в различных регионах России, можно отметить плоды калины (*Viburnum opulus* L.) и барбариса (*Berberis vulgaris* L.). Значительные ареалы их произрастания, биологические запасы, пищевые и фармакологические свойства обуславливают высокий спрос и несомненный интерес для индустрии здорового питания.

Цель данного исследования – определить содержание биологически активных веществ в порошках из плодов калины и барбариса.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись плоды калины обыкновенной (*Viburnum opulus* L.) и барбариса (*Berberis vulgaris* L.), собранные в Московской области (2019 г., сентябрь). Их высушивали конвективным способом при температуре 50 °С до воздушно-сухого состояния и измельчали до размера частиц не более 50 мкм. Таким образом, получали порошки калины темно-красного цвета с влажностью 8,4 % и барбариса коричневого цвета с влажностью 7,6 %.

Гранулометрический состав порошков калины и барбариса определяли на приборе Гранулометр ГИУ-1 для определения гранулометрического состава порошкообразных пищевых сред.

Суммарное содержание фенольных соединений в пересчете на галловую кислоту определяли методом Фолина-Чокальтеу; содержание флавоноидов – спектрофотометрически при длине волны 415 нм в пересчете на рутин; профиль флавоноидов – методом

Таблица 1. Содержание биологически активных веществ в порошке калины и барбариса

Table 1. Biologically active substances in viburnum and barberry powders

Показатель	Содержание мг/100 г сухого вещества	
	Калина	Барбарис
Витамин С	496,94 ± 9,94	348,80 ± 6,97
Полифенольные соединения	3114,07 ± 62,28	2272,70 ± 45,45
Флавоноиды в пересчете на рутин	324,52 ± 8,40	390,00 ± 10,10

Таблица 3. Содержание флавоноидов в порошке из плодов калины и барбариса

Table 3. Flavonoids in viburnum and barberry powders

Показатель	Содержание соединений в порошке, мг/100 г	
	Калина	Барбарис
Рутин	5,00 ± 0,02	12,00 ± 0,30
Гиперозид	1,00 ± 0,02	16,00 ± 0,40
Изокверцитрин	3,00 ± 0,07	3,00 ± 0,07
Астрагалин	1,00 ± 0,02	1,00 ± 0,02
Кверцитрин	2,00 ± 0,05	7,00 ± 0,17
Сумма флавоноидов	12,00 ± 0,30	39,00 ± 0,98

ВЭЖХ, антиоксидантную активность оценивали в DPPH-тесте *in vitro* [12–14].

Результаты и их обсуждение

Анализ литературных данных показал, что особый интерес среди биологически активных веществ порошка из плодов калины и барбариса, представляют полифенольные соединения. Фенольные соединения плодов калины и барбариса представлены флавоноидами и фенолокислотами. Они являются многофункциональными антиоксидантами, способными предотвращать ингибирование образовавшихся активных форм кислорода, липидных, пероксильных и алкоксильных радикалов, образование хелатных комплексов с ионами переходных металлов. Также флавоноиды встраиваются в гидрофобный кор мембран и снижают микровязкость в зоне встраивания. Это создает пространственное затруднение для диффузии в мембрану свободных радикалов и ведет к замедлению процессов мембранной перекисидации [15].

В полученном порошке плодов определяли содержание витамина С, флавоноидов и полифено-

льных соединений. Результаты представлены в таблице 1.

Из результатов, приведенных в таблице 1, следует, что в порошке из плодов калины и барбариса высокое содержание полифенольных соединений и витамина С. Это позволяет считать их хорошими источниками антиоксидантов.

Профиль катехинов для порошка из плодов калины и барбариса представлен в таблице 2.

Среди катехиновых соединений в порошке калины преобладают эпикатехин и катехин, а в порошке барбариса в наибольшем количестве содержатся эпигаллокатехин и катехин.

Флавоноиды проявляют высокую антирадикальную активность. Из флавонолов наибольшую активность проявляет кверцетин, из флаван-3-олов – эпикатехингаллат и эпигаллокатехингаллат, из антоцианидов – дельфинидин и цианидин [16]. Содержание флавоноидов в порошке из плодов калины и барбариса представлено в таблице 3.

Флавоноиды порошков представлены агликонами флавонолов в виде кверцитрина и изокверцитрина, а также гликозидами флавонолов – рутином, гиперозидом и астрагалином. Преобладающим флавоноидом для калины является рутин, для барбариса – гиперозид.

Порошки калины и барбариса содержат значительное количество фенольных соединений. Флавоноиды представлены соединениями, которые обладают высокой антирадикальной активностью. Антирадикальная активность порошка калины по отношению к тролоксовому эквиваленту составила 7560 мг/100 г, а для порошка барбариса – 9460 мг/100 г.

Выводы

Определены биологически активные вещества порошков из плодов калины и барбариса. Установлено содержание полифенольных соединений, флавоноидов и аскорбиновой кислоты в порошке калины: 3114,07 ± 62,28, 324,52 ± 8,40, 496,94 ± 9,94 соответственно; в порошке барбариса: 2272,70 ± 45,45, 390,00 ± 10,10, 348,80 ± 6,97 соответственно. Определен профиль

Таблица 2. Состав и содержание катехинов в порошке из плодов калины и барбариса

Table 2. Composition and content of catechins in viburnum and barberry powders

Показатель	Содержание соединений в порошке, мг/100 г	
	Калина	Барбарис
Эпигаллокатехин	89,00 ± 1,78	173,00 ± 3,46
Катехин	118,00 ± 2,36	111,00 ± 2,22
Эпикатехин	196,00 ± 3,92	74,00 ± 1,48
Эпигаллокатехин галлат	15,00 ± 0,30	64,00 ± 1,28
Галлокатехин галлат	9,00 ± 0,18	55,00 ± 1,10
Эпикатехин галлат	19,09 ± 0,38	29,00 ± 0,58
Сумма катехинов	446,00 ± 8,92	506,00 ± 10,12

индивидуальных флавонолов и флаван-3-олов. Показана высокая антирадикальная активность в DPPH-тестах. Антирадикальная активность порошка калины по отношению к тролоксовому эквиваленту составила 7560 мг/100 г, а для порошка барбариса – 9460 мг/100 г. Полученные данные позволяют рекомендовать порошки из плодов калины и барбариса в качестве источника функциональных пищевых ингредиентов при производстве пищевой продукции.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Nutritional, textural, and sensory quality of bars enriched with banana flour and pumpkin seed flour / U. Habiba [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 2. P. 282–289. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-282-289>.
2. Functional and sensory properties of jam with different proportions of pineapple, cucumber, and *Jatropha* leaf / A. F. Ogori [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 192–200. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-192-200>.
3. Использование ягодного сырья в технологии мягкого сыра функционального назначения / А. В. Борисова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 1. С. 11–20. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-11-20>.
4. Okatan V. Antioxidant properties and phenolic profile of the most widely appreciated cultivated berry species: A comparative study // Folia Horticulturae. 2020. Vol. 32. № 1. P. 79–85. <https://doi.org/10.2478/fhort-2020-0008>.
5. Anti-oxidant and anti-enzymatic activities of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) fruits modulated by chemical components / K. Tkacz [et al.] // Antioxidants. 2019. Vol. 8. № 12. <https://doi.org/10.3390/antiox8120618>.
6. Research of biochemical composition and antioxidant activity of freeze-dried cranberry powder obtained on the basis of enzymatically processed berry pulp / E. V. Alekseenko [et al.] // Asian Journal of Pharmaceutics. 2018. Vol. 12. P. S466–S476.
7. Biotechnological ways of processing seabuckthorn for foods manufacture / E. V. Alekseenko [et al.] // Abstract proceedings of the 5th International Seabuckthorn Association Conference. Xining, 2011. P. 121.
8. О возможности использования плодов барбариса в производстве продуктов специального назначения / М. Т. Шаов [и др.] // Вестник Кабардино-Балкарского государственного университета. Серия: Биологические науки. 2002. № 5. С. 43–45.
9. Functional bakery products in dietary nutrition / S. N. Butova [et al.] // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2019. Vol. 11. № 8. P. 2084–2089.
10. Исследование минерального состава в процессе переработки дикорастущих ягод / Л. П. Нилова [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 1. С. 151–156. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-1-151-156>.
11. Черноусова О. В., Кривцова А. И., Кучменко Т. А. Определение антиоксидантной активности белого чая // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 1. С. 133–139. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-1-133-139>.
12. Методы анализа минорных биологически активных веществ пищи / В. А. Тутельян [и др.]. М.: Династия, 2010. 180 с.
13. Brand-Williams W., Cuvelier M. E., Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity // LWT – Food Science and Technology. 1995. Vol. 28. № 1. P. 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5).
14. Sharma O. P., Bhat T. K. DPPH antioxidant assay revisited // Food Chemistry. 2009. Vol. 113. № 4. P. 1202–1205. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.008>.
15. Базарнова Ю. Г., Полякова Ю. К. Исследование антиоксидантной активности природных веществ // Хранение и переработка сельхоз сырья. 2009. № 3. С. 31–36.
16. Органическая химия. Книга 2 Специальный курс / Н. А. Тюкавкина [и др.]. М.: Дрофа, 2008. 592 с.

References

1. Habiba U, Robin MA, Hasan MM, Toma MA, Akhter D, Mazumder MAR. Nutritional, textural, and sensory quality of bars enriched with banana flour and pumpkin seed flour. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(2):282–289. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-282-289>.
2. Ogori AF, Amove J, Evi-Parker P, Sardo G, Okpala COR, Bono G, et al. Functional and sensory properties of jam with different proportions of pineapple, cucumber, and *Jatropha* leaf. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(1):192–200. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-192-200>.
3. Borisova AV, Ruzyanova AA, Tyaglova AM, Polikarpova KV. Berry raw materials in functional soft cheese production. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(1):11–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-11-20>.
4. Okatan V. Antioxidant properties and phenolic profile of the most widely appreciated cultivated berry species: A comparative study. *Folia Horticulturae*. 2020;32(1):79–85. <https://doi.org/10.2478/fhort-2020-0008>.
5. Tkacz K, Wojdyło A, Turkiewicz IP, Bobak Ł, Nowicka P. Anti-oxidant and anti-enzymatic activities of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) fruits modulated by chemical components. *Antioxidants*. 2019;8(12). <https://doi.org/10.3390/antiox8120618>.
6. Alekseenko EV, Bystrova EA, Semenov GV, Dubtsova GN, Mashentceva NG. Research of biochemical composition and antioxidant activity of freeze-dried cranberry powder obtained on the basis of enzymatically processed berry pulp. *Asian Journal of Pharmaceutics*. 2018;12:S466–S476.
7. Alekseenko EV, Dikareva YuM, Traubenberg SE, Ostashenkova NV. Biotechnological ways of processing seabuckthorn for foods manufacture. Abstract proceedings of the 5th International Seabuckthorn Association Conference; 2011; Xining. Xining. 2011. p. 121.
8. Shaov MT, Dzhaboeva AS, Shaova LG, Pshikova OV. O vozmozhnosti ispol'zovaniya plodov barbarisa v proizvodstve produktov spetsial'nogo naznacheniya [Barberry in special-purpose products]. *Vestnik Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologicheskie nauki* [Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University. Series: Biological Sciences]. 2002;(5):43–45. (In Russ.).
9. Butova SN, Dubtsov GG, Tsaloeva MR, Dubtsova GN, Kusova IU, Ivanova LA. Functional bakery products in dietary nutrition. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2019;11(8):2084–2089.
10. Nilova LP, Ikramov RA, Malyutenkova SM, Veryaskina AS. Investigation of mineral composition during processing of wild berries. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018;80(1):151–156. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-1-151-156>.
11. Chernousova OV, Krivtsova AI, Kuchmenko TA. The study of antioxidant activity of white tea. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018;80(1):133–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-1-133-139>.
12. Tutel'yan VA, Ehller KI, Aristarkhova TV, Bessonov VV, Bragina IV, Vlasov AM, et al. Metody analiza minornykh biologicheskikh aktivnykh veshchestv pishchi [Methods for the analysis of minor biologically active substances in food]. Moscow: Dinastiya; 2010. 180 p. (In Russ.).
13. Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*. 1995;28(1):25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5).
14. Sharma OP, Bhat TK. DPPH antioxidant assay revisited. *Food Chemistry*. 2009;113(4):1202–1205. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.008>.
15. Bazarnova YuG, Polyakova YuK. Issledovanie antioksidantnoy aktivnosti prirodnykh veshchestv [Antioxidant activity of natural substances]. *Storage and Processing of Farm Products*. 2009;(3):31–36. (In Russ.).
16. Tyukavkina NA, Zurabyan SEh, Beloborodov VL, Luzin AP, Selivanova IA, Artem'eva NN, et al. Organicheskaya khimiya. Kniga 2 Spetsial'nyy kurs [Organic chemistry. Book 2: Special Course]. Moscow: Drofa; 2008. 592 p. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-784-794>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Разработка технологии производства кисломолочных напитков, обогащенных соевым белковым ингредиентом



Е. С. Стаценко*, О. В. Литвиненко, Г. А. Кодирова,
Г. В. Кубанкова, Н. Ю. Корнева, О. В. Покотило

Всероссийский научно-исследовательский институт соевых культур, Благовещенск, Россия

Поступила в редакцию: 29.07.2021

Принята после рецензирования: 07.09.2021
Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: ses@vniisoi.ru



© Е. С. Стаценко, О. В. Литвиненко, Г. А. Кодирова,
Г. В. Кубанкова, Н. Ю. Корнева, О. В. Покотило, 2021

Аннотация.

Введение. Увеличение производства кисломолочных напитков с использованием растительных добавок позволит расширить ассортимент функциональных пищевых продуктов, содержащих ценные компоненты, в том числе пробиотики, витамины и минеральные вещества. Цель исследования – разработка технологии производства кисломолочных напитков, обогащенных соевым белковым ингредиентом.

Объекты и методы исследования. Контрольные образцы кисломолочных напитков, полученные из молока коровьего пастеризованного с использованием бактериальных заквасок прямого внесения, а также опытные образцы кисломолочных напитков, обогащенные пищевой добавкой, полученной из соевого зерна. Соевый белковый ингредиент получали из пророщенного соевого зерна, высушенного и измельченного в муку. Соевое зерно предварительно проращивали в термостате при температуре 26 °С в течение 24 ч, бланшировали паром 15 мин. Полученную добавку вносили в пастеризованное молоко в количестве 1–9 %, сквашивали при температуре 38–40 °С в течение 6–8 ч, исследовали показатели качества и физико-химический состав.

Результаты и их обсуждение. По органолептическим показателям наилучшим стал образец с массовой долей добавки в кисломолочных напитках 5 %. Это привело к повышению пищевой ценности напитков «Бифивит с СБИ» и «Иммуновит с СБИ», а именно белка на 1,92 и 1,79 г, жира – на 0,77 и 0,75 г, витамина Е – на 0,16 мг, холина – на 23,82 мг, калия – на 149 мг, фосфора – на 19 и 22 мг, кальция – на 25 и 24 мг, магния – на 22 и 23 мг соответственно. В одной порции разработанных напитков (100 г) содержание белка, витамина В₂, а также калия, магния, кальция и фосфора составило более 15 % от суточной физиологической потребности организма человека. Содержание молочнокислых микроорганизмов и бифидобактерий в свежих продуктах и в конце срока годности оставалось выше нормы (1×10^8), что положительно характеризует разработанные напитки.

Выводы. На основании проведенных исследований разработана и научно обоснована технология производства кисломолочных напитков, обогащенных соевым ингредиентом, с улучшенным химическим составом и органолептическими показателями. Разработанные кисломолочные напитки можно отнести к натуральным функциональным пищевым продуктам.

Ключевые слова. Соевое зерно, рецептура, кислотность, белок, витамины, органолептическая оценка, пищевая ценность

Для цитирования: Разработка технологии производства кисломолочных напитков, обогащенных соевым белковым ингредиентом / Е. С. Стаценко [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 784–794. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-784-794>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Fermented Milk Beverages Fortified with Soy Protein

Ekaterina S. Statsenko*, Oksana V. Litvinenko, Galina A. Kodirova,
Galina V. Kubankova, Nadezhda Yu. Korneva, Olesya V. Pokotilo

All-Russian Scientific Research Institute of Soybean Cultures, Blagoveshchensk, Russia

Received: July 29, 2021

Accepted in revised form: September 07, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021



Abstract.

Introduction. Fermented milk beverages with various vegetable additives expand the range of functional foods with probiotics, vitamins, and minerals. The research objective was to develop a new technology for fermented milk drinks fortified with soy protein.

Study objects and methods. Heat-treated cow's milk with Direct Vat Set bacterial starter served as the control sample, while the experimental samples featured fermented milk fortified with soy additives. The soy protein ingredient was obtained from powdered sprouted soybean. Soybeans were pre-germinated in a thermostat at 26°C for 24 h and blanched with steam for 15 min. After that, 1–9% of the soy substance was added to pasteurized milk and fermented at 38–40°C for 6–8 h. The resulting sample was tested for quality indicators and physicochemical composition.

Results and discussion. The best sensory properties belonged to the sample with 5% mass fraction of the soy additive. As a result, the soy-fortified beverages entitled Bifivit and Immunovit had a better nutritional value: protein – by 1.92 and 1.79 g, fat – by 0.77 and 0.75 g, vitamin E – by 0.16 mg, choline – by 23.82 mg, potassium – by 149 mg, phosphorus – by 19 and 22 mg, calcium – by 25 and 24 mg, magnesium – by 22 and 23 mg, respectively. One portion (100 g) of these drinks contained over 15% of recommended daily intake of protein, vitamin B₂, potassium, magnesium, calcium, and phosphorus. The content of lactic acid and bifidobacteria remained above the norm (1×10^8) both in fresh products and by the end of their shelf life.

Conclusion. The article introduces a technology of new functional soy-fortified fermented milk drinks with improved chemical and sensory properties.

Keywords. Soybean, recipe, acidity, protein, vitamins, organoleptic estimation, nutritional value

For citation: Statsenko ES, Litvinenko OV, Kodirova GA, Kubankova GV, Korneva NYu, Pokotilo OV. Fermented Milk Beverages Fortified with Soy Protein. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):784–794. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-784-794>.

Введение

В настоящее время предприятиями молочной промышленности выпускается широкий ассортимент кисломолочных продуктов [1–3]. Значительная доля принадлежит напиткам (йогурт, кефир, ряженка, варенец и т. п.). Широкий ассортимент данной линейки продуктов объясняется популярностью среди населения, пользой и положительным влиянием на здоровье [3–5]. Такие продукты содержат ценные компоненты, в том числе пробиотики, витамины, минеральные вещества, и имеют высокую степень усвояемости организмом человека по сравнению с молоком [4, 5]. Замена в таких продуктах молочного белка и жира растительными позволяет улучшить его органолептические показатели и обогатить продукт аминокислотами, полиненасыщенными жирными кислотами, жирорастворимыми витаминами (А, D, Е) и другими ценными компонентами. Улучшить функциональность кисломолочных напитков возможно путем введения в их состав обогащающих пищевых добавок из растительного сырья [6–10]. Использование растительных компонентов в технологиях кисломолочных продуктов приобретает актуальность и в условиях дефицита молочного сырья [11, 12].

Соя является альтернативным сырьем и популярной сельскохозяйственной культурой мирового значения, т. к. содержит уникальный состав микро- и макронутриентов, а состав белка наиболее приближен к белку животного происхождения [13–16].

Исследованиями доказано, что потребление сои оказывает положительное воздействие на здоровье, включая потенциальное защитное действие на сердечно-сосудистую систему, метаболизм липидов и снижение концентрации холестерина в плазме [17–19]. Однако продукты переработки сои могут вызывать аллергию и некоторые другие побочные эффекты, поэтому людям с хроническими заболеваниями необходимо употреблять их с осторожностью [14–16]. Необходимость использования соевого сырья и продуктов его переработки в производстве кисломолочных продуктов связана не только с их низкой стоимостью и высокой пищевой ценностью, но и с высокими технологическими свойствами и оптимальным сочетанием органолептических свойств [8–10]. Создание научно-обоснованных рецептур и отработка технологий кисломолочных продуктов повышенной пищевой ценности позволит расширить ассортимент диетических продуктов профилактического и функционального назначения.

Цель исследования – разработка технологии производства кисломолочных напитков, обогащенных соевым белковым ингредиентом.

Задачи исследования: разработка технологии производства пищевой добавки – соевого белкового ингредиента (СБИ); органолептическая оценка его качества; определение физико-химических показателей; разработка технологии производства кисломолочных напитков, обогащенных СБИ;

оценка пищевой ценности, физико-химических и микробиологических показателей разработанных кисломолочных напитков.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали:

- контрольные образцы кисломолочных напитков «Бифивит» и «Иммуновит», полученные из молока коровьего пастеризованного м.д.ж. 2,5 % и с использованием бактериальных заквасок прямого внесения VIVO (ООО «ВИВО Индустрия», ТУ 9223-001-18137828-2015) по технологии, рекомендованной производителем заквасок;
- опытные образцы кисломолочных напитков «Бифивит с СБИ» и «Иммуновит с СБИ», обогащенные соевым белковым ингредиентом, полученным из соевого зерна сортов селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои (ГОСТ 17109-88).

Исследование сырья и готовой продукции, а также оценку результатов проводили с применением следующих методов: химический состав соевого зерна с помощью инфракрасного сканера FOSS NIRSystems 5000 (ГОСТ 32749-2014, ГОСТ 32041-2012); влажность соевого зерна – по ГОСТ 10856-96; проращивание зерна – по ГОСТ 12038-84; органолептический анализ напитков – по ГОСТ ISO 13299-2015, ГОСТ ISO 11036-2017 и ГОСТ Р ИСО 22935-2-2011; оценку качества напитков кисломолочных, обогащенных СБИ, – в соответствии требованиям ТР ТС 021/2011, ТР ТС 033/2013; пищевую ценность, в том

числе содержание витаминов и минеральных веществ, – расчетным методом (И. М. Скурихин, 1987); содержание ингибитора трипсина – казеинолитическим методом М. Л. Какейда в модификации И. И. Бенкена; массовую долю сахара – по ГОСТ 34128-2017; содержание влаги и сухого вещества – по ГОСТ 3626-73; титруемую кислотность – по ГОСТ 3624-92 и ГОСТ Р 58449-2019; активную кислотность – по ГОСТ 32892-2014; энергетическую ценность – с помощью коэффициентов энергетической ценности макронутриентов [20]; степень удовлетворения суточной потребности в веществах – согласно МР 2.3.1.24.32-08. Математическую обработку экспериментальных данных проводили в соответствии с теорией математической статистики по общепринятым методикам [21–23]. Микробиологический анализ сквашенных комбинированных напитков и напитков кисломолочных, обогащенных СБИ, проводили по ГОСТ 32901, ГОСТ 10444.11-2013 (ISO 15214:1998) и МР 2.3.1.0253-21.

Результаты и их обсуждение

В результате исследований, проведенных в лаборатории переработки сельскохозяйственной

Таблица 1. Физико-химические показатели и энергетическая ценность соевого зерна и соевого белкового ингредиента в 100 г ($M \pm \sigma$)

Table 1. Physicochemical indicators and energy value of soy raw material and soy protein ingredient in 100 g ($M \pm \sigma$)

Показатель	Содержание	
	Соевое зерно	Соевый белковый ингредиент
Вода, г	9,53 ± 1,33	9,90 ± 0,69
Белок, г	39,17 ± 2,87	38,07 ± 2,96
Жир, г	17,52 ± 1,42	16,6 ± 1,11
Клетчатка, г	5,75 ± 0,69	6,36 ± 0,30
Углеводы, г	23,38 ± 1,42	21,25 ± 1,51
Зола, г	4,65 ± 0,18	7,82 ± 0,45
Калий, мг	2640,00 ± 78,40	3115,20 ± 101,83
Фосфор, мг	430,00 ± 21,68	473,00 ± 25,80
Кальций, мг	600,00 ± 29,75	600,00 ± 27,57
Магний, мг	460,00 ± 16,73	462,30 ± 15,74
В ₁ (тиамин), мг	0,94 ± 0,03	0,88 ± 0,08
В ₂ (рибофлавин), мг	0,22 ± 0,03	0,23 ± 0,02
Холин, мг	270,00 ± 2,00	480,00 ± 19,60
Е (альфа-токоферол, ТЭ), мг	1,90 ± 0,03	3,30 ± 0,22
β-каротин, мг	1,02 ± 0,03	0,90 ± 0,03
Ингибитор трипсина, мг	11,50 ± 0,13	0
Энергетическая ценность, ккал	387,10	357,24

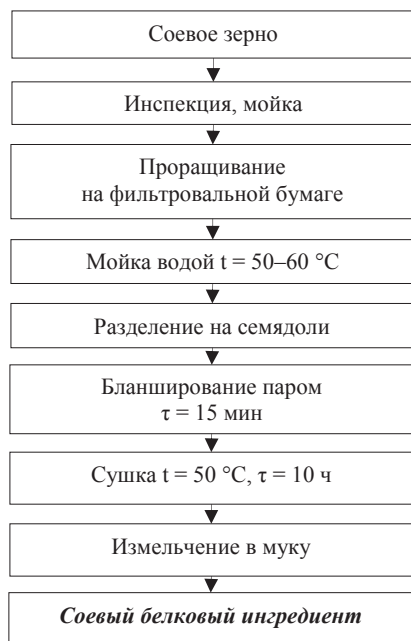


Рисунок 1. Технологическая схема получения соевого белкового ингредиента

Figure 1. Technological scheme for obtaining soy protein

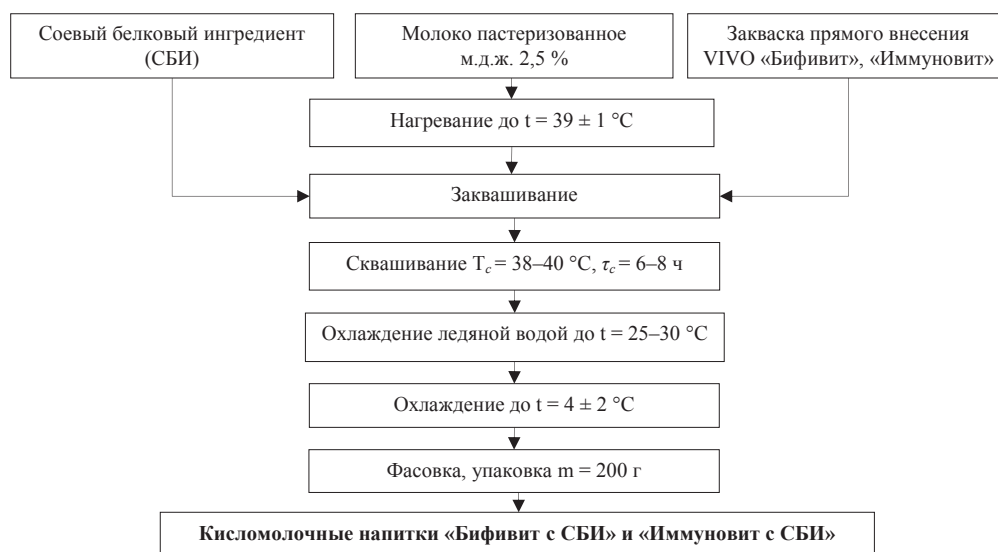


Рисунок 2. Технологическая схема получения кисломолочных напитков, обогащенных соевым белковым ингредиентом

Figure 2. Technological scheme of fermented milk drinks fortified with soy protein

продукции ФНЦ Всероссийского НИИ сои, разработана технология пищевой добавки – соевый белковый ингредиент (СБИ) (рис. 1). Эта добавка была получена на основе ранее разработанной технологии – белково-витаминно-минерального ингредиента (БВМИ), использованного для обогащения хлебобулочных изделий [24–26]. В настоящей разработке в технологический процесс введена дополнительная технологическая операция – бланширование. Она позволяет инактивировать антипитательные вещества и обеспечить безопасность использования пищевой добавки в приготовлении кисломолочных напитков. Также были скорректированы основные режимы получения СБИ.

Для получения пищевой добавки соевое зерно инспектировали, тщательно промывали питьевой водой, заворачивали во влажную фильтровальную бумагу и помещали в термостат для проращивания при температуре 26 °C и относительной влажности воздуха 85 % в течение 24 ч. Полученные образцы пророщенного соевого зерна тщательно промывали проточной водой температурой 50–60 °C и разделяли на семядоли. Затем бланшировали паром температурой 95–97 °C в течение 15 мин и закладывали на сушку в сушильный аппарат с конвекцией при температуре сушильного агента 50 °C до достижения влажности добавки не более 10 %. После чего измельчали на лабораторной мельнице до частиц размером 0,01–0,05 мм, получая пищевую добавку в виде муки. Показатели пищевой и энергетической ценности соевого зерна и СБИ, полученного из соевого зерна, представлены в таблице 1.

Соевый белковый ингредиент содержит белок, жир, пищевые волокна, минеральные вещества и витамины, а также не уступает по пищевой ценности соевому зерну. Усвояемость такого продукта повышается за счет преобразования химических веществ в процессе проращивания соевого зерна и удаления ингибитора трипсина из-за процесса бланширования.

В ходе работы приготовлены и исследованы образцы кисломолочных продуктов с массовой долей СБИ в рецептуре от 1 до 9 % с кратностью 1. Для получения кисломолочных напитков «Бифивит с СБИ» и «Иммуновит с СБИ» в молоко пастеризованное м.д.ж. 2,5 % и температурой 39 ± 1 °C вносили закваски прямого внесения «Бифивит» или «Иммуновит» в количестве 0,05 % и СБИ в количестве 1–9 % от общей массы. Тщательно перемешивали в течение 1–3 мин, ставили на сквашивание в термостат при температуре 38–40 °C в течение 6–8 ч. Полученный кисломолочный продукт охлаждали ледяной водой до температуры 25–30 °C, фасовали

Таблица 2. Факторы и уровни их варьирования

Table 2. Factors and variety levels

Обозначение	Фактор	
	$X_1(T_c), ^\circ\text{C}$	$X_2(\tau_c), \text{мин}$
Верхний уровень (+1)	40	480
Основной уровень (0)	39	420
Нижний уровень (–1)	38	360

Таблица 3. Органолептические показатели качества кисломолочных продуктов, обогащенных соевым белковым ингредиентом в количестве от 1 до 9 % от общей массы

Table 3. Sensory properties of fermented milk products fortified with 1–9% of soy protein

Показатель	Характеристика
Внешний вид	Поверхность ровная, гладкая, блестящая. С увеличением добавки усиливался желтый цвет верхнего тонкого слоя поверхности. Отделение сыворотки не наблюдалось во всех образцах
Консистенция	Сметанообразная, текучая. От консистенции жидкой до консистенции густой сметаны. В образцах с 7–9 % СБИ – тягучая
Запах	Кисломолочный. От легкого специфического до сильного специфического с привкусом и ощущением измельченных частиц СБИ
Вкус	Кисломолочный. От легкого соевого специфического до сильного соевого специфического
Цвет	От молочно-белого до сливочно-кремового

в полимерные стаканы с крышкой массой нетто 200 г и отправляли на хранение при температуре 4 ± 2 °С (рис. 2).

При разработке технологии кисломолочных напитков важными параметрами являются температура и продолжительность сквашивания продукта. Для изучения влияния данных параметров на показатель титруемой кислотности (K) проведены научные исследования. Технологические параметры – температура сквашивания в термостате X_1 (T_c), продолжительность сквашивания X_2 (τ_c) и уровни их варьирования – определены экспериментальным путем (табл. 2). Число повторностей $n = 9$.

При изучении параметров технологии производства кисломолочных напитков разработаны математические модели путем проведения двухфакторного анализа. Получены уравнения линейной регрессии, описывающие динамику изменения показателей кислотности напитков (K_6 , K_{II}), обогащенных СБИ, в зависимости от исследуемых факторов.

Для напитка «Бифивит с СБИ» уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$K_6 = -311,5 + 9,767 \cdot T_c + 0,08028 \cdot \tau_c \quad (1)$$

где K_6 – кислотность кисломолочного напитка

«Бифивит с СБИ» при коэффициенте множественной корреляции $R = 0,7804$.

Для напитка «Иммуновит с СБИ» уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$K_{II} = -305,8 + 9,600 \cdot T_c + 0,07722 \cdot \tau_c \quad (2)$$

где K_{II} – кислотность кисломолочного напитка «Иммуновит с СБИ» при коэффициенте множественной корреляции $R = 0,7645$.

Из анализа уравнений (1) и (2) следует, что при получении кисломолочных напитков, обогащенных СБИ, фактор X_1 (температура сквашивания) оказывает большее влияние на показатель кислотности напитков, чем фактор X_2 (продолжительность сквашивания). Это подтверждают значения β -коэффициентов: для напитка «Бифивит с СБИ» $\beta_1 = X_1 = 0,820$, $\beta_2 = X_2 = 0,404$; для напитка «Иммуновит с СБИ» $\beta_1 = X_1 = 0,817$, $\beta_2 = X_2 = 0,394$.

После получения образцов кисломолочных напитков провели их органолептическую оценку (табл. 3). Все показатели определяли в тщательно перемешанном продукте. Определение внешнего вида – до и после перемешивания продукта.

Образцы с содержанием 1–5 % СБИ отличались лучшими показателями качества. Поверхность всех

Таблица 4. Балльная оценка органолептических показателей качества опытных образцов разработанных кисломолочных напитков

Table 4. Sensory evaluation of fermented milk drinks

Показатель	Содержание СБИ, %								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Оценка, балл								
Внешний вид	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9	4,9	4,6	4,5	4,5
Консистенция	4,5	4,6	4,8	4,8	4,9	4,8	4,6	4,6	4,5
Запах	5,0	5,0	4,9	4,9	4,9	4,7	4,5	4,5	4,4
Вкус	5,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,8	4,5	4,4	4,1
Цвет	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Общее количество баллов	24,5	24,5	24,6	24,6	24,6	24,2	23,2	23,0	22,6

Таблица 5. Кислотность кисломолочных напитков
в зависимости от содержания соевого белкового ингредиента в продукте ($M \pm \Delta$)

Table 5. Effect of soy protein on acidity ($M \pm \Delta$)

Концентрация СБИ, %	«Бифивит с СБИ»		«Иммуновит с СБИ»	
	Кислотность титруемая, °Т	Кислотность активная (рН)	Кислотность титруемая, °Т	Кислотность активная (рН)
Контроль	93,50 ± 0,92	4,42 ± 0,01	94,00 ± 0,53	4,42 ± 0,01
1	99,50 ± 0,92	4,46 ± 0,02	95,50 ± 0,92	4,43 ± 0,02
2	100,00 ± 0,92	4,52 ± 0,01	96,50 ± 0,92	4,45 ± 0,01
3	109,50 ± 0,92	4,50 ± 0,02	96,50 ± 0,89	4,65 ± 0,02
4	111,00 ± 1,06	4,47 ± 0,02	104,50 ± 0,92	4,50 ± 0,02
5	112,00 ± 1,06	4,55 ± 0,01	110,50 ± 0,92	4,50 ± 0,01
6	113,50 ± 0,92	4,60 ± 0,02	111,00 ± 0,53	4,55 ± 0,01
7	115,00 ± 0,53	4,59 ± 0,01	113,50 ± 0,92	4,56 ± 0,02
8	116,00 ± 0,53	4,66 ± 0,02	114,50 ± 0,92	4,57 ± 0,02
9	116,00 ± 0,92	4,64 ± 0,01	114,50 ± 0,92	4,66 ± 0,01

образцов до перемешивания без трещин от светлого до желтого цвета. В опытных образцах продуктов с содержанием 6–9 % СБИ был отмечен усиленный привкус и запах внесенной добавки. Образцы напитков с содержанием 7–9 % СБИ были излишне густыми, что ухудшало их восприятие и отрицательно сказывалось на органолептической оценке (табл. 4).

Установлено, что по органолептическим показателям полученные кисломолочные напитки «Бифивит с СБИ» и «Иммуновит с СБИ» практически не отличаются друг от друга, поэтому балльную оценку проводили параллельно. Внешний вид поверхности был привлекательный у всех образцов. Однако у образцов с 7–9 % СБИ на поверхности наблюдалась неравномерная пленка желтого цвета, вследствие чего оценка была снижена до 4,6 и 4,5 баллов.

По вкусу и цвету наилучшими признаны образцы с 1–3 % СБИ. Образцы с 3–5 % СБИ практически не отличались друг от друга по качеству, а с 7–9 % уступали, т. к. имели неприятный привкус и ощущение частиц добавки во рту. По консистенции густой сметаны предпочтение было отдано опытным образцам с 3–6 % СБИ, образцы с 1 и 2 % добавки имели более жидкую консистенцию.

На основании органолептической оценки опытных образцов кисломолочных напитков оптимальное содержание СБИ составило 3–5 %. Однако у образцов с содержанием СБИ в количестве 5 % пищевая ценность продукта выше, чем у образцов с 3 и 4 % СБИ. Поэтому оптимальное содержание СБИ принято 5 %.

На следующем этапе исследований изучали влияние СБИ на кислотообразующую способность продуктов. Контролем послужили образцы, приготовленные без внесения СБИ. Кислотность определяли в образцах, полученных при максимальной температуре сквашивания 40 °С и минимальной продолжительности 6 ч (табл. 5).

Результаты исследований показали, что введение СБИ в напитки стимулирует кислотообразующую способность напитков, т. к. титруемая кислотность увеличилась на 24 % по сравнению с контролем. Активная кислотность практически не изменялась. Полученные показатели соответствовали требованиям ГОСТ Р 54569 и ГОСТ 32892-2014.

Корреляционную зависимость показателя титруемой кислотности (K_6 , $K_{\text{и}}$) и активной кислотности кисломолочных напитков (AK_6 , $AK_{\text{и}}$) от массовой доли СБИ ($C_{\text{СБИ}}$) в них можно описать уравнениями:

Для напитка «Бифивит с СБИ»:
титруемая кислотность $K_6 = 2,4606 \cdot C_{\text{СБИ}} + 97,5273$;

$$R = 0,93 \quad (3)$$

активная кислотность $AK_6 = 0,0249 \cdot C_{\text{СБИ}} + 4,4289$;

$$R = 0,94 \quad (4)$$

Для напитка «Иммуновит с СБИ»:
титруемая кислотность $K_{\text{и}} = 2,7394 \cdot C_{\text{СБИ}} + 92,7727$;

$$R = 0,96 \quad (5)$$

активная кислотность $AK_{\text{и}} = 0,0205 \cdot C_{\text{СБИ}} + 4,4370$;

$$R = 0,74 \quad (6)$$

Из анализа уравнений (3)–(6) следует, что титруемая и активная кислотности прямо пропорциональны массовой доле СБИ в напитках (положительная корреляция), т. е. чем больше массовая доля внесенной добавки, тем больше титруемая и активная кислотность кисломолочного напитка.

После разработки рецептур и технологии получения кисломолочных продуктов была проведена оценка их пищевой ценности в сравнении с контролем

Таблица 6. Сравнительная оценка пищевой ценности напитков «Бифивит» и «Бифивит с СБИ»

Table 6. Nutritional value of control Bifivit sample vs. Bifivit with soy

Показатель	«Бифивит» (контроль)		«Бифивит с СБИ» (опытный образец)		Суточная физиологическая потребность*
	Содержание, г/100 г	Удовлетворение суточной потребности, % (200 г)	Содержание, г/100 г	Удовлетворение суточной потребности, % (200 г)	
Белки, г	2,8	4,91–9,32	4,72	8,28–15,73	60–114
Жир, г	2,5	3,94–8,77	3,27	5,15–11,47	57–127
Углеводы, г	4,1	1,49–3,44	5,11	1,85–4,29	238–551
Пищевые волокна, г	0	0	0,44	3,2	20
Органические кислоты, г	0,1	–	0,1	–	–
Витамин Е, мг	0,10	1,34	0,26	3,46	15
Витамин В ₁ , мг	0,24	32	0,27	36	1,5
Витамин В ₂ , мг	0,20	22,2	0,20	22,2	1,8
Холин, мг	3,70	1,48	27,52	11	500
Бета-каротин, мг	0,01	0,4	0,06	2,4	5
Витамин С, мг	0,70	1,4	0,67	1,34	100
Зола, г	0,70	–	1,06	–	–
Калий, мг	129	7,37	278	15,89	3500
Фосфор, мг	94	26,86	113	32,29	700
Кальций, мг	108	21,6	133	26,60	1000
Магний, мг	16	7,62	38	18,10	420
Энергетическая ценность, ккал	50,1	–	72,8	–	–

* для взрослых по белку и жиру – от минимального показателя для женщин до максимального показателя для мужчин; по кальцию – для взрослых до 60 лет.

* protein and fat – for adults from the minimum for women to the maximum for men; calcium – for adults under 60 y.o.

и определена степень удовлетворения суточной потребности в основных веществах при употреблении 200 г продукта в сутки (табл. 6, 7).

Согласно анализу химического состава и пищевой ценности напитков «Бифивит с СБИ» и «Иммуновит с СБИ» установлено, что они содержат ценные компоненты пищи и превышают исследуемые показатели в контрольных образцах: по белку – на 1,92 и 1,79 г, жиру – на 0,77 и 0,75 г, витамину Е – на 0,16 мг, холину – на 23,82 мг, калию – на 149 мг, фосфору – на 19 и 22 мг, кальцию – на 25 и 24 мг, магнию – на 22 и 23 мг соответственно.

При включении в напитки СБИ возрастает степень удовлетворения суточной потребности в данных веществах относительно контрольных образцов. В одной порции разработанных напитков (200 г) содержание белка, витаминов В₁ и В₂, калия, фосфора, кальция и магния составляет более 15 % от суточной физиологической потребности организма человека. Это, в соответствии с ГОСТ Р 52349-2005, позволяет отнести разработанные напитки к натуральным функциональным пищевым продуктам.

В ходе исследований определены физико-химические показатели контрольных и разработанных

образцов напитков «Бифивит с СБИ» и «Иммуновит с СБИ» (табл. 8).

Согласно полученным данным физико-химические показатели разработанных кисломолочных напитков зависят от рецептуры продукта. Наименьший показатель титруемой кислотности (39,5 °Т) и наибольший показатель содержания влаги (89,8 %) установлен в контрольных образцах. Содержание общего сахара в большом количестве (до 5,3 %) обнаружено в образцах с добавлением СБИ соответствующих наименований. Исследованные физико-химические показатели находятся в пределах установленных норм (ГОСТ 33491-2015).

В ходе исследований проведена оценка разработанных кисломолочных напитков по микробиологическим показателям (табл. 9).

Согласно СанПиН 2.3.2.1324-03 кисломолочные напитки хранятся без герметичной упаковки не более 72 ч при температуре 4 ± 2 °С и относительной влажности воздуха не более 75 %. Контроль качества обогащенных кисломолочных продуктов осуществляли в соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции». Согласно ему микробиологические показатели

Таблица 7. Сравнительная оценка пищевой ценности напитков «Иммуновит» и «Иммуновит с СБИ»

Table 7. Nutritional value of control Immunovit sample vs. Immunovit with soy

Показатель	«Иммуновит» (контроль)		«Иммуновит с СБИ» (опытный образец)		Суточная физиологическая потребность*
	Содержание, г/100 г	Удовлетворение суточной потребности, % (200 г)	Содержание, г/100 г	Удовлетворение суточной потребности, % (200 г)	
Белки, г	3,20	5,61–10,67	4,99	8,75–16,63	60–114
Жир, г	2,50	3,94–8,77	3,25	5,12–11,40	57–127
Углеводы, г	4,49	1,63–3,77	5,33	1,93–4,48	238–551
Пищевые волокна, г	0	0	0,32	3,2	20
Органические кислоты, г	0,10	–	0,10	–	–
Витамин Е, мг	0,10	1,33	0,260	3,47	15
Витамин В ₁ , мг	0,019	2,53	0,062	8,27	1,5
Витамин В ₂ , мг	0,124	13,78	0,149	16,56	1,8
Холин, мг	3,64	1,46	27,46	10,98	500
Бета-каротин, мг	0,008	0,32	0,053	2,12	5
Витамин С, мг	0,34	0,68	0,32	0,64	100
Зола, г	0,7	–	1,05	–	–
Калий, мг	139	7,94	288	16,46	3500
Фосфор, мг	87	24,86	106	30,29	700
Кальций, мг	115	23,00	139	27,80	1000
Магний, мг	13	6,19	36	17,14	420
Энергетическая ценность, ккал	53,26	–	70,53	–	–

* Согласно МР 2.3.1.0253-21 для взрослых по белку и жиру – от минимального показателя для женщин до максимального показателя для мужчин; по кальцию – для взрослых до 60 лет.

* protein and fat – for adults from the minimum for women to the maximum for men; calcium – for adults under 60 y.o.

Таблица 8. Физико-химические показатели контрольных и разработанных образцов напитков (М ± σ)

Table 8. Physicochemical indicators of control and experimental samples (M ± σ)

Показатель	Массовая доля, %		Кислотность	
	Влаги	Общего сахара	Титруемая, °Т	Активная (pH)
Бифивит (контроль)	89,80 ± 0,37	4,10 ± 0,18	93,50 ± 0,92	4,42 ± 0,02
Бифивит с 5 % СБИ	85,30 ± 0,55	5,10 ± 0,11	112,00 ± 1,06	4,55 ± 0,01
Иммуновит (контроль)	89,01 ± 0,37	4,50 ± 0,11	94,00 ± 0,53	4,42 ± 0,01
Иммуновит с 5 % СБИ	84,96 ± 0,37	5,30 ± 0,11	110,50 ± 0,92	4,50 ± 0,01

Таблица 9. Микробиологические показатели кисломолочных напитков, обогащенных соевым белковым ингредиентом

Table 9. Microbiological indicators of fermented milk drinks fortified with soy protein

Показатель	Объем (масса) продукта, в котором не допускаются	Результат определения	
		«Бифивит (Иммуновит), с СБИ», свежий	«Бифивит (Иммуновит) с СБИ», на конец срока годности
Бактерии группы кишечных палочек (колиформы)	0,1	не обнаружено	не обнаружено
Патогенные в том числе сальмонеллы	25	не обнаружено	не обнаружено
Стафилококки <i>Staphylococcus aureus</i>	1	не обнаружено	не обнаружено
КМАФАнМ, КОЕ/см ³ ·г: молочнокислые микроорганизмы	Норма согласно ТР ТС 033/2013 не менее 1×10 ⁷	1×10 ⁸	1×10 ⁸
Бифидобактерии	не менее 1×10 ⁶	1×10 ⁸	1×10 ⁸

разработанных кисломолочных напитков не превышали допустимых уровней. Причем содержание молочнокислых микроорганизмов и бифидобактерий в свежих продуктах и в конце срока годности оставалось выше нормы (1×10^8), что положительно характеризует разработанные напитки.

По теме исследований разработана техническая документация для промышленного производства пищевых продуктов: СТО 00668442-002-2020 «Соевый белковый ингредиент. Пищевая добавка»; СТО 00668442-003-2020 «Напитки кисломолочные, обогащенные соевым белковым ингредиентом. Технические условия». На разработанные кисломолочные напитки подготовлена заявка на изобретение РФ.

Выводы

На основании проведенных исследований разработана и научно обоснована технология производства кисломолочных напитков «Бифивит с СБИ» и «Иммуновит с СБИ», обогащенных соевым ингредиентом в количестве 5 % от общей массы. Установлено, что использование СБИ обогащает напитки, по сравнению с контролем, белком на 1,92 и 1,79 г, жиром – на 0,77 и 0,75 г, витамином Е – на 0,16 мг, холином – на 23,82 мг, калием – на 149 мг, фосфором – на 19 и 22 мг, кальцием – на 25 и 24 мг, магнием – на 22 и 23 мг соответственно. Также использование СБИ позволяет улучшить их органолептические свойства, в частности консистенцию.

Критерии авторства

Е. С. Стаценко – анализ данных литературы по проблеме, разработка дизайна исследования, получение экспериментальных данных, разработка технологии получения кисломолочных напитков, исследование показателей их качества, анализ полученных результатов, формулирование выводов,

работа над рукописью – написание глав «введение», «объекты и методы исследования», «результаты и их обсуждение», «выводы», «список литературы». О. В. Литвиненко – участие в проведении опытов, разработка технологии получения кисломолочных напитков, исследование показателей кислотности напитков, участие в подготовке главы «объекты и методы исследования». О. В. Покотило и Н. Ю. Корнева – участие в проведении опытов, исследование показателей кислотности и влажности кисломолочных напитков, работа с литературой. Г. А. Кодирова и Г. В. Кубанкова – участие в проведении опытов, исследование показателей качества кисломолочных напитков, математическая обработка данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

E.S. Statsenko performed the reference data analysis, developed the research design, obtained experimental data, developed the technology, studied the quality indicators, analyzed the results obtained, and formulated the conclusions, as well as wrote the Introduction, Objects and Methods, Results and Discussions, Conclusions, and References. O.V. Litvinenko participated in the experiments, developed the technology, performed the acidity analysis, and wrote the Objects and Methods. O.V. Pokotilo and N.Yu. Korneva participated in the experiments, studied the acidity and humidity indicators, and worked with the references. G.A. Kodirova and G.V. Kubankova participated in the experiments, studied the quality indicators, and processed the data.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Перспективные направления производства кисломолочных продуктов, в частности йогуртов / М. А. Попова [и др.] // Молодой ученый. 2014. Т. 68. № 9. С. 196–199.
2. Перспективные технологии производства молочных продуктов. URL: <https://agrovesti.net/lib/tech/cattle-tech/razdel-7-perspektivnye-tehnologii-2.html> (дата обращения: 28.01.2021).
3. Бельмер С. В. Кисломолочные продукты: от истории к современности // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2019. Т. 64. № 6. С. 119–125. <https://doi.org/10.21508/1027-4065-2019-64-6-119-125>.
4. Синявский Ю. А., Крайсман В. А., Жулдуз М. С. Использование специализированного кисломолочного продукта на основе бобов сои в кардиологической практике // Вопросы питания. 2013. Т. 82. № 5. С. 51–57.
5. Молдобаева Д. С., Пономарёва Е. В. Исследования швейцарских ученых о пользе молока и молочных продуктов // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2016. Т. 7. № 4.
6. Производство кисломолочных напитков с растительными компонентами / Л. В. Голубева [и др.] // Пищевая промышленность. 2017. № 2. С. 47–49.

7. Разработка и исследования пищевой и биологической ценности и потребительских свойств кисломолочного продукта с мукой, не содержащего глютен / О. Б. Федотова [и др.] // Вопросы питания. 2019. Т. 88. № 2. С. 101–110. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10023>.
8. Пищевая ценность национальных молочных продуктов с добавлением лесных ягод и дикорастущих пищевых растений Якутии / У. М. Лебедева [и др.] // Вопросы питания. 2015. Т. 84. № 6. С. 132–140.
9. Бекбулатова Е. В., Хошимов Х., Мирзахмедов А. М. Производство кисломолочных напитков с крупяными концентратами // *Universum: технические науки*. 2019. Т. 59. № 2. С. 32–36.
10. Функциональные молочные продукты, обогащенные нетрадиционными растительными компонентами / А. А. Кузнецова [и др.] // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. Т. 48. № 6–2. С. 72–74. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.175>.
11. Швандар Д. В., Фролова Е. М., Бурова Т. Ф. Перспективы стабилизации российского рынка молока // *Финансовая аналитика: проблемы и решения*. 2017. Т. 10. № 12. С. 1362–1379. <https://doi.org/10.24891/fa.10.12.1362>.
12. Столярова Ю. В. Развитие рынка молока и молочной продукции в условиях импортозамещения // *Региональная экономика: теория и практика*. 2017. Т. 15. № 4. С. 717–728. <https://doi.org/10.24891/re.15.4.717>.
13. Toward a “Green Revolution” for soybean / S. Liu [et al.] // *Molecular Plant*. 2020. Vol. 13. № 5. P. 688–697. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.03.002>.
14. Soy preparations are potentially dangerous factors in the course of a food allergy / A. Jedrusek-Golinska [et al.] // *Foods*. 2019. Vol. 8. № 12. <https://doi.org/10.3390/foods8120655>.
15. Rizzo G., Baroni L. Soy, soy foods and their role in vegetarian diets // *Nutrients*. 2018. Vol. 10. № 1. <https://doi.org/10.3390/nu10010043>.
16. Messina M. Impact of soy foods on the development of breast cancer and the prognosis of breast cancer patients // *Forsch Komplementmed*. 2016. Vol. 23. № 2. P. 75–80. <https://doi.org/10.1159/000444735>.
17. Messina M. Soy and health update: Evaluation of the clinical and epidemiologic literature // *Nutrients*. 2016. Vol. 8. № 12. <https://doi.org/10.3390/nu8120754>.
18. Regulation of cholesterol metabolism by bioactive components of soy proteins: Novel translational evidence / G. R. Caponio [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22. № 1. <https://doi.org/10.3390/ijms22010227>.
19. Biochemistry and use of soybean isoflavones in functional food development / C. Hu [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. Vol. 60. № 12. P. 2098–2112. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1630598>.
20. Нечаев А. П., Траубенберг С. Е., Кочеткова А. А. *Пищевая химия*. СПб.: ГИОРД. 2003. 640 с.
21. Математическое моделирование процесса непрерывной ферментации при получении молочной кислоты / Ю. Л. Гордеева [и др.] // *Теоретические основы химической технологии*. 2019. Т. 53. № 4. С. 402–409. <https://doi.org/10.1134/S0040357119040031>.
22. Modeling and optimization techniques with applications in food processes, bio-processes and bio-systems / E. Balsa-Canto [et al.] // *Numerical simulation in physics and engineering. Lecture notes of the XVI ‘Jacques-Louis Lions’ Spanish-French School / editors I. Higuera, T. Roldán, J. J. Torrens*. Cham: Springer, 2016. P. 187–216. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32146-2_4.
23. Gómez-Salazar J. A., Clemente-Polo G., Sanjuán-Pellicer N. Review of mathematical models to describe the food salting process // *DYNA*. 2015. Vol. 82. № 190. P. 23–30. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.42016>.
24. Стаценко Е. С. Разработка технологии пищевой добавки на основе соевого сырья биотехнологической модификации // *Техника и технология пищевых производств*. 2019. Т. 49. № 3. С. 367–374. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-367-374>.
25. Стаценко Е. С., Литвиненко О. В., Корнева Н. Ю. Разработка технологии производства обогащенного хлебобулочного изделия // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 8. С. 111–114. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10820>.
26. Способ получения обогащенных хлебобулочных изделий: пат. 2725490С1 Рос. Федерация. № 2019135581 / Стаценко Е. С. [и др.]; заявл. 05.11.2019; опубл. 02.17.2020; Бюл. № 19. 12 с.

References

1. Popova MA, Rebezov MB, Akhmed'yarova RA, Kosolapova AS, Paul's EA. Perspektivnye napravleniya proizvodstva kislomolochnykh produktov, v chastnosti yogurtov [Promising directions for the production of fermented milk products, such as yoghurts]. *Young Scientist*. 2014;68(9):196–199. (In Russ.).
2. Perspektivnye tekhnologii proizvodstva molochnykh produktov [Advanced technologies of dairy production] [Internet]. [cited 2021 Jan 28]. Available from: <https://agrovesti.net/lib/tech/cattle-tech/razdel-7-perspektivnye-tekhnologii-2.html>.
3. Belmer SV. Fermented milk products: from history to the present. *Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2019;64(6):119–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.21508/1027-4065-2019-64-6-119-125>.

4. Sinyavsky YuA, Kraysman VA, Suleymenova ZhM. Using of a specialized fermented milk product on the basis of soybeans in cardiology practice. *Problems of Nutrition*. 2013;82(5):51–57. (In Russ.).
5. Moldobaeva DS, Ponomareva EV. Swiss scientists' research in the health benefit of milk and dairy products. *Research and Scientific Electronic Journal of Omsk SAU*. 2016;7(4). (In Russ.).
6. Golubeva LV, Dolmatova OI, Grebenshikov AV, Kiryushina IS, Rodionova EA. Fermented beverages with herbal ingredients. *Food Industry*. 2017;(2):47–49. (In Russ.).
7. Fedotova OB, Makarkin DV, Sokolova OV, Dunchenko NI. The development and investigation of nutritive and biological value and consumer properties of the fermented dairy product with flour free from glute. *Problems of Nutrition*. 2019;88(2):101–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10023>.
8. Lebedeva UM, Abramov AF, Stepanov KM, Vasilyeva VT, Efimova AA. Nutrition value of national milk products with the addition of wild berries and wild food plants of Yakutia. *Problems of Nutrition*. 2015;84(6):132–140. (In Russ.).
9. Bekbulatova EV, Hoshimov H, Mirzahmedov AM. Production of acid-milk drinks with large concentrates. *Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Engineering Sciences]*. 2019;59(2):32–36. (In Russ.).
10. Kuznetsova AA, Ismailova AI, Klyuchnikova DB, Tarasova AV. Functional dairy products, enriched with non-traditional botanicals. *International Research Journal*. 2016;48(6–2):72–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.175>.
11. Shvandar DV, Frolova EM, Burova TF. The prospects of stabilization of the Russian milk market. *Financial Analytics: Science and Experience*. 2017;10(12):1362–1379. (In Russ.). <https://doi.org/10.24891/fa.10.12.1362>.
12. Stolyarova YuV. The development of the milk and dairy product market in terms of import substitution. *Regional Economics: Theory and Practice*. 2017;15(4):717–728. (In Russ.). <https://doi.org/10.24891/re.15.4.717>.
13. Liu S, Zhang M, Feng F, Tian Z. Toward a “Green Revolution” for soybean. *Molekular Plant*. 2020;13(5):688–697. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.03.002>.
14. Jedrusek-Golinska A, Piasecka-Kwiatkowska D, Zielinska P, Zielinska-Dawidziak M, Szymandera-Buszka K, Hes M. Soy preparations are potentially dangerous factors in the course of a food allergy. *Foods*. 2019;8(12). <https://doi.org/10.3390/foods8120655>.
15. Rizzo G, Baroni L. Soy, soy foods and their role in vegetarian diets. *Nutrients*. 2018;10(1). <https://doi.org/10.3390/nu10010043>.
16. Messina M. Impact of soy foods on the development of breast cancer and the prognosis of breast cancer patients. *Forsch Komplementmed*. 2016;23(2):75–80. <https://doi.org/10.1159/000444735>.
17. Messina M. Soy and health update: Evaluation of the clinical and epidemiologic literature. *Nutrients*. 2016;8(12). <https://doi.org/10.3390/nu8120754>.
18. Caponio GR, Wang DQ-H, Di Ciaula A, De Angelis M, Portincasa P. Regulation of cholesterol metabolism by bioactive components of soy proteins: Novel translational evidence. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(1). <https://doi.org/10.3390/ijms22010227>.
19. Hu C, Wong W-T, Wu R, Lai W-F. Biochemistry and use of soybean isoflavones in functional food development. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020;60(12):2098–2112. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1630598>.
20. Nechaev AP, Traubenberg SE, Kochetkova AA. *Pishchevaya khimiya [Food chemistry]*. St. Petersburg: GIOR; 2003. 640 p. (In Russ.).
21. Gordeeva YuL, Borodkin AG, Gordeeva EL, Rudakovskaya EG. Mathematical modeling of continuous fermentation in lactic acid production. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2019;53(4):402–409. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040357119040031>.
22. Balsa-Canto E, Alonso AA, Arias-Méndez A, García MR, López-Núñez A, Mosquera-Fernández M, et al. Modeling and optimization techniques with applications in food processes, bio-processes and bio-systems. In: Higuera I, Roldán T, Torrens JJ, editors. *Numerical simulation in physics and engineering. Lecture notes of the XVI 'Jacques-Louis Lions' Spanish-French School*. Cham: Springer; 2016. pp. 187–216. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32146-2_4.
23. Gómez-Salazar JA, Clemente-Polo G, Sanjuán-Pelliccer N. Review of mathematical models to describe the food salting process. *DYNA*. 2015;82(190):23–30. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.42016>.
24. Statsenko ES. Technology for a new food additive based on biotechnologically modified soybean raw materials. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(3):367–374. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-367-374>.
25. Statsenko ES, Litvinenko OV, Korneva NYu. Development of technology for the production of an enriched bakery product. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2020;34(8):111–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10820>.
26. Statsenko ES, Litvinenko OV, Korneva NYu, Pokotilo OV. Method for production of enriched bakery products. Russia patent RU 2725490C1. 2020.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-795-804>Оригинальная статья
<http://fppt.ru>

Микробиологическая оценка процесса проращивания зерна пшеницы и гречихи

**М. А. Зенькова***, **Л. А. Мельникова**Белорусский государственный экономический университет^{ROR}, Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию: 31.08.2021

Принята после рецензирования: 09.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: mariya_lz@mail.ru

© М. А. Зенькова, Л. А. Мельникова, 2021

Аннотация.

Введение. Оценка потенциальных рисков возникновения пищевых отравлений при употреблении пророщенного зерна является актуальной, т. к. условия проращивания могут способствовать росту микроорганизмов, которые присутствуют на поверхности зерна, в том числе болезнетворных. Целью исследования является изучение влияния противомикробных средств и условий проращивания на микрофлору зерна пшеницы и гречихи.

Объекты и методы исследования. Действие противомикробных средств и условий проращивания зерна на контаминацию конечного продукта изучалось в процессе проращивания при температурах от 10 до 30 °С в течение 90 ч при орошении зерна дистиллированной водой, раствором перманганата калия (KMnO₄), настоем календулы и настоем чистотела. КМАФАнМ, количество плесеней и дрожжей определяли стандартными методами. Качественный анализ микрофлоры пророщенного зерна проводили по морфологическим и культуральным характеристикам.

Результаты и их обсуждения. Развитие микрофлоры в процессе проращивания зерна пшеницы и гречихи можно контролировать путем выбора соответствующих условий процесса и способов обработки зерна. Использование для проращивания настоев лекарственных трав позволило снизить общую микробную обсемененность зерна в процессе проращивания на 52–68 %; обработка зерен пшеницы и гречихи настоем календулы снизила их контаминацию плесневыми грибами на 47–51 %, дрожжами – на 100 %. Рассчитано общее микробное число, количество колоний плесеней и дрожжей, находящихся в сухом пророщенном зерне. Установлена оптимальная температура проращивания пшеницы и гречихи (20 ± 2 °С) в настой лекарственных трав, позволяющая минимизировать микрофлору пророщенного зерна и сократить продолжительность проращивания до 46 ч.

Выводы. Для снижения микробиологического загрязнения пророщенного зерна можно использовать настой календулы, а также учитывать начальную обсемененность продукта для расчета режима тепловой обработки при проектировании продуктов длительного хранения.

Ключевые слова. Зерно, микрофлора, плесневые грибы, дрожжи, проращивание, календула, чистотел

Для цитирования: Зенькова М. Л., Мельникова Л. А. Микробиологическая оценка процесса проращивания зерна пшеницы и гречихи // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 795–804. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-795-804>.

Original article

Available online at <http://fppt.ru/eng>

Microbiological Assessment of Wheat and Buckwheat Sprouting Process

Mariya L. Zenkova*, **Ludmila A. Melnikova**Belarus State Economic University^{ROR}, Minsk, Republic of Belarus

Received: August 31, 2021

Accepted in revised form: November 09, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021

*e-mail: mariya_lz@mail.ru

© M.L. Zenkova, L.A. Melnikova, 2021

Abstract.

Introduction. Sprouted grain can cause food poisoning, since inappropriate conditions can promote the growth of pathogenic

microorganisms on the grain surface. As a result, products of long-term storage use thermally-treated sprouted grain, the parameters of which depend on the initial bacteria content. There are different ways to reduce bacterial contamination of sprouted grain, each of which has its own advantages and disadvantages. Natural substances with antimicrobial properties, such as medicinal herbs, can serve as decontaminators. However, no scientific research has been performed so far to determine the exact temperature of grain sprouting to minimize its microbiological contamination. The research objective was to investigate the effect of antimicrobial agents and sprouting conditions on the microflora of wheat and buckwheat grain.

Study objects and methods. The study featured wheat grain and green buckwheat grain. A set of experiments was performed to define the effect of antimicrobial agents and sprouting conditions on the quantity of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms (QMAFAnM), molds, and yeasts. During sprouting at 10–30°C for 90 h, the grain was irrigated with distilled water, potassium permanganate solution (KMnO₄), calendula infusion, and celandine infusion. QMAFAnM and the count of molds and yeasts were determined by standard methods; the qualitative analysis of the microflora was based on their morphological and cultural characteristics.

Results and discussion. Microflora development during sprouting of wheat and buckwheat grains was controlled by selecting appropriate conditions and grain treatment methods. The herbal infusions for sprouting reduced the total microbial in-semination of grain during sprouting by 52–68%; the calendula infusion reduced the contamination with molds by 47–51%, yeasts – by 100%.

Conclusion. The research revealed the total microbial count and the count of mold and yeast colonies in dry sprouted grain. The optimal temperature of sprouting wheat and buckwheat was $20 \pm 2^\circ\text{C}$ in the infusion of medicinal herbs: it minimized the microflora of sprouted grain and reduced the sprouting time to 46 h. Calendula infusion could be recommended for commercial use in order to reduce the microbiological contamination of sprouted grain. The initial microbial population of the product was found to affect the mode of heat treatment in long-term storage products.

Keywords. Grain, microflora, molds, yeast, sprouting, calendula, celandine

For citation: Zenkova ML, Melnikova LA. Microbiological Assessment of Wheat and Buckwheat Sprouting Process. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):795–804. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-795-804>.

Введение

Новым направлением в пищевой промышленности является производство консервов из пророщенного зерна злаковых культур и гречихи методом тепловой обработки. Такой метод обеспечивает безопасность готовых продуктов и позволяет расширить область использования зерновых продуктов, в том числе в сочетании с фруктами и овощами. Возникающий интерес потребителей к пророщенным зернам злаковых культур связан с повышением пищевой ценности, улучшением вкусовых свойств зерна и снижением риска возникновения хронических заболеваний при их употреблении. Учеными проводятся исследования по влиянию процесса проращивания на безопасность пророщенного зерна, пищевую ценность, содержание функциональных ингредиентов, а также на здоровье человека при его систематическом употреблении [1]. Зерновые культуры и гречиха содержат сложную микрофлору, которая активно развивается во время проращивания. Поэтому актуальным является проведение исследований по изучению влияния условий проращивания на изменение микрофлоры как фактора безопасности пищевых продуктов из пророщенного зерна. Учеными разных стран подробно изучено влияние микробной активности на аспекты микробиологической безопасности и качества зерна [2–5]. Микрофлора зерна сосредоточена во внешних слоях зерна и внутри зародыша [6, 7]. Разнообразные микробные колонии существуют

на зерне, включая бактерии, дрожжи и плесневые грибы. Процесс замачивания является важным этапом с точки зрения безопасности, поскольку вызывает размножение микроорганизмов, которое продолжается при проращивании зерна. Бактерии и дрожжи быстро растут, развивается плесневая мицелий и в это же время активируются споры. Жизнеспособное количество бактерий и дрожжей достигает максимального количества во время проращивания [2, 8, 9]. Некоторые из микроорганизмов, присутствующие в зерновых культурах, представляют собой потенциальную опасность, особенно плесени видов *Fusarium*. Это связано с продуцированием токсичных для человека микотоксинов [7, 10, 11].

Учеными проводятся эксперименты по снижению уровня микробиологического загрязнения в процессах замачивания и проращивания зерна с 10^5 – 10^7 до 10^2 – 10^4 КОЕ/г, т. к. продукты с таким количеством мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (далее КМАФАнМ) считаются безопасными для употребления в пищу человеком [6, 12–14]. Основным аспектом снижения микробиологической обсемененности пророщенного зерна является способ его обработки. Для снижения микрофлоры зерна перед проращиванием проводится гамма-облучение и химическая обработка злаковых культур [2, 15]. Для ограничения роста микроорганизмов поверхность зерна обрабатывается во время первого этапа замачивания или последнего

этапа проращивания растворами неорганических кислот, такими как серная, фосфорная или хлорноватистая [2, 15]. Кроме того, микробная активность во время проращивания может быть ограничена контролем температуры проращивания, т. к. относительно высокая температура проращивания (25 °С и выше) приводит к увеличению КМАФАнМ по сравнению с проращиванием при 15 °С [2, 16]. Из микробиологических параметров при разработке режима тепловой обработки учитывается видовой состав микрофлоры консервируемого продукта и исходная обсемененность продукта микроорганизмами. Так, при повышении температуры замачивания и проращивания количество микроорганизмов в проращиваемом зерне увеличивается. Однако температура, при которой рекомендуется проращивать зерно с целью уменьшения продолжительности проращивания и минимизации микробиологической обсемененности, не установлена. Очевидно, что температурная обработка, в том числе бланширование, может снизить количество микроорганизмов в пророщенных зернах в 10 раз [17]. Поэтому установление условий и продолжительности проращивания зерна злаковых культур и гречихи является важной и актуальной задачей при разработке технологии продуктов длительного хранения из пророщенного зерна.

Целью работы является изучение влияния противомикробных средств и условий проращивания на микрофлору зерен пшеницы и гречихи.

Объекты и методы исследования

Все эксперименты проводили в 2020 и 2021 гг. в Белорусском государственном экономическом университете на кафедре товароведения и экспертизы товаров в лаборатории микробиологии в весенне-летний период (май – июль). Для эксперимента использовали:

– зерно мягкой пшеницы с влажностью $11,4 \pm 0,5 \%$ и зерно зеленой гречихи с влажностью $12,0 \pm 0,2 \%$;

– 0,01 % раствор перманганата калия (далее KMnO_4), который предварительно взвешивали и растворяли в воде при температуре 40–45 °С;

– настои трав календулы лекарственной (*Calendula officinalis* L.) (далее настой календулы) и чистотела большого (*Chelidonium majus* L.) (далее настой чистотела), которые готовили следующим образом: травы взвешивали, промывали и заливали дистиллированной водой в соотношении на 1 часть соответствующей травы на 50 частей воды с температурой 60–65 °С, а затем настаивали в течение 30 мин. Настои трав кипятили 10 мин, отделяли жидкую часть от твердой при помощи сита и использовали для проведения эксперимента.

Энергию проращивания зерна пшеницы и гречихи определяли по ГОСТ 10968-88.

На первом этапе эксперимента зерно инспектировали, удаляя поврежденные, битые и обесцвеченные зерна, промывали дистиллированной водой и замачивали в предварительно продезинфицированных этиловым спиртом пластиковых контейнерах. Замачивание проводили в течение 6 ч в дистиллированной воде (первый образец, контроль), растворе KMnO_4 (второй образец), в настое календулы (третий образец) и в настое чистотела (четвертый образец), после чего жидкую часть сливали с помощью сит.

На втором этапе зерно помещали в контейнеры с перфорированным дном для проращивания и каждые 6 ч орошали соответствующей жидкостью (дистиллированная вода, 0,01 % раствор KMnO_4 , настой календулы и чистотела) в количестве 1000 мл, одновременно промывая зерно и перемешивая (рис. 1). Зерно проращивали в течение 90 ч в термостатах при температурах 10, 15, 20, 25 и 30 °С.



Рисунок 1. Процесс проращивания зерна

Figure 1. Grain sprouting process

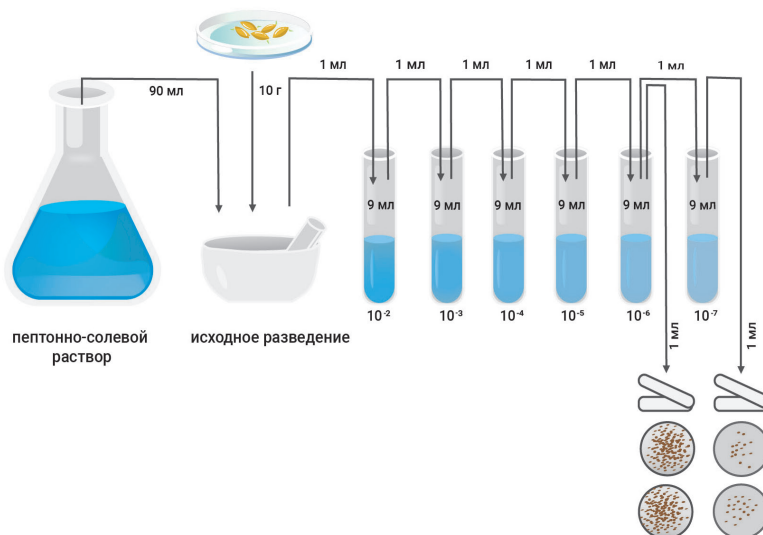


Рисунок 2. Схема приготовления разведений и посевов суспензии микроорганизмов

Figure 2. Dilutions and inoculations of suspension

В процессе проращивания пробы отбирали каждые 3 ч по 50 ± 5 г для определения КМАФАнМ, плесневых грибов и дрожжей в 1 г пророщенного зерна пшеницы и гречихи. Для этого готовили исходную суспензию и десятикратные разведения по ГОСТ 26669-85. Образцы пророщенных зерен по 10 г помещали в стерильную фарфоровую ступку, добавляли 90 мл пептонно-солевого раствора, измельчали стерильным пестиком и использовали для разведения и посева (рис. 2).

Для определения КМАФАнМ конечные разведения параллельно вносили в две чашки Петри, содержащие мясо-пептонный агар (МПА), и инкубировали при 30 ± 1 °С в течение 72 ч в аэробных условиях по ГОСТ 10444.15. Для определения количества дрожжей и плесневых грибов конечные разведения добавляли в чашки Петри, содержащие среду Сабуро, и инкубировали при 25 ± 1 °С в течение пяти дней по ГОСТ 1044.12. По результатам культивирования определяли численные значения МАФАнМ по ГОСТ 26670-91, плесеней и дрожжей по ГОСТ 1044.12. Качественный анализ микрофлоры пророщенного зерна проводили по морфологическим и культуральным характеристикам [18]. Морфологические признаки микроорганизмов (форма бактерий, наличие спор, типы соединения клеток и их размер) изучали при прямой микроскопии фиксированных препаратов, окрашенных по Граму. При характеристике культуральных признаков грибов учитывали окраску и характер мицелия, форму, размеры, профиль, прозрачность, структуру, консистенцию и поверхность грибных колоний, выросших на чашках Петри.

Данные обрабатывали и анализировали с использованием статистического программного обеспечения Statistica от StatSoft.

Результаты и их обсуждение

Пророщенные зерновые культуры обычно употребляются в сыром виде, что требует высокого качества и безопасности продукта. Благодаря оптимальному температурно-влажностному режиму во время проращивания зерно находится в хорошей среде для роста и развития, в том числе микроорганизмов, что может повлиять на микробиологические показатели и безопасность конечного продукта. Промывание водой не удаляет все микроорганизмы с поверхности пророщенных зерен [16]. В работах американского ученого V. H. Tournas указано, что чаще всего из пророщенных зерен выделялись плесневые грибы *Alternaria*, *Cladosporium*, *Penicillium* и *Phoma* [19].

В исследовании определили КМАФАнМ после 96 ч замачивания и проращивания пшеницы в дистиллированной воде при температурах от 10 до 30 °С с шагом в 5 °С. В процессе проращивания зерна пшеницы при разных температурах установлено, что требуемая длина ростка $2,5 \pm 0,5$ мм (рис. 3) достигалась при температуре 10 °С через 96 ч, при температуре 15 °С через 72, при температуре 20–25 °С через 38–48 ч, при температуре 30 °С через 32 ч [20]. Энергия прорастания зерна пшеницы и гречихи составила 85–95 %.

Изменение количества микроорганизмов в период проращивания при разных температурных режимах представлено на рисунке 4, где показаны линии уровня поверхности и цветные метки с



Рисунок 3. Пророщенное зерно пшеницы

Figure 3. Sprouted wheat grain

разной интенсивностью цветов. Оптимальная зона прорастивания обозначена в центральном эллипсе. По положению главных осей легко оценить графически оптимальные значения температуры и продолжительности прорастивания, которые приводят к наименьшему значению КМАФАнМ. Так, при значении КМАФАнМ не более 10^7 КОЕ/г определены следующие параметры прорастивания зерна: температура 11–20 °С, продолжительность 12–46 ч.

Для снижения загрязнения зерновых культур микроорганизмами учеными проводились исследования по удалению оболочек и сушке зерна, использованию химической обработки и органических кислот, по воздействию ионизирующего излучения, озонирования, микроволн, плазмы, импульсного УФ-света, по обработке фильтрованной водой, содержащей 4 % этилового спирта, коллоидными растворами серебра [21–28]. Также учеными использовался экстракт зеленого чая в качестве раствора для замачивания зерна вместо воды. Это оказало влияние на процесс прорастивания, в том числе улучшило пищевую ценность пророщенного зерна и повлияло на снижение количества микроорганизмов в пророщенной пшенице [29].

Нами изучено влияние раствора KMnO_4 , настоя календулы и настоя чистотела на микрофлору пророщенного зерна пшеницы и гречихи при разных параметрах прорастивания. Раствор KMnO_4 широко используется в медицине как антисептическое и дезинфицирующее средство. Повсеместное распространение многих лекарственных растений, их дешевизна и высокая физиологическая активность комплекса биологически активных веществ делает возможным использование лекарственных трав в пищевой промышленности. Травы, которые используются в медицине, имеют лечебные свойства, в том числе антимикробные [30, 31]. Изменение количества микроорганизмов, в зависимости от вида

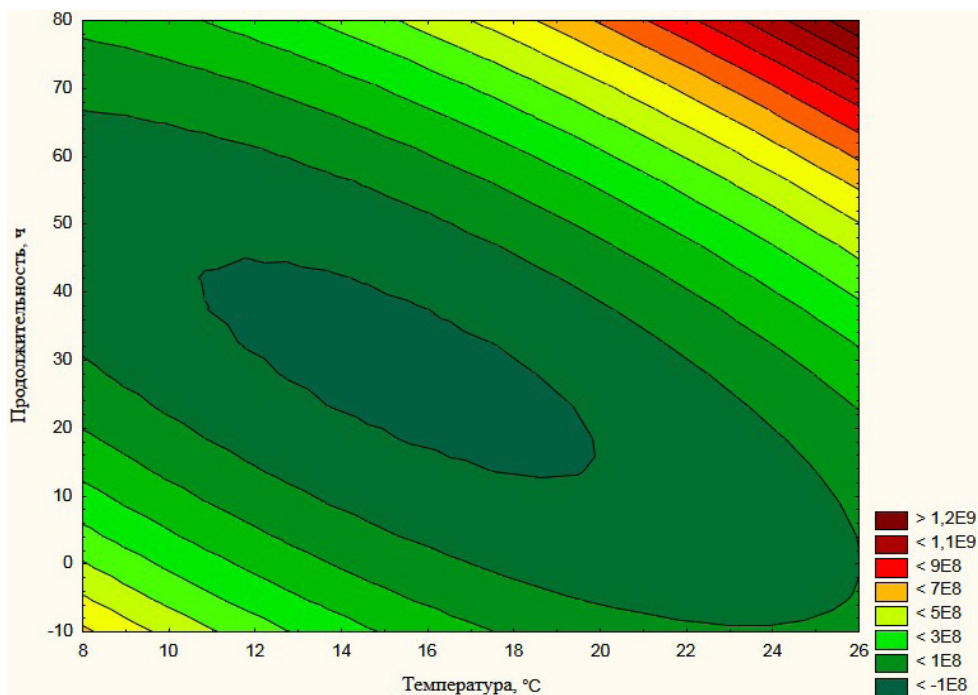


Рисунок 4. Влияние температуры и продолжительности прорастивания зерна пшеницы на КМАФАнМ, КОЕ/г

Figure 4. Effect of temperature and germination time of wheat grain on QMAFAnM, CFU/g

Таблица 1. Количественный состав микрофлоры в 1 г зерна пшеницы и гречихи при проращивании в обеззараживающих растворах в течение 46 ч при температуре $20,0 \pm 0,5$ °CTable 1. Quantitative composition of microflora in 1 g of wheat and buckwheat grain germinated in disinfecting solutions for 46 h at 20.0 ± 0.5 °C

Наименование сырья	КМАФАнМ, КОЕ/г	Плесени, КОЕ/г	Дрожжи, КОЕ/г
<i>Пшеница</i>			
Сухое зерно	$1,8 \times 10^6$	$2,0 \times 10^1$	$1,0 \times 10^1$
Пророщенное зерно:			
– воде	$4,8 \times 10^7$	$3,0 \times 10^1$	$5,0 \times 10^1$
– в растворе KMnO_4	$4,9 \times 10^7$	$3,1 \times 10^1$	$5,2 \times 10^1$
– в настое календулы	$1,9 \times 10^7$	$1,6 \times 10^1$	не обнаружено
– в настое чистотела	$2,2 \times 10^7$	$2,0 \times 10^1$	не обнаружено
<i>Гречиха</i>			
Сухое зерно	$4,0 \times 10^6$	$3,0 \times 10^1$	$2,4 \times 10^2$
Пророщенное зерно:			
– воде	$5,0 \times 10^7$	$3,9 \times 10^1$	$3,6 \times 10^2$
– в растворе KMnO_4	$5,3 \times 10^7$	$3,8 \times 10^1$	$3,4 \times 10^2$
– в настое календулы	$1,6 \times 10^7$	$1,9 \times 10^1$	не обнаружено
– в настое чистотела	$2,4 \times 10^7$	$2,7 \times 10^1$	не обнаружено

обеззараживающего раствора, используемого при проращивании зерна, при температуре $20,0 \pm 0,5$ °C в течение 46 ч представлено в таблице 1.

Исследование уровня микробной контаминации сухих зерен пшеницы и гречихи показало, что они были сильно обсеменены микроорганизмами – $1,8 \times 10^6$ и $4,0 \times 10^6$ КОЕ/г соответственно. Одновременно отмечались признаки как бактериального, так и грибного поражения.

Общее количество микроорганизмов в процессе проращивания зерна пшеницы в воде увеличилось с $1,8 \times 10^6$ до $4,8 \times 10^7$ КОЕ/г, в процессе проращивания зерна гречихи в воде – с $4,0 \times 10^6$ до $5,0 \times 10^7$ КОЕ/г. Увлажнение зерна пшеницы и гречихи водой способствовало размножению микроорганизмов за счет увеличения численности бактерий.

Орошение образцов пшеницы и гречихи раствором KMnO_4 не привело к снижению микроорганизмов в пророщенном зерне по сравнению с орошением водой. Следует предположить, что концентрация раствора KMnO_4 была недостаточна для обеззараживания зерна при проращивании.

Использование настоев лекарственных трав для замачивания и проращивания зерна пшеницы и гречихи снизило общую микробную обсемененность зерен на 54–68 %. Замачивание зерна в настоях лекарственных трав проводилось в соотношении на 1 часть зерна 1,5 частей настоя соответствующей травы. Количество плесневых грибов в пшенице и гречихе при замачивании и проращивании в настое календулы, по сравнению с водой, снизилось на 47–51 %, колоний дрожжей на 100 %.

Были проведены дополнительные исследования по анализу состава микрофлоры зерна. Состав микрофлоры зерна пшеницы и гречихи представлен аэробными бактериями, плесневыми грибами

и дрожжами. Исследование морфологических и культуральных свойств колоний, выросших на поверхности МПА, показал наличие мелких (от 1 до 2 мм) и средних (от 2 до 4 мм) колоний округлой и овальной форм, белого, бледно-желтого и серого цвета с гладкой и блестящей поверхностью. Присутствовали точечные (менее 1 мм) анаэробные колонии в толще питательной среды (рис. 5). В результате исследований посевов на КМАФАнМ в препаратах обнаружено преобладание единичных грамположительных неспорообразующих палочек, меньше кокковых форм, спорообразующих палочек и единичных клеток дрожжей.

При дополнительном посеве на среду Сабуро были получены колонии дрожжей и мицелиальных грибов. При микроскопировании препаратов клетки дрожжей имели округлую форму, тонкую оболочку и мелкозернистую цитоплазму. Выделенные



Рисунок 5. Состав микрофлоры зерна пшеницы при проращивании в воде, растущей на МПА

Figure 5. Microflora of wheat grain germinated in water

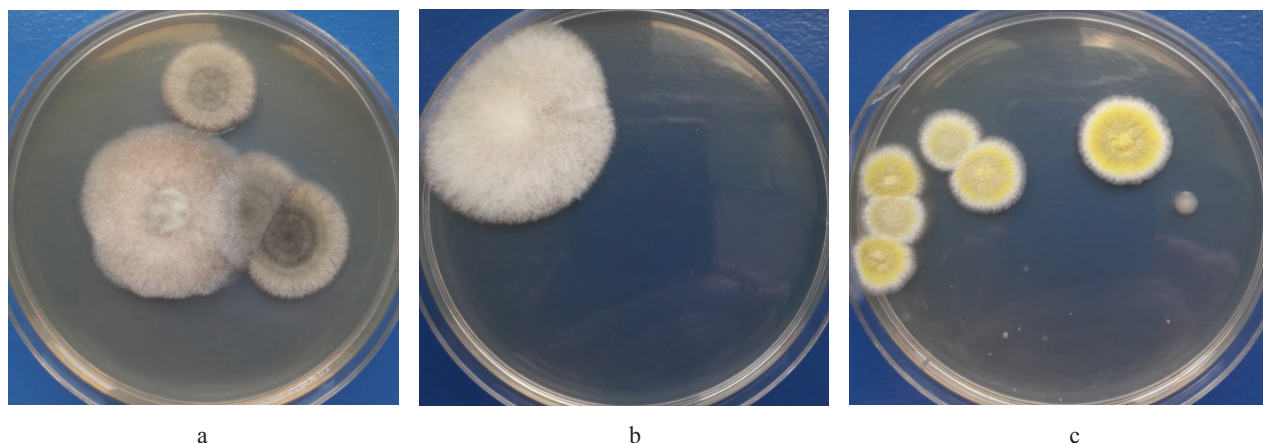


Рисунок 6. Состав микрофлоры зерна гречихи и пшеницы растущей на среде Сабуро при проращивании в воде и настое лекарственных трав: а – состав микрофлоры зерна гречихи при проращивании в настое чистотела; б – состав микрофлоры зерна гречихи при проращивании в настое календулы; с – состав микрофлоры зерна пшеницы при проращивании в настое чистотела

Figure 6. Microflora of buckwheat and wheat grain growing on Sabouraud's medium after germinating in water and infusion of medicinal herbs: a – microflora of buckwheat grain germinated in celandine infusion; b – composition of the microflora of buckwheat grain germinated in calendula infusion; c – microflora of wheat grain germinated in celandine infusion

культуры плесневых грибов отличались большим разнообразием. Диаметр колоний колебался от 0,5 до 3,0 см и более. Цветовая гамма колоний была весьма разнообразной: белые, беловато-желтоватые, желтые, оранжевые, зеленоватые, коричневые, черные и сочетание многих оттенков. Встречались колонии грибов то плоские и ровные, то складчатые и бугристые, в некоторых случаях кратерообразные или куполовыпуклые. Консистенция плотная, мягкая, тестообразная или крошковатая. Поверхность колоний у одних грибов гладкая и кожистая, у других пушистая, бархатистая, ватообразная (рис. 6). Одни штаммы глубоко внедрялись в плотную питательную среду, образуя субстратный мицелий и трудно отделялись, другие – наоборот. Такое разнообразие колоний грибов определяется видовым составом грибной микрофлоры зерен и лекарственных растений.

Выводы

Микроорганизмы, присутствующие в злаковых культурах и гречихе, влияют как на безопасность, так и на качество и функциональные свойства зерна. Некоторые плесени могут продуцировать микотоксины и представлять серьезную опасность для здоровья потребителей. Высокая температура и высокая влажность при проращивании влияют на увеличение микрофлоры в процессе проращивания. Следовательно, важно минимизировать контаминацию зерновых культур и гречихи в процессе проращивания, чтобы обеспечить безопасность конечного продукта. С этой целью определены оптимальные режимы проращивания зерна (температура 11–20 °С,

продолжительность 12–46 ч) до длины ростка $2,5 \pm 0,5$ мм, при которых КМАФАнМ не превышает 10^7 КОЕ/г.

Для уменьшения развития микрофлоры в процессе замачивания и проращивания зерна пшеницы и гречихи использовали настои из лекарственных трав календулы и чистотела. Обработка настоями из трав снизила рост общего количества бактерий, дрожжей и плесневых грибов в пророщенном зерне. Календула и чистотел содержат флавоноиды, терпены, алкалоиды и эфирное масло с высокой активностью против широкого спектра микроорганизмов. В результате настои из трав проявляют антимикробный эффект во время проращивания. В связи с этим можно уменьшить развитие микрофлоры зерна во время проращивания и учесть обсемененность продукта для расчета режима тепловой обработки при проектировании продуктов длительного хранения. Использование настоя из календулы является эффективным и недорогим способом снижения микробиологического загрязнения пророщенного зерна.

Критерии авторства

М. Л. Зенькова – аналитический обзор источников информации, разработка концепции эксперимента, описание организации эксперимента, проведение экспериментальных исследований, описание и анализ полученных результатов, корректировка рукописи. Л. А. Мельникова – организация эксперимента, описание методов, проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, корректировка рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А. Л. Кохановской за помощь в оформлении рисунков к статье.

Contribution

M.L. Zenkova performed the analytical review, developed the research concept, described the experiment, performed the experimental research, analyzed the

results obtained, and proofread the manuscript. L.A. Melnikova organized the experiment, described the methods, performed the experimental research, analyzed the results, and proofread the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to A.L. Kokhanovskaya for the infographics.

Список литературы

1. The magic and challenges of sprouted grains / J. Pagand [et al.] // Cereal Foods World. 2017. Vol. 62. № 5. P. 221–226. <https://doi.org/10.1094/cfw-62-5-0221>.
2. Noots I., Delcour J. A., Michiels C. W. From field barley to malt: Detection and specification of microbial activity for quality aspects // Critical Reviews in Microbiology. 1999. Vol. 25. № 2. P. 121–153. <https://doi.org/10.1080/10408419991299257>.
3. Edible plant sprouts: Health benefits, trends, and opportunities for novel exploration / S. O. Aloo [et al.] // Nutrients. 2021. Vol. 13. № 8. <https://doi.org/10.3390/nu13082882>.
4. Науменко Н. В., Ботвинникова В. В. Исследование рисков контаминации зерновых культур микотоксинами токсигенных плесеней // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2020. Т. 8. № 2. С. 74–81.
5. Оценка микробиологических показателей семян пшеницы и гороха белорусской селекции / Л. И. Сапунова [и др.] // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: сборник научных трудов. Минск, 2017. С. 239–247.
6. Microbiology of wheat and flour milling in Australia / L. K. Berghofer [et al.] // International Journal of Food Microbiology. 2003. Vol. 85. № 1–2. P. 137–149. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(02\)00507-x](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(02)00507-x).
7. Distribution of microbial contamination within cereal grains / A. Laca [et al.] // Journal of Food Engineering. 2006. Vol. 72. № 4. P. 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.012>.
8. Douglas P. E., Flannigan B. A microbiological evaluation of barley malt production // Journal of the Institute of Brewing. 1988. Vol. 94. № 2. P. 85–88. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1988.tb04562.x>.
9. Бережная О. В., Дубцов Г. Г., Войно Л. И. Проростки пшеницы – ингредиент для продуктов питания // Пищевая промышленность. 2015. № 5. С. 26–29.
10. Овсянкина А. В. Фузариозные микотоксины, загрязняющие зерно, и вызывающие болезни животных и человека // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2013. № 14. С. 281–284.
11. Zain M. E. Impact of mycotoxins on humans and animals // Journal of Saudi Chemical Society. 2011. Vol. 15. № 2. P. 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2010.06.006>.
12. Бережная О. В., Дубцов Г. Г., Войно Л. И. Повышение микробиологической безопасности пророщенного зерна пшеницы // Пищевая промышленность. 2013. № 6. С. 28–29.
13. Сафронова Т. Н., Казина В. В., Сафронова К. В. Разработка технологических параметров проращивания зерна пшеницы // Техника и технология пищевых производств. 2017. Т. 44. № 1. С. 37–43.
14. Microbiota of instant cereals and its change during storage / M. Mardar [et al.] // Food Science and Technology. 2019. Vol. 13. № 1. P. 114–121. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i1.1336>.
15. Ramakrishna N., Lacey J., Smith J. E. Effect of surface sterilization, fumigation and gamma irradiation on the microflora and germination of barley seeds // International Journal of Food Microbiology. 1991. Vol. 13. № 1. P. 47–54. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(91\)90135-c](https://doi.org/10.1016/0168-1605(91)90135-c).
16. Development of a germination process for producing high β -glucan, whole grain food ingredients from oat / A. Wilhelmson [et al.] // Cereal Chemistry. 2001. Vol. 78. № 6. P. 715–720. <https://doi.org/10.1094/cchem.2001.78.6.715>.
17. Выбор способа обеззараживания зернового сырья при получении проростков пшеницы / А. Н. Павлюк [и др.] // Новости науки в АПК. 2019. Т. 12. № 3. С. 59–63. <https://doi.org/10.25930/2218-855X/014.3.12.2019>.
18. Мельникова Л. А., Заболоцкая Т. А. Основы микробиологии. Минск: БГЭУ, 2017. 91 с.
19. Tournas V. H. Moulds and yeasts in fresh and minimally processed vegetables, and sprouts // International Journal of Food Microbiology. 2005. Vol. 99. № 1. P. 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.08.009>.

20. Исследование нутриентного профиля пророщенного зерна мягкой пшеницы, выращенной в Беларуси / М. Л. Зенькова [и др.] // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2020. № 3. С. 58–68. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.339>.
21. Los A., Ziuzina D., Bourke P. Current and future technologies for microbiological decontamination of cereal grains // *Journal of Food Science*. 2018. Vol. 83. № 6. P. 1484–1493. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14181>.
22. Park H., Puligundla P., Mok C. Cold plasma decontamination of brown rice: Impact on biochemical and sensory qualities of their corresponding seedlings and aqueous tea infusions // *LWT*. 2020. Vol. 131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109508>.
23. Воздействия низкотемпературной плазмы на продукты растительного происхождения / С. В. Гомбоева [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. 2017. Т. 46. № 3. С. 129–134.
24. Khapre A. P., Deshpande H. W., Katke S. D. A review on microbial contamination of Cereal grains // *International Journal of Chemical Studies*. 2020. Vol. 8. № 3. P. 1829–1832. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3y.9474>.
25. Reduced microbiological contamination following irrigation of germinated seed for foods / H. Danilčenko [et al.] // *Czech Journal of Food Sciences*. 2018. Vol. 36. № 2. P. 139–145. <https://doi.org/10.17221/267/2017-cjfs>.
26. Antibacterial effect of colloidal solutions of silver nanoparticles on microorganisms of cereal crops / O. A. Suvorov [et al.] // *Foods and Raw Materials*. 2017. Vol. 5. № 1. P. 100–107. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-100-107>.
27. Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety / R. Pandiselvam [et al.] // *Ozone: Science and Engineering*. 2019. Vol. 41. № 1. P. 17–34. <https://doi.org/10.1080/01919512.2018.1490636>.
28. Lukševičiute V., Luksienė Z. Inactivation of molds on the surface of wheat sprouts by chlorophyllin-chitosan coating in the presence of visible LED-based light // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2020. Vol. 202. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111721>.
29. The influence of green tea extract as the steeping solution on nutritional and microbial characteristics of germinated wheat / S. Pakfetrat [et al.] // *Food Chemistry*. 2020. Vol. 332. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127288>.
30. Монографии ВОЗ о лекарственных растениях, широко используемых в Новых независимых государствах (ННГ). Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2010. 453 с.
31. Марьин А. А., Коломиец Н. Э. Лекарственные растения и биологически активные вещества противомикробного действия // *Фундаментальная и клиническая медицина*. 2017. Т. 2. № 4. С. 45–55. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2017-2-4-45-55>.

References

1. Pagand J, Heirbaut P, Pierre A, Pareyt B. The magic and challenges of sprouted grains. *Cereal Foods World*. 2017;62(5):221–226. <https://doi.org/10.1094/cfw-62-5-0221>.
2. Noots I, Delcour JA, Michiels CW. From field barley to malt: Detection and specification of microbial activity for quality aspects. *Critical Reviews in Microbiology*. 1999;25(2):121–153. <https://doi.org/10.1080/10408419991299257>.
3. Aloo SO, Ofosu FK, Kilonzi SM, Shabbir U, Oh DH. Edible plant sprouts: Health benefits, trends, and opportunities for novel exploration. *Nutrients*. 2021;13(8). <https://doi.org/10.3390/nu13082882>.
4. Naumenko NV, Botvinnikova VV. Studying the risks of grain contamination with mycotoxins of toxigenic molds. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2020;8(2):74–81. (In Russ.).
5. Sapunova LI, Tamkovich IA, Kulish SA, Yarkhova LV, Lobanok AG, Ourbanchik EN. Evaluation of microbiological indicators of wheat and pea seeds of Belarusian selection. *Mikrobynye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty: sbornik nauchnykh trudov* [Microbial biotechnology: fundamental and applied aspects: collection of research papers]. Minsk: Belarusian Science; 2017. pp. 239–247. (In Russ.).
6. Berghofer LK, Hocking AD, Miskelly D, Jansson E. Microbiology of wheat and flour milling in Australia. *International Journal of Food Microbiology*. 2003;85(1–2):137–149. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(02\)00507-x](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(02)00507-x).
7. Laca A, Mousia Z, Díaz M, Webb C, Pandiella SS. Distribution of microbial contamination within cereal grains. *Journal of Food Engineering*. 2006;72(4):332–338. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.012>.
8. Douglas PE, Flannigan B. A microbiological evaluation of barley malt production. *Journal of the Institute of Brewing*. 1988;94(2):85–88. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1988.tb04562.x>.
9. Berezhnaya OV, Dubtsov GG, Voyno LI. Wheat germ – an ingredient for food products. *Food Industry*. 2015;(5):26–29. (In Russ.).
10. Ovsyankina AV. Fusarium mycotoxins contaminants grain, and diseases of animals and man. Theory and practice of parasitic disease control. 2013;(14):281–284. (In Russ.).
11. Zain ME. Impact of mycotoxins on humans and animals. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2011;15(2):129–144. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2010.06.006>.
12. Berezhnaya OV, Dubtsov GG, Voyno LI. Improving the microbiological safety of sprouted wheat grains. *Food Industry*. 2013;(6):28–29. (In Russ.).
13. Safronova TN, Kazina VV, Safronova KV. Development of technological parameters for wheat grain germination.

Food Processing: Techniques and Technology. 2017;44(1):37–43. (In Russ.).

14. Mardar M, Stateva M, Yegorova A, Evdokimova G, Ustenko I, Masanski S. Microbiota of instant cereals and its change during storage. *Food Science and Technology*. 2019;13(1):114–121. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i1.1336>.

15. Ramakrishna N, Lacey J, Smith JE. Effect of surface sterilization, fumigation and gamma irradiation on the microflora and germination of barley seeds. *International Journal of Food Microbiology*. 1991;13(1):47–54. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(91\)90135-c](https://doi.org/10.1016/0168-1605(91)90135-c).

16. Wilhelmson A, Oksman-Caldentey KM, Laitila A, Suortti T, Kaukovirta-Norja A, Poutanen K. Development of a germination process for producing high β -glucan, whole grain food ingredients from oat. *Cereal Chemistry*. 2001;78(6):715–720. <https://doi.org/10.1094/cchem.2001.78.6.715>.

17. Pauliuk AM, Moroz IV, Sapunova LI, Ourbantchik AM, Haldova MM. The choice of grain decontamination method for wheat seed germination. *Novosti nauki v APK [Science news in the agro-industrial complex]*. 2019;12(3):59–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.25930/2218-855X/014.3.12.2019>.

18. Mel'nikova LA, Zabolotskaya TA. *Osnovy mikrobiologii [Fundamentals of microbiology]*. Minsk: Belarus State Economic University; 2017. 91 p. (In Russ.).

19. Tournas VH. Moulds and yeasts in fresh and minimally processed vegetables, and sprouts. *International Journal of Food Microbiology*. 2005;99(1):71–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.08.009>.

20. Zenkova ML, Akulich AV, Melnikova LA, Timofeeva VN. Nutrient profile research of sprouted soft wheat grain grown in Belarus. *Storage and Processing of Farm Products*. 2020;(3):58–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.339>.

21. Los A, Ziuzina D, Bourke P. Current and future technologies for microbiological decontamination of cereal grains. *Journal of Food Science*. 2018;83(6):1484–1493. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14181>.

22. Park H, Puligundla P, Mok C. Cold plasma decontamination of brown rice: Impact on biochemical and sensory qualities of their corresponding seedlings and aqueous tea infusions. *LWT*. 2020;131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109508>.

23. Gomboeva SV, Badmaeva II, Baldanov BB, Ranzhurov TV, Nikolaev EO. Effects of low-temperature plasma on plant products. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2017;46(3):129–134. (In Russ.).

24. Khapre AP, Deshpande HW, Katke SD. A review on microbial contamination of Cereal grains. *International Journal of Chemical Studies*. 2020;8(3):1829–1832. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3y.9474>.

25. Danilchenko H, Jariene E, Televičiute D, Suproniene S, Kulaitiene J, Tarasevičiene Ž, et al. Reduced microbiological contamination following irrigation of germinated seed for foods. *Czech Journal of Food Sciences*. 2018;36(2):139–145. <https://doi.org/10.17221/267/2017-cjfs>.

26. Suvorov OA, Volozhaninova SYu, Balandin GV, Frolova YuV, Kozlovskaya AE, Fokina EN, et al. Antibacterial effect of colloidal solutions of silver nanoparticles on microorganisms of cereal crops. *Foods and Raw Materials*. 2017;5(1):100–107. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-100-107>.

27. Pandiselvam R, Subhashini S, Banuu Priya EP, Kothakota A, Ramesh SV, Shahir S. Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety. *Ozone: Science and Engineering*. 2019;41(1):17–34. <https://doi.org/10.1080/01919512.2018.1490636>.

28. Lukseviciute V, Luksiene Z. Inactivation of molds on the surface of wheat sprouts by chlorophyllin-chitosan coating in the presence of visible LED-based light. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2020;202. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111721>.

29. Pakfetrat S, Amiri S, Radi M, Abedi E, Torri L. The influence of green tea extract as the steeping solution on nutritional and microbial characteristics of germinated wheat. *Food Chemistry*. 2020;332. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127288>.

30. WHO Monographs on Medicinal Plants Commonly Used in the Newly Independent States (NIS). Geneva: World Health Organization; 2010. 453 p. (In Russ.).

31. Mar'in AA, Kolomiets NE. Medicinal plants and biologically active substances with antifungal properties. *Fundamental and Clinical Medicine*. 2017;2(4):45–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2017-2-4-45-55>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818>Обзорная статья
<http://fptt.ru>

Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов

Л. К. Асякина*, **Л. С. Дышлюк**, **А. Ю. Просеков**Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 04.09.2021

Принята после рецензирования: 15.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: alk_kem@mail.ru

© Л. К. Асякина, Л. С. Дышлюк, А. Ю. Просеков, 2021

Аннотация.

Введение. Постоянно увеличивающиеся объемы токсичных выбросов в биосферу способствуют накоплению загрязняющих веществ в почве, воде и атмосфере. Это представляет серьезную угрозу для живых систем и экосистемы в целом. Поэтому целью работы является разработка и/или усовершенствование существующих методов и комплексов на их основе по восстановлению загрязненных природных систем.

Объекты и методы исследования. Общедоступная научная информация баз данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), платформы Web of Science и отечественной электронной библиотеке eLibrary.ru с глубиной поиска 16 лет.

Результаты и их обсуждение. В результате анализа научной литературы выделены основные техногенные объекты, оказывающие токсическое действие на биоту. Деструктивному воздействию подвержены почвенные покровы. Среди существующих техногенно нарушенных объектов наибольшую площадь занимают отходы горнодобывающей промышленности. К загрязняющим веществам относятся тяжелые металлы, углеводороды, соединения серы, кислоты и др. Для снижения техногенного воздействия на окружающую среду используют различные технологии ремедиации. Они включают в себя полное или частичное разрушение поллютантов, извлечение их для дальнейшей переработки в нетоксичную продукцию и/или полного удаления, а также стабилизацию в менее токсичные формы. В настоящем обзоре представлена информация об основных методах восстановления нарушенных почв и обоснована перспектива разработки комплексных технологий ремедиации.

Выводы. Рассмотрены основные поллютанты антропогенного происхождения, влияющие на состояние окружающей биоты. Изучены классические методы восстановления техногенно-нарушенных почв. Обоснована перспектива разработки новых технологий ремедиации почв на основе комбинирования биологических методов – фиторемедиации, биоаугментации и биостимуляции для восстановления посттехногенных ландшафтов.

Ключевые слова. Экология, поллютанты, горнодобывающая промышленность, рекультивация, биоремедиация

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России)^{ROR} для выполнения научно-исследовательских работ по теме «Разработка подходов к фиторемедиации посттехногенных ландшафтов с использованием стимулирующих рост растений ризобактерий (PGPB) и «омиксных» технологий», дополнительное соглашение № 075-03-2021-189/4 от 30.09.2021 (внутренний номер 075-ГЗ/Х4140/679/4). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием КемГУ.

Для цитирования: Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов / Л. К. Асякина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 805–818. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818>.

Review article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Reclamation of Post-Technological Landscapes: International Experience

Lyudmila K. Asyakina*, **Lyubov S. Dyshlyuk**,
Alexander Yu. ProsekovKemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: September 04, 2021

Accepted in revised form: November 15, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: alk_kem@mail.ru

© L.K. Asyakina, L.S. Dyshlyuk, A.Yu. Prosekov, 2021

Abstract.

Introduction. Anthropogenic activities cause large-scale environmental problems. The growing volumes of toxic emissions contribute to soil, water, and air pollution, thus posing a serious threat to all living systems and the global ecosystem. New reclamation methods are a relevant research topic as they help to restore and preserve ecosystems.

Study objects and methods. The research covered sixteen years of scientific publications from PubMed of the National Center for Biotechnology Information (USA), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), Web of Science, and the national electronic library service eLibrary.ru.

Results and discussion. The authors reviewed various scientific publications to define the main technogenic objects that have a toxic effect on biota. Soil is more vulnerable to destructive effects, and mining wastes are responsible for the largest share of technogenically disturbed objects. Pollutants include many compounds, such as heavy metals, hydrocarbons, sulfur compounds, acids, etc. Reclamation technologies reduce the man-induced impact on the environment, e.g. pollutants can be completely or partially destroyed, processed into non-toxic products, completely removed, stabilized into less toxic forms, etc. This review provides information on the main methods of reclamation of disturbed soils and substantiates the prospect of developing integrated reclamation technologies.

Conclusion. The present review featured the main pollutants of anthropogenic origin and the traditional soil reclamation methods. The most prospective new technologies of soil reclamation appeared to be a combination of such biological methods as phytoremediation, bioaugmentation, and biostimulation.

Keywords. Ecology, pollutants, mining industry, reclamation, bioremediation

Funding. The research was part of the state task ordered by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka) ^{ROR}: “Development of approaches to phytoremediation of post-technological landscapes using plant growth-stimulating rhizobacteria and “omics” technologies”, supplementary agreement No. 075-03-2021-189/4 dated September 30, 2021 (internal number 075-GZ/X4140/679/4). The research was conducted on the premises of the Research Equipment Sharing Center of Kemerovo State University.

For citation: Asyakina LK, Dyshlyuk LS, Prosekov AYu. Reclamation of Post-Technological Landscapes: International Experience. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):805–818. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818>.

Введение

Индустриализация и урбанизация, современные методы ведения сельского хозяйства и другие формы антропогенной деятельности человека в последние десятилетия привели к крупномасштабным экологическим проблемам [1, 2]. Научно-технический прогресс способствовал увеличению техногенной нагрузки и стимулировал накоплению вреда окружающей среде. На сегодняшний день к числу основных экологических проблем относят: загрязнение атмосферного воздуха и водных объектов, загрязнение и деградацию почвенно-земельных ресурсов [3, 4]. Результатом является снижение биоразнообразия. Загрязнение – присутствие различных объектов в окружающей среде в концентрациях, ухудшающих ее функционирование и представляющих риск для живых систем. Загрязняющие вещества (поллютанты) имеют твердую, жидкую и газообразную формы. Высокие концентрации данных веществ оказывают негативное влияние на биоту и способны изменять естественные ландшафты и рельефы местностей [5, 6].

Для устранения негативного воздействия поллютантов, повышения качества жизни и здоровья

населения, обеспечения экологической безопасности и охраны окружающей среды обязательным условием является их удаление с загрязненных участков (с последующим восстановлением техногенно нарушенных земель). Среди существующих техногенно нарушенных объектов наибольшую площадь занимают отходы горнодобывающей промышленности. Концентрация поллютантов на данных территориях в 100 и 1000 раз превышает предельно допустимые значения [7]. Например, по экспертным оценкам площадь нарушенных земель в Кузбассе составляет 120–150 тыс. га, на которой работают 114,9 тыс. человек. Из них 79,3 % напрямую контактируют с вредными и/или опасными поллютантами, вызывающими онкологические и прочие заболевания [8]. Следовательно, существует острая необходимость в осуществлении рекультивационных мероприятий техногенно загрязненных территорий. Однако на сегодняшний день не существует универсального метода по восстановлению нарушенной экосистемы, т. к. загрязнители имеют различную структурную форму (являются органическими веществами или

тяжелыми металлами) и/или имеют различный источник происхождения, т. е. для их устранения требуются индивидуальные методы и технологии по обработке и утилизации [9]. Поэтому перспективным направлением для сохранения и восстановления безопасной для жизнедеятельности организмов экосистемы является разработка и/или усовершенствование существующих методов и комплексов на их основе по восстановлению загрязненных природных систем.

Целью данной работы является проведение литературного обзора, посвященного рассмотрению видов поллютантов и методам восстановления техногенно нарушенных территорий, для выбора оптимального комплекса мероприятий по рекультивации земель, в частности пригодных для использования на загрязненных территориях Кемеровской области – Кузбасса.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является общедоступная научная информация, поиск которой осуществлялся в базах данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), на платформе Web of Science и отечественной электронной библиотеке eLibrary.ru. Глубина поиска составляла 16 лет, язык поиска – английский и русский.

Результаты и их обсуждение

В ходе обзора были выделены основные виды техногенных объектов, являющихся источниками поллютантов:

1. Терриконы шахт, хвостохранилища, отвалы – отходы горной промышленности, основанной на добыче, обогащении и переработке полезных ископаемых [10];

2. Золошлаковые отходы – золы уноса и шлаки, образуемые в процессе факельного и слоевого сжигания угля [11, 12];

3. Металлургические шламы – твердые отходы, образующиеся в процессе добычи и выплавки металлических руд, складываются в шламонакопителях и характеризуются высокой концентрацией тяжелых металлов [13];

4. Отходы сельскохозяйственной деятельности – продукты жизнедеятельности птиц и животных, жмых растительных культур, отработанные масла и химикаты (пестициды, гербициды) [14];

5. Полигоны твердых, жидких и маслоотходов – складываются в виде свалок и захоронений [15].

Данные техногенные объекты лишены плодородного почвенного слоя, т. к. поллютанты делают их непригодными для представителей флоры и фауны, обитающих рядом с очагом загрязнения [7]. Пириты тяжелых металлов, подвижные формы железа и алюминия, критические значения рН почв и вод и

другие факторы оказывают фитотоксическое действие на окружающую биоту. В процессе угледобычи и углеобогащения экосистема, особенно почва, подвергается разрушительному воздействию. Как при закрытом, так и при открытом способе добычи угля на местах работает тяжелая техника, которая выделяет в экосистему оксиды азота, диоксид серы, оксид и диоксид углерода, оксид хлора. Они попадают в атмосферу, в водоемы и в почву. Помимо данных газов, в окружающую среду на разрезах выделяются угольная пыль и взвешенные вещества различного диаметра. Попадая в грунтовые воды, оксиды серы и хлора растворяются и превращаются в серную и соляную кислоту соответственно. Это приводит к увеличению кислотности водоемов и почв. При открытом способе добычи угля из тяжелых металлов больше всего накапливаются Zn, Cd, Pb, Hg, Fe, Al и Mn. Кроме металлов, выделяется большое количество свободной серы [16].

Поллютанты, проявляющие негативное воздействие на экосистему, подразделяют на 2 основные группы [17, 18]:

1. Органические соединения: галоидированные летучие (хлороформ, винилхлорид), галоидированные полуметучие (тетрахлорфенол), негалоидированные летучие (бензол, толуол, ацетон, этилбензол), негалоидированные полуметучие (фенол, полициклические ароматические углеводороды), органические агрессивные вещества (анилин), органические цианидины, пестициды, гербициды и нефтяные углеводороды;

2. Неорганические соединения: металлы (ртуть, хром, свинец), металлоиды (мышьяк, сурьма), радионуклиды (радиоактивные изотопы урана) и неорганические агрессивные вещества (соляная и серная кислоты) [19, 20].

Данные вещества также проявляют фитотоксическое действие, приводящее к нарушению круговорота питательных веществ в почве, и угнетающее развитие местной микробиоты и растительности, повышающее рост заболеваемости и смертности населения (работников, постоянно контактирующих с техногенно нарушенными ландшафтами, – горнорабочие и т. п., местного населения, проживающего вблизи нарушенных земель) [5, 21]. Поллютанты, поступая в организм, вызывают развитие респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, дисфункции репродуктивной и центральной нервной систем, кожных заболеваний, онкологии. Тяжелые металлы при всасывании в организм человека биоаккумулируются, что приводит к прямому отравлению или хронической интоксикации [5]. В работе J. J. Zocche и др. исследован элементный состав печени мышей, в рационе питания которых присутствовали овощи, выращенные на угольных отвалах [22]. В результате исследования отмечено высокое содержание

металлов и металлоидов (Mg, S, Ca, K, Fe, Zn и др.) в печени, что приводит к риску развития заболеваний нервной и сердечно-сосудистой систем, почек и др. Токсическое действие на организм сверхвысоких концентраций тяжелых металлов связано с изменением метаболических процессов и активных центров биологических молекул.

Органические вещества устойчивы к биодegradации в естественных условиях. Поэтому долго остаются в окружающей среде в первоначальном виде. Такие соединения принято называть стойкими органическими загрязнителями. Так как большинство органических поллютантов способно аккумулироваться в живых организмах, то это способствует их долгому нахождению в окружающей среде.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – органические соединения, имеющие в структуре 2 и более конденсированных кольца. Эти вещества образуются в результате пиролиза или неполного сгорания органических веществ. ПАУ из-за гидрофобных свойств являются одними из наиболее распространенных поллютантов в окружающей среде [23].

Для снижения техногенного воздействия на окружающую среду используют различные технологии рекультивации (восстановления, ремедиации) [24, 25]. Данные технологии включают в себя полное или частичное разрушение поллютантов, их извлечение для дальнейшей переработки в нетоксичную продукцию и/или полного удаления, стабилизацию поллютантов в менее токсичные формы и территориальное изолирование техногенных объектов (при помощи специализированных барьеров для препятствия их перемещения либо выкапывание для захоронения на полигоне) [26, 27]. К инженерным методам ликвидации и обезвреживания отходов или ремедиации посттехногенных территорий относятся методы, основанные на применении сложных инженерных сооружений, устройств и технологических приемов. Наиболее распространено захоронение отходов, которые осуществляют в том случае, когда их переработка опасна или невозможна. Для захоронения загрязненных почв и отходов отводятся специально оборудованные полигоны, характеризующиеся минимальным ущербом окружающей среде [28]. Данные технологии по ремедиации почвы разделяются на физические, химические и биологические методы.

Физические методы рекультивации техногенно-нарушенных почв часто используются в качестве вспомогательных мер на начальных этапах восстановительных процессов. Механические методы обработки загрязненных почв, такие как дробление, сортировка и брикетирование, имеют широкое распространение. Однако после их применения требуется дополнительная обработка

химическими методами. В исследовании G. Dermont и др. описан способ восстановления загрязненных металлами (мышьяк, кадмий, медь, цинк, свинец) городских почв. Рекультивацию осуществляют флотацией измельченной фракции загрязненной почвы с размером частиц менее 250 мкм [29]. S. Bisone и др. в своей работе также использовали дробление загрязненных металлургическими отходами почв для полного удаления тяжелых металлов и полициклических ароматических углеводородов [30].

Еще одной технологией, основанной на физических методах, является вакуумная или паровая экстракция почв. Процесс очистки осуществляется путем откачивания воздуха из зоны аэрации при помощи вакуумного компрессора. После чего откачанный воздух, содержащий в своем составе поллютанты, улавливается и очищается в специальном оборудовании. Данный тип ремедиации характерен для почв или твердых бытовых отходов, загрязненных летучими поллютантами (нефтепродуктами, летучими углеводородами, хлорсодержащими соединениями и др.) [31]. В Китае паровая экстракция почвы – одна из наиболее широко используемых технологий ремедиации нарушенных земель, которая имеет много различных модификаций: сочетание пенной промывки неионогенными поверхностно-активными веществами и паровой экстракции для удаления летучих соединений нефтяной смеси из почвы, загрязненной дизельным топливом [32, 33]. Стоит отметить, что серьезным недостатком данного метода является неоднородность природы загрязняющих веществ, присутствие нелетучих поллютантов и низкая проницаемость поверхностных слоев загрязненных почв. Вследствие чего извлечение поллютантов может быть продолжительным, неполным и неэффективным по сравнению с другими методами ремедиации.

В ряде исследований проанализирован метод вакуумной экстракции для ремедиации почв, загрязненных ПАУ. В исследованиях L. Trine и др. показано, что при использовании экстракции с усиленным паром (в данном методе температура пара составляет выше 105 °C) происходит эффективное удаление незамещенных форм ПАУ [23]. Однако параллельно с этим происходит синтез производных продуктов, которые характеризуются высокими показателями токсичности.

Также проблема образования полярных и токсичных производных ПАУ в процессе ремедиации почв рассмотрена в работе L. Chibwe и др. [34]. В модельных условиях биореактора осуществляли аэробную ремедиацию почв, загрязненных каменноугольной смолой. Неполное окисление ПАУ в процессе восстановления может привести к синтезу их производных, которые включают кислородные и нитрогруппы. Полученные производные характеризуются повышенной токсичностью, что объясняется наличием в их структуре веществ электроотрицательных групп.

К физическим методам также относятся относительно новые технологии рекультивации, основанные на включении механизмов самоочищения почв, такие как вспашка и взрыв. В основе указанных методов лежит концепция увеличения площади поверхности загрязненных почв, контактирующей с воздухом. Это способствует интенсивному выветриванию летучих и полуметучих загрязняющих соединений, повышению активности аборигенной аэробной микрофлоры [35].

Отдельную категорию образуют специализированные технологии – обработка материала ультразвуком, ультрафиолетовым или рентгеновским излучением, СВЧ и т. д. Эти технологии используют для решения конкретных специфических задач. Например, для обезвоживания загрязненных объектов и повышения их хрупкости. Указанные технологии эффективны при утилизации полимерных загрязнителей [36, 37]. В большинстве случаев ультразвуковые методы используют для очистки сточных вод.

В последних исследованиях J. Choi и др. изучали эффективность использования ультразвука для ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами [38]. В качестве контрольного метода использовали классическую механическую промывку почв при помощи механического перемешивателя. В качестве жидкой фазы выступали растворы соляной кислоты или ЭДТА (для увеличения процента десорбции металлов). С точки зрения эффективности процесса удаления металлов (Cu, Pb, Zn), расхода реактивов и объема реактора определены следующие условия ремедиации почвы: гибридизация механического промывания и ультразвука в растворе 0,05 М ЭДТА и соотношение растворителя к массе образца 3:1.

Отдельно выделяется группа термических методов. Они имеют широкое применение с целью глубокой переработки многих опасных отходов, характеризующихся наличием нетермостойких загрязнителей. Главным преимуществом термических методов деградации является практически 100 % удаление органических загрязнителей, а также уменьшение объема отходов в 5–10 раз. Традиционно термический метод используется для переработки ртуть-загрязненных почв и отходов [39]. Иногда термическую переработку используют с целью пиролиза, выпаривания или газификации нефтепродуктов из загрязненных нефтью или замазученных грунтов и нефтешламов. При этом основная масса грунта не претерпевает необратимых превращений, вследствие чего возвращается на исходное место после термообработки. Наиболее часто применяют такой вид тепловой обработки как витрификация или остекловывание – экстремально высокотемпературное (в пределах 1400–2000 °C) разложение с использованием стеклоподобных материалов [40].

В недавних исследованиях группы китайских ученых изучена эффективность использования газовой термической очистки загрязненных органическими соединениями почв и грунтовых вод [41]. В качестве основных загрязнителей выступали бензол, хлорбензол и нефтепродукты. Процесс очистки осуществляли в течение 34 суток при температуре 100–200 °C и давлении 0,5–2,0 кПа. В результате исследования определено, что процент нейтрализации каждого анализируемого органического соединения составил не ниже 97,5 %. Но стоит отметить высокую энергоемкость процесса термической ремедиации и возможность нарушения почвенного слоя.

Также в результате термической обработки загрязненные материалы преобразуются в зольный остаток и отходящие дымовые газы. Они могут быть источником высокотоксичных химических соединений, т. к. при их охлаждении образуются диоксины и фураны. Поэтому они проходят несколько дополнительных стадий очистки (высокотемпературное дожигание, быстрое охлаждение и очистка от механических примесей).

К следующей группе методов ремедиации техногенно нарушенных территорий относятся химические. Они основаны на взаимодействии специально подобранных реактивов и токсичных соединений. В результате происходящих химических реакций загрязнители преобразуются в менее токсичные и нетоксичные соединения, а затем утилизируются [42]. Среди химических методов восстановления загрязненных почв выделяют стабилизацию (реагентную нейтрализацию), химическую экстракцию, окислительно-восстановительную ремедиацию и электрохимическую обработку [43, 44].

Метод реагентной нейтрализации или стабилизации основан на интоксикации загрязнителя и перевода его в безопасную форму по отношению к окружающей среде [45]. Исследуемый стабилизирующий реагент вносят в загрязненные почвы или твердые бытовые отходы на глубину до 5 м. В результате происходит связывание и инкапсуляция загрязнителей. Полученные капсулированные формы водонепроницаемы и характеризуются нейтральным биологическим воздействием на окружающую экосистему. Чаще всего данный метод используется для выщелачивания тяжелых металлов. Для химической стабилизации металлов используют ионы железа с разной валентностью, т. к. они характеризуются высокой способностью к восстановлению [46]. Также для целей стабилизации используют низкоуглеродистые глины, известь, цемент и соединения фосфора [47].

Комбинированный химико-микробиологический метод восстановления загрязненных земель используют в своей работе L. Fu и др. [48]. Данный метод авторы использовали для решения проблемы вторичного загрязнения почв Cr(VI) после первичной

химической ремедиации. Отмечено, что химические методы являются нестабильными, несмотря на быстрые сроки восстановления и эффективность. Использование авторами исследования питательных веществ (смеси глюкозы и мочевины) для стимулирования роста эндогенной микрофлоры привело к снижению токсичности почвы на 97 %.

Метод химической экстракции основан на извлечении загрязняющих веществ специально подобранными реагентами путем перехода из твердой нерастворимой фазы в жидкую растворимую. Эффективность данного способа напрямую зависит от прочности образующихся соединений или комплексов [48, 49]. Удаление поллютантов посттехногенных ландшафтов – более сложный процесс по сравнению с экстракцией на основе физического разделения. Это обусловлено разнообразием химической природы загрязняющих веществ в одном объекте, что приводит к побочным химическим реакциям. В качестве растворителя выступают летучие вещества, такие как ацетон или гексан. Процесс растворения твердых форм поллютантов осуществляют в условиях специализированных реакторов с последующей отгонкой растворителя [50].

Электрохимическая деструкция загрязненных почв основана на использовании постоянного электрического тока в электрохимическом реакторе. Под действием электрического тока возникает ряд процессов (электрофорез, электроосмос, электромиграция и др.), приводящих к движению отдельных видов поллютантов и накоплению их на катодах и анодах реактора [51, 52].

Биологические методы рекультивации посттехногенных ландшафтов или биоремедиация – безопасная, экономически эффективная и устойчивая технология восстановления загрязненных территорий [53]. Подходы биоремедиации, в зависимости от природы загрязнителя и условий загрязненного объекта, подразделяются на 2 типа – *in situ* и *ex situ*. Обработка в условиях *in situ* является более привлекательной и рентабельной, т. к. она не вызывает разрушительных действий и не требует выемки и транспортировки загрязненных почв. Подходы ремедиации почв в условиях *in situ* включают естественное затухание, биостимуляцию, компостирование, биоаугментацию и фиторемедиацию. Биоремедиация в условиях *ex situ* включает изъятие и удаление загрязненной почвы или твердых отходов для обработки либо на месте, либо для транспортировки в подходящее место. Данный вид ремедиации включает земледелие, биологические штабеля и биошламы.

Естественные процессы затухания основаны на естественных процессах почв, которые способствуют снижению массы и концентрации поллютантов без вмешательства посторонних факторов [54]. Естественное затухание включает аэробное и анаэробное разложение загрязняющих веществ и

сопровождается биологическими, химическими и физическими процессами естественной деградации. Улучшенным вариантом является поддерживаемое естественное затухание, характеризующееся интенсификацией процесса восстановления загрязненных почв путем частичного вмешательства человека: добавление в почву мелиорирующих веществ или хлорида кальция приводит к иммобилизации и стабилизации тяжелых металлов. Процесс естественного затухания используют для почв, загрязненных нефтяными углеводородами (бензолом, этилбензолом, толуолом, ксилолом).

Биостимуляция – один из подходов биоремедиации, основанный на стимулировании активности аборигенной микрофлоры, содержащейся в посттехногенных ландшафтах. Метод основан на переработке стойких органических загрязнителей (дихлордифенилтрихлорэтана, полициклических ароматических углеводородов, пиретроидных инсектицидов, линдана и других соединений) [55]. В процессе биостимуляции осуществляется обогащение почв недостающими питательными веществами (азотом, углеродом, калием, фосфором) с целью повышения метаболической активности и роста естественной микрофлоры почв. Перспективным направлением в биостимуляции микроорганизмов выступает обогащение загрязненных почв компостом – неочищенным органическим отходом, повышающим естественные процессы сбраживания [56]. Помимо компоста, в работах используют мульчу и навоз, что сказывается на повышенном стимулировании анаэробных процессов разложения поллютантов микроорганизмами [53].

Метод компостирования на сегодняшний день считается одним из наиболее экономически эффективных способов ремедиации. Внесение компоста в загрязненную почву способствует увеличению содержания органических соединений, повышению плодородия нарушенных земель, детоксикации и стабилизации многих поллютантов за счет обогащения почв собственной микрофлорой. Однако стоит отметить, что, помимо положительного эффекта, использование компоста сопровождается выбросами токсичных газов во время разложения. Это может привести к загрязнению окружающей атмосферы [57].

Еще одним способом, основанном на действии микроорганизмов, является биоаугментация. Это экологически чистый и эффективный способ, отличающийся от биостимуляции тем, что в загрязненную почву вносят штаммы микроорганизмов, нехарактерных для данной местности и характеризующиеся высокой способностью разлагать целевые поллютанты. Микробная популяция, используемая для ремедиации почв, должна обладать высокими ростовыми характеристиками в условиях высокой концентрации загрязняющих

веществ. Биоаугментацию используют для нейтрализации широкого спектра загрязнителей: нефтепродуктов, пестицидов, тяжелых металлов, полиароматических углеводородов, линдана и других соединений [58]. В работе М. Сусои проведен анализ перспективных штаммов микроорганизмов для ремедиации загрязненных пестицидами почв методом биоаугментации [59]. К перспективным биодеструкторам отнесены штаммы из родов *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brucella*, *Burkholderia*, *Catellibacterium*, *Pichia*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Stenotrophomonas*, *Streptomyces* и *Verticillium*.

Для снижения концентрации шестивалентного хрома во многих исследованиях применяют метод биоаугментации различными микроорганизмами. Среди наиболее перспективных выделяют *Pannonibacter phragmitetus*, *Pseudomonas* spp., *Halomonas* spp., *Brucella* spp. и *Cellulomonas* spp. Научными работами доказана эффективность комбинированной ремедиации почвы методами биоаугментации и биостимуляции для снижения концентрации шестивалентного Cr: в Мексике доказана эффективность использования ацетатов в качестве добавки к микробному консорциуму *Halomonas* и *Herbaspirillum* для ремедиации долговременно загрязненных свалок; использование глюкозы оказывает существенное влияние на процесс восстановления Cr(VI), способствуя росту эндогенной микробиоты [48].

Эффективность метода напрямую зависит от правильного выбора штаммов с высокой способностью нейтрализовать поллютанты, стимулировать рост местной микрофлоры и запускать естественные процессы самоочищения почвы [60].

Таким образом, исследование физиологических и метаболических реакций микроорганизмов на металлический стресс в почве имеет важное значение для выбора оптимальных консорциумов, применимых в стратегиях биоремедиации, таких как биоаугментация или фитоэкстракция с микробиологическим усилением. Результаты исследований в области металлургии помогут разработать приложения, включая идентификацию биомаркеров для экотоксикологических исследований, биовыщелачивания, регенерации почвы на месте и фиторемедиации с микробиологическим участием загрязненных земель. Таким образом, этот обзор будет сосредоточен на молекулярном понимании устойчивости к металлам у бактерий и грибов, которое может быть получено из исследований в области металломики [61].

Направление биологической ремедиации почв с использованием растений называется фиторемедиация. Данный способ используется в условиях *in situ*, т. е. непосредственно на месте. Растения в данном методе используются для нейтрализации тяжелых металлов и металлоидов. Недостатки фиторемедиации

заключаются в том, что это медленный процесс, требующий нескольких и более лет сбора урожая. Проблема в том, что существуют стрессоры (колебания температуры, питательных веществ, осадков, травоядность, патогены растений и конкуренция со стороны сорняков), которые влияют на фиторемедиацию в полях, но в теплице не встречаются. Фиторемедиация подразделяется на фитоэкстракцию, фитостабилизацию и ризофильтрацию [62].

Фитоэкстракция (фитоаккумуляция) характеризуется удалением поллютантов из загрязненных почв без оказания какого-либо влияния на изменения в ее плодородии. Тяжелые металлы накапливаются в биомассе растения, поэтому в этом методе перспективно использовать металлоаккумулирующие растения с высоким коэффициентом биологического поглощения [63]. Для более полного протекания процесса применяют растения-гипераккумуляторы (горчица индийская (*Brassica juncea* (L.) Czern.), горчица черная (*Brassica nigra* (L.) W.D.J. Koch), подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.), люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) и др.), способные поглощать в 50–500 раз большие концентрации тяжелых металлов, чем обычные растения [64]. В статье В. F. Nero изучена способность ятрофа куркаса (*Jatropha curcas* L.) и ветивера (*Chrysopogon zizanioides* L.) снижать концентрацию углеводов почв вблизи горных выработок [65]. Максимальная эффективность поглощения поллютантов данными растениями отмечена при дополнительном обогащении почв компостом.

Для модификации данного метода актуально использовать биотехнологические методы, в частности бактерии (ризобактерии) и грибы (арбускулярные микоризные грибы), стимулирующие рост растений.

Ризофильтрация представляет собой процесс удаления поллютантов из окружающей среды (почвы, ила, донных отложений) с помощью корневой системы растения. Метод схож с фитоэкстракцией, но в данном случае тяжелые металлы остаются только в прикорневой части, не циркулируя по биомассе растения.

Более перспективным и эффективным методом фиторемедиации является фитостабилизация. Метод заключается в иммобилизации загрязняющих веществ вблизи корневой культуры растения при помощи корневых экссудатов. Инактивированные металлы могут выступать в качестве питательного субстрата для ризогенной микрофлоры местных растений [66].

Стратегия использования комбинированного метода фиторемедиации посттехногенных почв на базе фитостимуляции, биостимуляции и биоаугментации является альтернативой традиционным методам ремедиации и представляет интерес для дальнейших исследований. Актуальными являются исследования

фитостабилизирующих растений, ризогенных микроорганизмов и аборигенной микрофлоры техногенных земель для дальнейшего использования их в едином комплексе.

Выводы

В данной работе отражены основные виды загрязнителей техногенного характера и очаги их возникновения. Особую опасность представляют собой территории горнодобывающей промышленности, т. к. они негативно воздействуют на почву, биоту и население. Для восстановления таких техногенно-нарушенных территорий необходимо использовать методы рекультивации почв. К традиционным методам восстановления почв относят физические (вакуумную экстракцию, дробление, ультразвуковую и ультрафиолетовую обработку и др.), химические (экстракцию, стабилизацию, электрохимическую деструкцию), термические и биологические методы (биостимуляцию, фитоэкстракцию, ризофильтрацию, биоаугментацию). К сожалению, использование указанных методов по отдельности не эффективно, экономически невыгодно и сопровождается побочными эффектами.

Перспективно комбинировать существующие методы ремедиации загрязненных почв, т. к. их синергический эффект устраняет недостатки друг друга, приводя к максимальной переработке и удалению поллютантов. К наиболее щадящим и экономически выгодным относят биологические методы. Механизм деструкции поллютантов почвы

различен для разных видов растений, но большинство процессов осуществляется в корневой системе растения. Симбиотическое взаимодействие растений и ризогенной или эндогенной (к нарушенным почвам) микрофлоры способствует эффективному процессу восстановления и возвращения в хозяйственную деятельность земель.

Таким образом, большой потенциал имеют новые комбинированные технологии на основе фиторемедиации и микробиологической композиции, удовлетворяющей основам биоаугментации и биостимуляции, для восстановления посттехногенных ландшафтов.

Критерии авторства

Авторы были в равной степени вовлечены в написание рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges / D. Kour [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. № 20. P. 24917–24939. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13252-7>.
2. A review on catalytic-enzyme degradation of toxic environmental pollutants: Microbial enzymes / A. Saravanan [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 419. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126451>.
3. Goswami S., Manna K. Organochlorine pesticide residues and other toxic substances in salted *Tenuiolosa ilisha* L.: Northeastern part of India. Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 2. P. 201–206. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-201-206>.
4. Громов Д. А., Борисова А. В., Бахарев В. В. Пищевые аллергены и способы получения гипоаллергенных пищевых продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 232–247. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-232-247>.
5. Environmental and health impacts of air pollution: A review / I. Manisalidis [et al.] // Frontiers in Public Health. 2020. Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.
6. Azubuike C. C., Chikere C. B., Okpokwasili G. C. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2016. Vol. 32. № 11. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>.
7. Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction / I. Kuiper [et al.] // Molecular Plant – Microbe Interactions. 2004. Vol. 17. № 1. P. 6–15. <https://doi.org/10.1094/MPMI.2004.17.1.6>.
8. Материалы по рекультивации нарушенных земель. URL: <http://kuzbasseco.ru/inYE-dokumenty/materialy-po-rekultivacii-narushennyx-zemel> (дата обращения: 10.08.2021).
9. Rahman Z. An overview on heavy metal resistant microorganisms for simultaneous treatment of multiple chemical pollutants at co-contaminated sites, and their multipurpose application // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 396. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122682>.

10. Welch C., Barbour S. L., Hendry M. J. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: A systematic global review // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148798>.
11. Recycling municipal solid waste incineration slag and fly ash as precursors in low-range alkaline cements / N. Cristelo [et al.] // *Waste Management*. 2020. Vol. 104. P. 60–73. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.013>.
12. Co-disposal of municipal solid waste incineration fly ash and bottom slag: A novel method of low temperature melting treatment / G. Wong [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124438>.
13. Fractionation and leachability of Fe, Zn, Cu and Ni in the sludge from a sulphate-reducing bioreactor treating metal-bearing wastewater / P. Kousi [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. № 36. P. 35883–35894. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1905-6>.
14. Rao P., Rathod V. Valorization of food and agricultural waste: A step towards greener future // *Chemical Record*. 2018. Vol. 19. № 9. P. 1858–1871. <https://doi.org/10.1002/tcr.201800094>.
15. Oil removal from spent HDT catalyst by an aqueous method with assistance of ultrasound / Y. Yang [et al.] // *Waste Management*. 2018. Vol. 78. P. 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.055>.
16. Скугорева С. Г., Фокина А. И., Домрачева Л. И. Токсичность тяжёлых металлов для растений ячменя, почвенной и ризосферной микрофлоры // *Теоретическая и прикладная экология*. 2016. № 2. С. 32–45.
17. Ayangbenro A. S., Babalola O. O. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017. Vol. 14. № 1. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
18. Recent advances in conventional and contemporary methods for remediation of heavy metal-contaminated soils / S. Sharma [et al.] // *3 Biotech*. 2018. Vol. 8. № 4. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1237-8>.
19. Kurwadkar S. Occurrence and distribution of organic and inorganic pollutants in groundwater // *Water Environment Research*. 2019. Vol. 91. № 10. P. 1001–1008. <https://doi.org/10.1002/wer.1166>.
20. Effective removal of inorganic and organic heavy metal pollutants with poly(amino acid)-based micromotors / T. Hou [et al.] // *Nanoscale*. 2020. Vol. 12. № 8. P. 5227–5232. <https://doi.org/10.1039/c9nr09813e>.
21. Scullion J. Remediating polluted soils // *Naturwissenschaften*. 2006. Vol. 93. № 2. P. 51–65. <https://doi.org/10.1007/s00114-005-0079-5>.
22. Elemental composition of vegetables cultivated over coal-mining waste / J. J. Zocche [et al.] // *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*. 2017. Vol. 89. № 3. P. 2383–2398. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170234>.
23. Formation of PAH derivatives and increased developmental toxicity during steam enhanced extraction remediation of creosote contaminated superfund soil / L. S. D. Trine [et al.] // *Environmental Science and Technology*. 2019. Vol. 53. № 8. P. 4460–4469. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07231>.
24. Souza L. R. R., Pomarolli L. C., da Veiga M. A. M. S. From classic methodologies to application of nanomaterials for soil remediation: an integrated view of methods for decontamination of toxic metal(oid)s // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. № 10. P. 10205–10227. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08032-8>.
25. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review / S. S. Dhaliwal [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. № 2. P. 1319–1333. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1>.
26. Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities / S. R. S. Abdullah [et al.] // *Chemosphere*. 2020. Vol. 247. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125932>.
27. Quantifying soil contamination and identifying interventions to limit health risks / A. D. Gailey [et al.] // *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*. 2020. Vol. 50. № 1. <https://doi.org/10.1016/j.cppeds.2019.100740>.
28. Hölzle I. Contaminant patterns in soils from landfill mining // *Waste Management*. 2019. Vol. 83. P. 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.013>.
29. Remediation of metal-contaminated urban soil using flotation technique / G. Dermont [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2010. Vol. 408. № 5. P. 1199–1211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.036>.
30. Bisone S., Mercier G., Blais J.-F. Decontamination of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from slag-polluted soil // *Environmental Technology*. 2013. Vol. 34. № 18. P. 2633–2648. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.781231>.
31. Removal kinetics of petroleum hydrocarbons from low-permeable soil by sand mixing and thermal enhancement of soil vapor extraction / Y. Yu [et al.] // *Chemosphere*. 2019. Vol. 236. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.050>.
32. Liang C., Yang S.-Y. Foam flushing with soil vapor extraction for enhanced treatment of diesel contaminated soils in a one-dimensional column // *Chemosphere*. 2021. Vol. 285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131471>.
33. Research progress in the enhancement technology of soil vapor extraction of volatile petroleum hydrocarbon pollutants / W. Cao [et al.] // *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2021. Vol. 23. № 11. P. 1650–1662. <https://doi.org/10.1039/d1em00170a>.
34. Aerobic bioremediation of PAH contaminated soil results in increased genotoxicity and developmental toxicity / L. Chibwe [et al.] // *Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 49. № 23. P. 13889–13898. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00499>.

35. Self-cleaning of very heavily oil-polluted sites proceeds even under heavy-metal stress while involved bacteria exhibit bizarre pleomorphism / N. Ali [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020. Vol. 200. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110717>.
36. A new insight on enhanced Pb(II) removal by sludge biochar catalyst coupling with ultrasound irradiation and its synergism with phenol removal / Z.-H. Diao [et al.] // *Chemosphere*. 2021. Vol. 263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128287>.
37. Ultrasound-assisted catalytic reduction of Cr(VI) by an acid mine drainage based nZVI coupling with FeS₂ system from aqueous solutions: Performance and mechanism / Z. H. Diao [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111518>.
38. Choi J., Lee D., Son Y. Ultrasound-assisted soil washing processes for the remediation of heavy metals contaminated soils: The mechanism of the ultrasonic desorption // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 74. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105574>.
39. Sustainable remediation of mercury contaminated soils by thermal desorption / M. J. Sierra [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. № 5. P. 4898–4907. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5688-8>.
40. Dynamic immobilization of simulated radionuclide ¹³³Cs in soil by thermal treatment/vitrification with nanometallic Ca/CaO composites / S. R. Mallampati [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 139. P. 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.10.006>.
41. Gas thermal remediation of an organic contaminated site: field trial / J. Xu [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. № 6. P. 6038–6047. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-4027-2>.
42. Remediation by chemical reduction in laboratory mesocosms of three chlordecone-contaminated tropical soils / C. Mouvet [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24. № 33. P. 25500–25512. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7582-4>.
43. Remediation of artificially contaminated soil and groundwater with copper using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate recovered from phosphorus-rich wastewater / Y. Liu [et al.] // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 272. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115978>.
44. Remediation of contaminated soil and groundwater using chemical reduction and solidification/stabilization method: a case study / S.-F. Lu [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. № 10. P. 12766–12779. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11337-3>.
45. Komárek M., Vaněk A., Ettler V. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides – A review // *Environmental Pollution*. 2013. Vol. 172. P. 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.045>.
46. Zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation / A. Galdames [et al.] // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. № 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph17165817>.
47. Green remediation of As and Pb contaminated soil using cement-free clay-based stabilization/solidification / L. Wang [et al.] // *Environment International*. 2019. Vol. 126. P. 336–345. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.057>.
48. Remediation of soil contaminated with high levels of hexavalent chromium by combined chemical-microbial reduction and stabilization / L. Fu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123847>.
49. Li Q., Zhong H., Cao Y. Effective extraction and recovery of rare earth elements (REEs) in contaminated soils using a reusable biosurfactant // *Chemosphere*. 2020. Vol. 256. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127070>.
50. Saldaña M. D. A., Nagpal V., Guigard S. E. Remediation of contaminated soils using supercritical fluid extraction: a review (1994–2004) // *Environmental Technology*. 2005. Vol. 26. № 9. P. 1013–1032. <https://doi.org/10.1080/09593332608618490>.
51. Decontamination of petroleum-contaminated soils using the electrochemical technique: Remediation degree and energy consumption / C. Streche [et al.] // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21606-4>.
52. Electrochemical degradation of ibuprofen-contaminated soils over Fe/Al oxidation electrodes / C.-H. Hung [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 640–641. P. 1205–1213. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.001>.
53. Megharaj M., Naidu R. Soil and brownfield bioremediation // *Microbial Biotechnology*. 2017. Vol. 10. № 5. P. 1244–1249. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12840>.
54. Jørgensen K. S., Salminen J. M., Björklöf K. Monitored natural attenuation // *Methods in Molecular Biology* (Clifton, N.J.). 2010. Vol. 599. P. 217–233. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-439-5_14.
55. Cycoń M., Piotrowska-Seget Z. Pyrethroid-degrading microorganisms and their potential for the bioremediation of contaminated soils: A review // *Frontiers in Microbiology*. 2016. Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01463>.
56. Kästner M., Miltner A. Application of compost for effective bioremediation of organic contaminants and pollutants in soil // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 100. № 8. P. 3433–3449. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7378-y>.
57. Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Current and future perspectives / H.-T. Tran [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 753. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142250>.
58. Bioaugmentation: possible scenarios due to application of bacterial preparations for remediation of oil-contaminated soil / L. G. Bakina [et al.] // *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. Vol. 43. № 6. P. 2347–2356. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00755-4>.

59. Cycoń M., Mroziak A., Piotrowska-Seget Z. Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review // *Chemosphere*. 2017. Vol. 172. P. 52–71. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.129>.
60. Effect of consortium bioaugmentation and biostimulation on remediation efficiency and bacterial diversity of diesel-contaminated aged soil / D. Chaudhary [et al.] // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021. Vol. 37. № 3. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-02999-3>.
61. Haferburg G., Kothe E. Metallomics: lessons for metalliferous soil remediation // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010. Vol. 87. № 4. P. 1271–1280. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2695-z>.
62. Phytoextraction and phytostabilization potential of plants grown in the vicinity of heavy metal-contaminated soils: A case study at an industrial town site / B. Lorestani [et al.] // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013. Vol. 185. № 12. P. 10217–10223. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3326-9>.
63. Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review / V. S. Kanwar [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. № 36. P. 44835–44860. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10713-3>.
64. Копчик Г. Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // *Почвоведение*. 2014. № 9. С. 1113–1130. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1409007X>.
65. Nero B. F. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils with two plant species: *Jatropha curcas* and *Vetiveria zizanioides* at Ghana Manganese Company Ltd // *International Journal of Phytoremediation*. 2021. Vol. 23. № 2. P. 171–180. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1803204>.
66. Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas / M. Radziemska [et al.] // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017. Vol. 15. № 1. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010024>.

References

1. Kour D, Kaur T, Devi R, Yadav A, Singh M, Joshi D, et al. Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(20):24917–24939. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13252-7>.
2. Saravanan A, Kumar PS, Vo D-VN, Jeevanantham S, Karishma S, Yaashikaa PR. A review on catalytic-enzyme degradation of toxic environmental pollutants: Microbial enzymes. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;419. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126451>.
3. Goswami S, Manna K. Organochlorine pesticide residues and other toxic substances in salted *Tenualosa ilisha* L.: Northeastern part of India. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(2):201–206. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-201-206>.
4. Gromov DA, Borisova AV, Bakharev VV. Food allergens and methods for producing hypoallergenic foods. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(2):232–247. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-232-247>.
5. Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*. 2020;8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.
6. Azubuike CC, Chikere CB, Okpokwasili GC. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2016;32(11). <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>.
7. Kuiper I, Lagendijk EL, Bloemberg GV, Lugtenberg BJJ. Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction. *Molecular Plant – Microbe Interactions*. 2004;17(1):6–15. <https://doi.org/10.1094/MPMI.2004.17.1.6>.
8. Материалы по рекул'tиватсии нарушennykh zemel' [Materials on reclamation of disturbed lands] [Internet]. [cited 2021 Aug 10]. Available from: <http://kuzbasseco.ru/inye-dokumenty/materialy-po-rekultivacii-narushennyx-zemel>.
9. Rahman Z. An overview on heavy metal resistant microorganisms for simultaneous treatment of multiple chemical pollutants at co-contaminated sites, and their multipurpose application. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;396. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122682>.
10. Welch C, Barbour SL, Hendry MJ. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: A systematic global review. *Science of the Total Environment*. 2021;795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148798>.
11. Cristelo N, Segadães L, Coelho J, Chaves B, Sousa NR, de Lurdes Lopes M. Recycling municipal solid waste incineration slag and fly ash as precursors in low-range alkaline cements. *Waste Management*. 2020;104:60–73. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.013>.
12. Wong G, Gan M, Fan X, Ji Z, Chen X, Wang Z. Co-disposal of municipal solid waste incineration fly ash and bottom slag: A novel method of low temperature melting treatment. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124438>.
13. Kousi P, Remoundaki E, Hatzikioseyan A, Korkovelou V, Tsezos M. Fractionation and leachability of Fe, Zn, Cu and Ni in the sludge from a sulphate-reducing bioreactor treating metal-bearing wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(36):35883–35894. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1905-6>.
14. Rao P, Rathod V. Valorization of food and agricultural waste: A step towards greener future. *Chemical Record*. 2018;19(9):1858–1871. <https://doi.org/10.1002/tcr.201800094>.

15. Yang Y, Cao T, Xiong Y, Huang G, Wang W, Liu Q, et al. Oil removal from spent HDT catalyst by an aqueous method with assistance of ultrasound. *Waste Management*. 2018;78:595–601. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.055>.
16. Skugoreva SG, Fokina AI, Domracheva LI. Heavy metal toxicity and barley plants, soil and rhizosphere microflora. *Theoretical and Applied Ecology*. 2016;(2):32–45. (In Russ.).
17. Ayangbenro AS, Babalola OO. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
18. Sharma S, Tiwari S, Hasan A, Saxena V, Pandey LM. Recent advances in conventional and contemporary methods for remediation of heavy metal-contaminated soils. *3 Biotech*. 2018;8(4). <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1237-8>.
19. Kurwadkar S. Occurrence and distribution of organic and inorganic pollutants in groundwater. *Water Environment Research*. 2019;91(10):1001–1008. <https://doi.org/10.1002/wer.1166>.
20. Hou T, Yu S, Zhou M, Wu M, Liu J, Zheng X, et al. Effective removal of inorganic and organic heavy metal pollutants with poly(amino acid)-based micromotors. *Nanoscale*. 2020;12(8):5227–5232. <https://doi.org/10.1039/c9nr09813e>.
21. Scullion J. Remediating polluted soils. *Naturwissenschaften*. 2006;93(2):51–65. <https://doi.org/10.1007/s00114-005-0079-5>.
22. Zocche JJ, Rohr P, Damiani AP, Leffa DD, Martins MC, Zocche CM, et al. Elemental composition of vegetables cultivated over coal-mining waste. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*. 2017;89(3):2383–2398. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170234>.
23. Trine LSD, Davis EL, Roper C, Truong L, Tanguay RL, Simonich SLM. Formation of PAH derivatives and increased developmental toxicity during steam enhanced extraction remediation of creosote contaminated superfund soil. *Environmental Science and Technology*. 2019;53(8):4460–4469. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07231>.
24. Souza LRR, Pomarolli LC, da Veiga MAMS. From classic methodologies to application of nanomaterials for soil remediation: an integrated view of methods for decontamination of toxic metal(oid)s. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(10):10205–10227. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08032-8>.
25. Dhaliwal SS, Singh J, Taneja PK, Mandal A. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(2):1319–1333. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1>.
26. Abdullah SRS, Al-Baldawi IA, Almansoori AF, Purwanti IF, Al-Sbani NH, Sharuddin SSN. Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities. *Chemosphere*. 2020;247. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125932>.
27. Gailey AD, Schachter AE, Egendorf SP, Mielke HW. Quantifying soil contamination and identifying interventions to limit health risks. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*. 2020;50(1). <https://doi.org/10.1016/j.cpps.2019.100740>.
28. Hölzle I. Contaminant patterns in soils from landfill mining. *Waste Management*. 2019;83:151–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.013>.
29. Dermont G, Bergeron M, Richer-Lafleche M, Mercier G. Remediation of metal-contaminated urban soil using flotation technique. *Science of the Total Environment*. 2010;408(5):1199–1211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.036>.
30. Bisone S, Mercier G, Blais J-F. Decontamination of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from slag-polluted soil. *Environmental Technology*. 2013;34(18):2633–2648. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.781231>.
31. Yu Y, Liu L, Yang C, Kang W, Yan Z, Zhu Y, et al. Removal kinetics of petroleum hydrocarbons from low-permeable soil by sand mixing and thermal enhancement of soil vapor extraction. *Chemosphere*. 2019;236. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.050>.
32. Liang C, Yang S-Y. Foam flushing with soil vapor extraction for enhanced treatment of diesel contaminated soils in a one-dimensional column. *Chemosphere*. 2021;285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131471>.
33. Cao W, Zhang L, Miao Y, Qiu L. Research progress in the enhancement technology of soil vapor extraction of volatile petroleum hydrocarbon pollutants. *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2021;23(11):1650–1662. <https://doi.org/10.1039/d1em00170a>.
34. Chibwe L, Geier MC, Nakamura J, Tanguay RL, Aitken MD, Simonich SLM. Aerobic bioremediation of PAH contaminated soil results in increased genotoxicity and developmental toxicity. *Environmental Science and Technology*. 2015;49(23):13889–13898. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00499>.
35. Ali N, Khanafer M, Al-Awadhi H, Radwan S. Self-cleaning of very heavily oil-polluted sites proceeds even under heavy-metal stress while involved bacteria exhibit bizarre pleomorphism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020;200. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110717>.
36. Diao Z-H, Dong F-X, Yan L, Chen Z-L, Guo P-R, Xia X-J, et al. A new insight on enhanced Pb(II) removal by sludge biochar catalyst coupling with ultrasound irradiation and its synergism with phenol removal. *Chemosphere*. 2021;263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128287>.

37. Diao ZH, Yan L, Dong F-X, Chen Z-L, Guo P-R, Qian W, et al. Ultrasound-assisted catalytic reduction of Cr(VI) by an acid mine drainage based nZVI coupling with FeS₂ system from aqueous solutions: Performance and mechanism. *Journal of Environmental Management*. 2021;278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111518>.
38. Choi J, Lee D, Son Y. Ultrasound-assisted soil washing processes for the remediation of heavy metals contaminated soils: The mechanism of the ultrasonic desorption. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;74. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105574>.
39. Sierra MJ, Millán R, López FA, Alguacil FJ, Cañadas I. Sustainable remediation of mercury contaminated soils by thermal desorption. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23(5):4898–4907. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5688-8>.
40. Mallampati SR, Mitoma Y, Okuda T, Simion C, Lee BK. Dynamic immobilization of simulated radionuclide ¹³³Cs in soil by thermal treatment/vitrification with nanometallic Ca/CaO composites. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015;139:118–124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.10.006>.
41. Xu J, Wang F, Sun C, Zhang X, Zhang Y. Gas thermal remediation of an organic contaminated site: field trial. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26(6):6038–6047. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-4027-2>.
42. Mouvet C, Dictor M-C, Bristeau S, Breeze D, Mercier A. Remediation by chemical reduction in laboratory mesocosms of three chlordecone-contaminated tropical soils. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017;24(33):25500–25512. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7582-4>.
43. Liu Y, Zhang R, Sun Z, Shen Q, Li Y, Wang Y, et al. Remediation of artificially contaminated soil and groundwater with copper using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate recovered from phosphorus-rich wastewater. *Environmental Pollution*. 2021;272. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115978>.
44. Lu S-F, Wu Y-L, Chen Z, Li T, Shen C, Xuan L-K, et al. Remediation of contaminated soil and groundwater using chemical reduction and solidification/stabilization method: a case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(10):12766–12779. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11337-3>.
45. Komárek M, Vaněk A, Ettler V. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides – A review. *Environmental Pollution*. 2013;172:9–22. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.045>.
46. Galdames A, Ruiz-Rubio L, Orueta M, Sánchez-Arzálluz M, Vilas-Vilela JL. Zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph17165817>.
47. Wang L, Cho D-W, Tsang DCW, Cao X, Hou D, Shen Z, et al. Green remediation of As and Pb contaminated soil using cement-free clay-based stabilization/solidification. *Environment International*. 2019;126:336–345. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.057>.
48. Fu L, Feng A, Xiao J, Wu Q, Ye Q, Peng S. Remediation of soil contaminated with high levels of hexavalent chromium by combined chemical-microbial reduction and stabilization. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123847>.
49. Li Q, Zhong H, Cao Y. Effective extraction and recovery of rare earth elements (REEs) in contaminated soils using a reusable biosurfactant. *Chemosphere*. 2020;256. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127070>.
50. Saldaña MDA, Nagpal V, Guigard SE. Remediation of contaminated soils using supercritical fluid extraction: a review (1994–2004). *Environmental Technology*. 2005;26(9):1013–1032. <https://doi.org/10.1080/09593332608618490>.
51. Streche C, Cocârță DM, Istrate I-A, Badea AA. Decontamination of petroleum-contaminated soils using the electrochemical technique: Remediation degree and energy consumption. *Scientific Reports*. 2018;8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21606-4>.
52. Hung C-H, Yuan C, Wu M-H, Chang Y-C. Electrochemical degradation of ibuprofen-contaminated soils over Fe/Al oxidation electrodes. *Science of the Total Environment*. 2018;640–641:1205–1213. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.001>.
53. Megharaj M, Naidu R. Soil and brownfield bioremediation. *Microbial Biotechnology*. 2017;10(5):1244–1249. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12840>.
54. Jørgensen KS, Salminen JM, Björklöf K. Monitored natural attenuation. *Methods in Molecular Biology* (Clifton, N.J.). 2010;599:217–233. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-439-5_14.
55. Cycoń M, Piotrowska-Seget Z. Pyrethroid-degrading microorganisms and their potential for the bioremediation of contaminated soils: A review. *Frontiers in Microbiology*. 2016;7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01463>.
56. Kästner M, Miltner A. Application of compost for effective bioremediation of organic contaminants and pollutants in soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016;100(8):3433–3449. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7378-y>.
57. Tran H-T, Lin C, Bui X-T, Ngo H-H, Cheruiyot NK, Hoang H-G, et al. Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Current and future perspectives. *Science of the Total Environment*. 2021;753. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142250>.
58. Bakina LG, Chugunova MV, Polyak YM, Mayachkina NV, Gerasimov AO. Bioaugmentation: possible scenarios due to application of bacterial preparations for remediation of oil-contaminated soil. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021;43(6):2347–2356. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00755-4>.

59. Cycoń M, Mroziak A, Piotrowska-Seget Z. Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review. *Chemosphere*. 2017;172:52–71. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.129>.
60. Chaudhary D, Bajagain R, Jeong S-W, Kim J. Effect of consortium bioaugmentation and biostimulation on remediation efficiency and bacterial diversity of diesel-contaminated aged soil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021;37(3). <https://doi.org/10.1007/s11274-021-02999-3>.
61. Haferburg G, Kothe E. Metallomics: lessons for metalliferous soil remediation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010;87(4):1271–1280. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2695-z>.
62. Lorestani B, Yousefi N, Cheraghi M, Farmany A. Phytoextraction and phytostabilization potential of plants grown in the vicinity of heavy metal-contaminated soils: A case study at an industrial town site. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013;185(12):10217–10223. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3326-9>.
63. Kanwar VS, Sharma A, Srivastav AL, Rani L. Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(36):44835–44860. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10713-3>.
64. Koptsik GN. Problems and prospects concerning the phytoremediation of heavy metal polluted soils: A review. *Eurasian Soil Science*. 2014;(9):1113–1130. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X1409007X>.
65. Nero BF. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils with two plant species: *Jatropha curcas* and *Vetiveria zizanioides* at Ghana Manganese Company Ltd. *International Journal of Phytoremediation*. 2021;23(2):171–180. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1803204>.
66. Radziemska M, Koda E, Bilgin A, Vaverková MD. Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;15(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph15010024>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-819-831>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Активность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в условиях стресс-провокации плодово-ягодными экстрактами



С. С. Кузьмина¹, Л. А. Козубаева¹, Е. Ю. Егорова^{1,*},
Б. М. Кулуштаева², Ф. Х. Смольникова²

¹ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова^{ROR}, Барнаул, Россия

² Университет имени Шакарима города Семей, Семей, Республика Казахстан

Поступила в редакцию: 13.08.2021

Принята после рецензирования: 10.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: egorovaeyu@mail.ru

© С. С. Кузьмина, Л. А. Козубаева, Е. Ю. Егорова, Б. М. Кулуштаева, Ф. Х. Смольникова, 2021

Аннотация.

Введение. Плодово-ягодные экстракты характеризуются наличием биологически активных компонентов и повышенным содержанием кислот, способных оказывать подавляющее либо активирующее влияние на рост и активность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Целью работы стала оценка влияния плодово-ягодных экстрактов на активность хлебопекарных дрожжей *S. cerevisiae* и обусловленные этим изменения биохимических свойств пшеничного теста.

Объекты и методы исследования. Хлебопекарные дрожжи «Экстра» и сухие плодово-ягодные экстракты ягод малины обыкновенной, плодов аронии черноплодной, облепихи крушиновидной и шиповника обыкновенного (ООО «Вистерра», Алтайский край). В работе применяли стандартные и отраслевые методы контроля сырья и полуфабрикатов хлебопекарного производства, а также стандартные методы микробиологического анализа.

Результаты и их обсуждение. Экстракт малины оказывает угнетающее действие на рост и размножение дрожжей, выраженное при введении 3–4 % этого экстракта: через 1 ч экспозиции количество дрожжевых клеток в суспензии с экстрактом малины уменьшается в 1,5–2 раза по сравнению с контролем. Стимулирующий эффект экстракта облепихи привел к усилению почкования дрожжевых клеток (до 40 % по сравнению с контролем). Экстракты аронии и шиповника практически не оказывали влияния на скорость почкования дрожжевых клеток, но в тесте с экстрактом аронии в дозировках 2 и 3 % брожение теста протекало активнее. Об этом свидетельствуют высокие значения подъемной силы: через 150 мин экспозиции подъемная сила составляла 2 мин против 3 мин на контроле. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что использование плодово-ягодных экстрактов вызывает закономерное повышение кислотности теста, что обуславливает изменение активности почкования дрожжевых клеток. При введении экстрактов облепихи повышение кислотности настолько значительно (до 4,24 ед. pH), что это можно расценивать как кислотный стресс, вызвавший усиление активности почкования дрожжевых клеток ($1,53 \times 10^6$ – $1,55 \times 10^6$ против $1,10 \times 10^6$ клеток в 1 см³ суспензии на контроле). Наименьшая активность почкования выявлена в вариантах с добавлением экстрактов малины (снижение количества дрожжевых клеток, по сравнению с контролем, до 1,5–2 раз через час брожения), что обусловлено наличием в малине специфических компонентов с подтвержденным фунгистатическим действием.

Выводы. Результаты исследования могут быть использованы в практической деятельности хлебопекарных предприятий для регуляции активности дрожжевого брожения и продолжительности созревания теста введением рассматриваемых плодово-ягодных экстрактов.

Ключевые слова. Тесто, кислотность, pH, брожение, дрожжи, почкование, облепиха, малина, арония, шиповник

Финансирование. Работа выполнена на базе ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ)^{ROR}.

Для цитирования: Активность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в условиях стресс-провокации плодово-ягодными экстрактами / С. С. Кузьмина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 819–831. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-819-831>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Effect of Berry Extracts on *Saccharomyces cerevisiae* Yeast

Svetlana S. Kuzmina¹, Lyudmila A. Kozubaeva¹, Elena Yu. Egorova^{1,*},
Botakoz M. Kulushtayeva², Farida Kh. Smolnikova²

¹ Polzunov Altai State Technical University , Barnaul, Russia

² Shakarim Semey University, Semey, Republic of Kazakhstan

Received: August 13, 2021

Accepted in revised form: November 10, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: egorovaeyu@mail.ru

© S.S. Kuzmina, L.A. Kozubaeva, E.Yu. Egorova, B.M. Kulushtayeva, F.Kh. Smolnikova, 2021

Abstract.

Introduction. Fruit and berry extracts contain biologically active components and acids that can inhibit or activate *Saccharomyces cerevisiae*. The research objective was to study the effect of berry extracts on the activity of baking yeast *S. cerevisiae* and the biochemical properties of wheat dough.

Study objects and methods. The experiment featured baking yeast *Extra* and dry berry extracts of raspberries, aronia, sea buckthorn, and rosehip (LLC Wisterra, Altai Region). The study involved standard and industry-specific control methods of raw materials and semi-finished bakery products, as well as some standard methods of microbiological analysis.

Results and discussion. The raspberry extract (3–4%) suppressed the growth and reproduction of the yeast: after 1 h of exposure, the yeast cell count dropped by 1.5–2 times compared to the control sample. The stimulating effect of the sea buckthorn extract increased the growth rate of yeast cells (up to 40% compared to the control). The extracts of aronia and rosehip had practically no effect on the growth rate of yeast cells. However, 2–3% aronia extract increased the fermentation of the dough, as evidenced by a higher dough fermentation property, which was 2 min versus 3 min at the control after 150 min of exposure. Fruit and berry extracts caused a natural increase in the acidity of the dough, which affected the growth rate of yeast cells. Sea buckthorn extracts increased the acidity so much (up to 4.24 pH units) that it could be regarded as acid stress, which increased the growth rate of yeast cells (1.53×10^6 – 1.55×10^6 vs. 1.10×10^6 in 1 mL of control sample). The lowest growth rate was detected in the samples with the raspberry extract, which is known to have a strong fungistatic effect: the count of yeast cells decreased by 1.5–2 times after an hour of fermentation.

Conclusion. Berry extracts can be of practical interest to bakery enterprises as they help to control yeast fermentation and dough maturation time.

Keywords. Dough, acidity, pH, fermentation, yeast, budding, sea buckthorn, raspberry, aronia, rosehip

Funding. The research was performed on the premises of the Polzunov Altai State Technical University (AltSTU) .

For citation: Kuzmina SS, Kozubaeva LA, Egorova EYu, Kulushtayeva BM, Smolnikova FK. Effect of Berry Extracts on *Saccharomyces cerevisiae* Yeast. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):819–831. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-819-831>.

Введение

Брожение теста – один из важнейших этапов хлебопекарного производства. Именно под влиянием ферментов хлебопекарных дрожжей формируется основа пищевой ценности готовой продукции – биохимический состав компонентов теста. Поэтому поиск новых биотехнологических решений, позволяющих управлять ходом процесса брожения, не теряет своей актуальности и прикладного значения.

В последние годы набирает популярность введение в состав продуктов и напитков брожения экстрактов растительного сырья, позволяющих обогатить готовую продукцию различными группами природных биологически активных компонентов [1–4]. Теоретически, в условиях хлебопекарного производства введение плодово-ягодных экстрактов должно позволить регулировать адаптационные возможности клеток дрожжей вида *Saccharomyces cerevisiae* к стрессовым условиям (повышенная кислотность, нагрев), поскольку подтверждено стимулирующее действие антиоксидантов и

полифенолов на активность дрожжевых клеток [5]. Однако многие виды экстрактов, в частности плодово-ягодные, характеризуются не только значительным содержанием биологически активных компонентов и сбраживаемых углеводов, но и повышенным содержанием кислот, способных оказывать подавляющее действие на рост и активность дрожжей *S. cerevisiae*. Сегодня данный вопрос практически не изучен, как не установлено и то, какие типы кислот растительного сырья будут проявлять в отношении дрожжей *S. cerevisiae* подавляющее либо активирующее действие.

Из факторов, способных оказывать стрессовое воздействие на физиологическое состояние дрожжевой популяции, сопровождающееся изменением направления и интенсивности происходящих биохимических процессов, указываются термический, осмотический, оксидативный, этанольный и кислотный [6–8]. В качестве основных стресс-провокаторов активно исследуются вещества, типичные для условий пищевых производств, – этанол,

сахароза, хлористый натрий и органические кислоты. Их природа и концентрация определяют степень экспрессии генов дрожжевых клеток и связанных с этим изменений метаболических процессов [9–13].

Постоянным результатом стрессовых реакций микроорганизмов является снижение регуляции или остановка клеточного цикла, что приводит к временному замедлению роста клеток [14]. Наряду с этим отмечено, что условия осмотического и этанольного стресса провоцируют активизацию процесса накопления запасных питательных веществ в дрожжевых клетках. Это сопровождается изменением формы клеток, формы и размера колоний, их поверхности, профиля и цвета [13]. Восстановление адаптационных возможностей дрожжевых клеток сопровождается как возвращением их объема, так и скоростью роста биомассы [15]. Одним из следствий этого можно считать то, что при производственных факторах стресса, переживаемых пивными дрожжами *S. cerevisiae*, наблюдается рост числа почкующихся клеток, образование новых включений и спор, усиление накопления запасных питательных веществ [8].

Роль органических кислот в формировании устойчивости дрожжевых клеток *S. cerevisiae* к производственным факторам стресса практически не изучена. Известно лишь, что механизмы адаптации клеток микроорганизмов к низким pH основаны на изменениях в последовательности нуклеотидов в хромосомной ДНК [16]. Как следствие, низкие значения pH среды провоцируют изменение клеточного метаболизма дрожжей, в том числе изменение состава белков, ответственных за снижение темпов роста клеток [17]. Вместе с тем различные классы кислот, характерных для растительного сырья, в отношении клеток *S. cerevisiae* должны проявлять себя по-разному.

Одной из первых реакций дрожжевых клеток на кислотный стресс считается дисфункция митохондрий и резкое снижение скорости дыхания. Общей реакцией дрожжей *S. cerevisiae* на кислотный стресс являются накопление триацилглицеринов и деградация стеридов, уменьшение синтеза фосфатидных кислот, фосфатидилхолина, фосфатидилсерина и фосфатидилэтаноламина на фоне повышения синтеза фосфатидилинозитола и эргостерола, играющих ключевую роль в усилении толерантности дрожжевых клеток к органическим кислотам [18]. Можно предположить, что степень иницирования стресса, как и «токсичность» органических кислот растительного сырья (как слабых кислот), зависит как от pH, так и от константы диссоциации кислоты, т. к. через мембрану клетки проходит недиссоциированная форма кислот. Используемые в пищевых производствах слабые органические кислоты, что показано на примере молочной и уксусной кислот, вызывают изменение структуры

и состава клеточной мембраны дрожжевых клеток в результате перестройки углеводных и фосфолипидных фрагментов. В самих дрожжевых клетках при этом наблюдается агрегация белковых компонентов, что рассматривается как одна из основных причин ускорения роста дрожжей в условиях кислотного стресса [7]. Введение в дрожжевую суспензию янтарной кислоты – естественного метаболита цикла Кребса – сопровождается увеличением потребления дрожжевыми клетками аминокислот и интенсификацией процесса брожения [19]. Однако после добавления янтарной кислоты также отмечается неблагоприятное для дрожжей изменение pH системы, оказывающее влияние на состав побочных продуктов брожения [20].

При низких значениях pH стресс в дрожжевой популяции более выражен. В качестве оптимального для роста промышленных штаммов дрожжей *S. cerevisiae* названо значение pH 4,5. Понижение pH до 3,5–3,0 относится к экстремальным условиям [8].

Ароматические оксикислоты являются типичными представителями полифенольных соединений растительного сырья. Однако многие из них считаются токсичными для микроорганизмов. Например, доказаны антибиотические свойства салициловой, бензойной и сорбиновой кислот [21]. Феруловая, кумаровая и бензойная кислоты ингибируют рост дрожжевых клеток [22]. Относительная токсичность ароматических кислот зависит от их растворимости и степени диссоциации. При низком pH (3,5) их растворимость снижается, но ингибирующий эффект довольно высок. При высоких значениях pH клетки способны переносить высокую концентрацию отдельно взятых ароматических кислот [23].

Ассортимент перерабатываемого растительного сырья в регионах Западной Сибири очень широк. В различных формах продукции, в том числе в форме удобных для пищевых производств легко восстанавливаемых экстрактов, представлены плоды и ягоды семейств *Rosaceae* (рябина, шиповник, малина, черемуха и пр.), *Ericaceae* (брусника, клюква, черника и др.), *Elaeagnaceae* (облепиха), *Grossulariaceae* (смородина, крыжовник), *Caprifoliaceae* (жимолость) и многие другие. Современные технологии производства экстрактов эффективны в сохранении биологически активных компонентов перерабатываемого сырья. Предприятия Алтайского края (ООО «Вистерра», ООО «КИТ ПЛЮС») производят сухие экстракты из плодово-ягодного и лекарственно-технического сырья методом импульсно-вакуумной сушки при температуре не более 30 °С, обеспечивающей стабильность природных форм биологически активных веществ. Такие экстракты используются в производстве безалкогольных напитков и биологически активных добавок к пище, производстве кондитерских изделий, косметических средств и других отраслях.

Представители каждого вида плодово-ягодного сырья перечисленных семейств обладают сложным составом биологически активных веществ, но наличие кислот является их общим характерным признаком. В ягодах малины идентифицированы хлорогеновая, кофейная, салициловая, протокатехиновая, галловая и эллаговая кислоты; ди- и трикарбоновые кислоты представлены лимонной (1,24–2,02 %), яблочной (0,06–0,2 %) и янтарной 0,01–0,05 %) кислотами [24, 25]. В плодах облепихи подтверждено присутствие яблочной, лимонной, галактуроновой, винной и хинной кислот [26]. В плодах аронии преобладающими являются яблочная и лимонная кислоты. В меньшем количестве присутствуют уксусная, янтарная и сорбиновая кислоты, идентифицированы также винная, щавелевая, аскорбиновая и хлорогеновые кислоты. По разным оценкам суммарное содержание кислот в свежих плодах составляет от 1,5 до 5 % [27, 28]. В плодах шиповника, как и в составе получаемых из них экстрактов, преобладает аскорбиновая кислота, обнаружены яблочная и лимонная кислоты, из фенолокислот присутствуют хлорогеновая и феруловая кислоты, а также есть галловая, кафтаровая, кофейная, 4-кофеоилхинная и п-кумаровая кислоты [29, 30].

Экстракция остается одним из самых надежных методов извлечения биологически активных веществ из растительного сырья [31]. В плодово-ягодном сырье и получаемых из него экстрактах представлены кислоты разных типов и сопутствующие им, но различающиеся по механизму действия в отношении дрожжей, биологически активные компоненты. Это ставит вопрос о необходимости изучения возможности регуляции активности дрожжевого брожения применением плодово-ягодных экстрактов в технологических целях. Исследование данного вопроса начато недавно и относится к спиртовому типу брожения. Установлено, что компоненты малины обыкновенной (*Rubus idaeus*) способствуют повышению устойчивости дрожжевых клеток к накапливающемуся этанолу, что позволяет добиться высокого содержания спирта в продуктах брожения [32]. Теоретически, подобное действие могут проявлять и компоненты продуктов

переработки других видов плодово-ягодного сырья. Однако следует учитывать вероятность того, что в отношении хлебопекарных дрожжей *S. cerevisiae* как компоненты малины, так и активные компоненты других видов плодово-ягодного сырья могут проявлять иное действие.

К настоящему времени показано, что внесение продуктов переработки плодово-ягодного сырья в тесто не только способствует обогащению готовых изделий, но и дает дополнительное питание для дрожжевых клеток [33, 34]. Целью работы стала оценка влияния плодово-ягодных экстрактов на активность хлебопекарных дрожжей *S. cerevisiae* и обусловленные этим изменения некоторых биохимических свойств пшеничного теста.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования в работе выступали прессованные хлебопекарные дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* «Экстра» производства АО «Дрожжевой завод «Пензенский» (г. Пенза; ТУ 9182-001-47918107-09) и сухие плодово-ягодные экстракты ягод малины обыкновенной, плодов аронии черноплодной, облепихи крушиновидной и шиповника обыкновенного производства ООО «Вистерра» (Алтайский край, с. Алтайское; СТО 20997969-003-2014). Все используемые в работе экстракты представляют собой сухие мелкодисперсные порошки с соответствующими исходному сырью интенсивно выраженным цветом (рис. 1) и вкусом.

Согласно НТД производителя из физико-химических показателей для сухих плодово-ягодных экстрактов регламентируются влажность (не более 10,0 %) и массовая доля нерастворимых в воде веществ (не более 5,0 %). Для отдельных наименований контролируются массовая доля органических кислот (от не менее 2,5 % для экстракта из плодов аронии до не менее 8,0 % для экстракта плодов облепихи) и содержание специфичных биологически активных веществ: в экстракте плодов шиповника – не менее 3 % масс. аскорбиновой кислоты.

Влажность экстрактов определяли термогравиметрическим методом по ГОСТ 28561-90. Зольность экстрактов определяли по ГОСТ 25555.4-91.



Экстракт плодов аронии



Экстракт плодов облепихи



Экстракт ягод малины



Экстракт плодов шиповника

Рисунок 1. Сухие плодово-ягодные экстракты

Figure 1. Dry berry extracts

Кислотность экстрактов в пересчете на яблочную кислоту устанавливали методом потенциометрического титрования по ГОСТ ISO 750-2013. Активную кислотность (рН) приготовленных растворов экстрактов определяли потенциометрически по ГОСТ 26188-2016 с использованием лабораторного рН-метра Нитрон-рН.

Согласно результатам проведенных лабораторных исследований фактическая влажность экстрактов составила от 2,3 до 6,0 % (табл. 1). Порошки имели хорошую сыпучесть. Экстракт шиповника, несмотря на самую высокую влажность, при работе с ним легко распылялся. Отмечена высокая гигроскопичность экстракта из аронии: уже через несколько минут после вскрытия упаковки и контакта с воздухом (например, при дозировании) на поверхности порошка появлялась уплотненная, но хрупкая корочка.

В ходе экспериментальных исследований изучали реакцию дрожжевых клеток *S. cerevisia* на рН среды, обусловленную растворенными в холодной (температура 22 ± 1 °С) кипяченой водопроводной воде экстрактами малины, шиповника, облепихи и аронии. В предварительных исследованиях было выявлено выраженное агрессивное воздействие рассматриваемых плодово-ягодных экстрактов на дрожжи *S. cerevisia*, поэтому в данной работе использовали минимальные концентрации экстрактов. Готовили 2, 3 и 4 % водные растворы экстрактов, в которые добавляли дрожжи в количестве 0,1 % по массе. Контролем служила водно-дрожжевая смесь (суспензия) без введения плодово-ягодных экстрактов. Полученные дрожжевые суспензии выдерживали при температуре 22 ± 1 °С в течение 150 мин (температура и продолжительность созревания теста при безопасном способе приготовления). Через каждые 30 мин оценивали реакцию дрожжевых клеток и подсчитывали их общее количество с помощью счетной камеры Горяева. Дрожжевую клетку с почкой считали за одну особь. Анализ суспензий дрожжевых клеток осуществляли на лабораторном микроскопе Микромед 1, оснащенный окуляром с камерой Digital Camera for Microscope DCM-130E (USB 2.0) 1.3M pixels CMOS chip. Фотографии обработаны с использованием компьютерной программы Scope Photo/×86/Scope.exe.

Бродильную активность дрожжей в тесте с добавлением исследуемых экстрактов оценивали косвенными методами по изменению кислотности и подъемной силы теста.

Активную кислотность теста в процессе брожения определяли потенциометрически с использованием рН-метра Нитрон-рН. Кислотность теста определяли по ГОСТ ISO 750-2013 методом потенциометрического титрования навески теста массой $5 \pm 0,01$ г, гомогенизированной до состояния однородной суспензии перетиранием с добавлением 50 см^3 дистиллированной воды. Процедуру титрования

заканчивали при достижении пробой 7,0–7,2 ед. рН, после чего расчетно-графическим методом определяли величину кислотности теста.

Определение подъемной силы теста проводили по методике ГОСТ Р 54731-2011 с использованием муки пшеничной хлебопекарной первого сорта. Образцы теста помещали для брожения в термостат при температуре 35 ± 1 °С. Через каждые 30 мин производили отбор проб теста (две пробы по 10 г) для анализа подъемной силы. Тесто закатывали в шарик и опускали в стакан с водопроводной водой, который помещали в термостат (35 ± 1 °С). Величину подъемной силы рассчитывали как разницу во времени между погружением в воду и всплыванием шарика теста.

Экспериментальные данные обрабатывали статистическими методами анализа. Определение влажности, зольности, титруемой и активной кислотности экстрактов проводили в 3-кратной повторности. Определение общей и активной кислотности, подъемной силы проводили в 4-кратной повторности. Почкование клеток анализировали в 4-кратной повторности.

Результаты и их обсуждение

Биохимия процессов брожения тесно взаимосвязана с состоянием клеток микроорганизмов, реализующих это брожение. Проявляемая дрожжами *Saccharomyces cerevisia* бродильная активность, определяющая продолжительность основного этапа созревания теста, зависит от количества и морфологии дрожжевых клеток. Размеры, форма и активность ферментов дрожжевых клеток напрямую зависят от созданных для них условий культивирования [16].

К условиям культивирования относят и влияние рН, поскольку его низкие значения могут быть одной из ведущих причин изменения клеточного метаболизма дрожжей и снижения темпов роста клеток [17]. Нормой рН для воды из централизованных систем водоснабжения, используемой хлебопекарными предприятиями для замеса теста, согласно СанПиН 1.2.3685-21, считаются пределы от 6 до 9 ед. рН.

В связи с возможностью влияния экстрактов на начальное значение кислотности теста оценена активная кислотность водных растворов, получаемых на основе сухих плодово-ягодных экстрактов. Согласно результатам потенциометрического анализа наиболее кислую среду создает экстракт из плодов облепихи – 3,41 ед. рН. Все четыре рассматриваемых вида плодово-ягодных экстрактов при концентрации 4 % дают значения рН, которые экстремальны для промышленных штаммов дрожжей *S. cerevisiae*, – менее 4,5 ед. рН, а именно 3,41–3,82 ед. рН (табл. 1) [8]. В составе кислот всех плодово-ягодных экстрактов количественно преобладают двухосновная яблочная

Таблица 1. Физико-химические показатели плодово-ягодных экстрактов и pH их растворов

Table 1. Berry extracts: physicochemical properties and pH in solutions

Экстракт	Показатели качества сухих экстрактов			pH 4 % раство- ров, ед. pH
	Влажность, %	Зольность, %	Кислотность (в пересчете на яблочную кислоту), %	
Плодов аронии	4,1 ± 0,1	2,51 ± 0,03	8,6 ± 0,2	3,62 ± 0,05
Плодов облепихи	2,3 ± 0,1	1,24 ± 0,02	10,3 ± 0,2	3,41 ± 0,03
Ягод малины	5,0 ± 0,1	1,98 ± 0,02	8,4 ± 0,1	3,59 ± 0,05
Плодов шиповника	6,0 ± 0,1	3,93 ± 0,05	9,1 ± 0,2	3,82 ± 0,04

и трехосновная лимонная кислоты [24–30]. Близкие значения pH приготовленных растворов экстрактов следует связывать с одним порядком диссоциации этих кислот и обусловленными ими относительно равными концентрациями протонов H^+ в растворах.

Необходимо отметить, что четкой корреляции между общей кислотностью сухих экстрактов и активной кислотностью приготовленных из них растворов не наблюдается. В ожидаемую закономерность (чем выше общая кислотность экстракта, тем более «кислые» приготовленные из них растворы) не попадают растворы экстракта шиповника. Это следует связывать с отличающимся составом производных карбоновых кислот в данном экстракте.

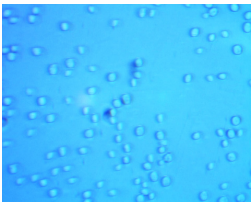
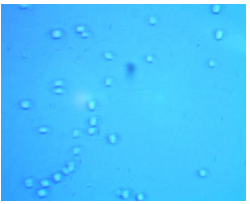
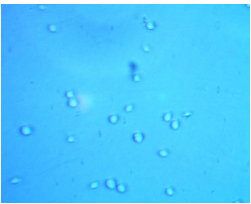
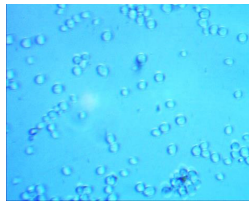
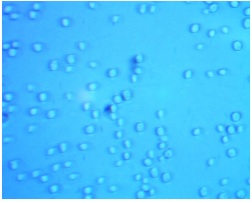
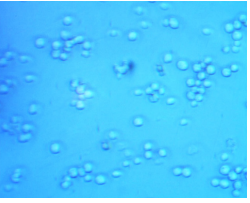
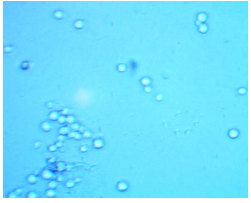
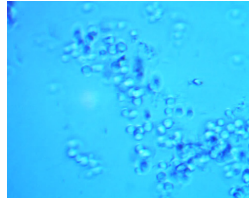
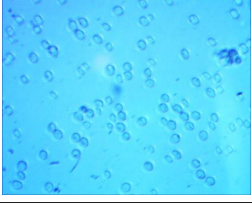
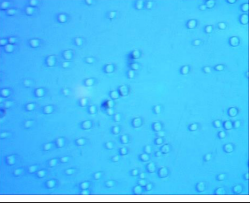
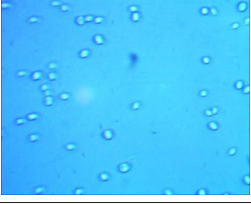
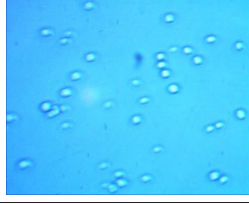
Одним из явных откликов дрожжей на низкие значения pH является замедление роста их клеток [14].

Но по наблюдениям авторов работы [7], другим важным следствием спровоцированного пищевыми кислотами стресса может стать ускорение роста дрожжевых клеток.

Скорость деления дрожжевых клеток является важной характеристикой, влияющей на эффективность технологического процесса и качество продукции хлебопекарного производства. Согласно результатам лабораторных наблюдений в дрожжевых суспензиях, приготовленных с добавлением экстрактов малины, уже через 30 мин экспозиции отмечалась конгломерация дрожжевых клеток (клетки как будто слипались в комки), а через 60 мин экспозиции этот эффект еще сильнее усиливался (табл. 2). Это затрудняло подсчет клеток. Разведение суспензии не приводило к разъединению образовавшихся конгломератов дрожжевых клеток.

Таблица 2. Влияние вида экстракта и продолжительности экспозиции на почкование дрожжевых клеток (1500×)

Table 2. Effect of extracts and exposure time on growth rate of yeasts (1500×)

Вариант эксперимента	Продолжительность экспозиции, мин			
	0	30	60	90
Дрожжевая суспензия с экстрактом плодов шиповника				
Дрожжевая суспензия с экстрактом ягод малины				
Контроль – 0 %				

Подобная конгломерация должна была спровоцировать снижение скорости почкования, поскольку известно, что типичной особенностью почкования дрожжей является многостороннее почкование, которое напрямую зависит от размеров родительских клеток дрожжей [35]. Подавление активности дрожжей при внесении экстракта малины отразилось на скорости их почкования уже через 60 мин экспозиции, после чего становилось более выраженным (табл. 3).

В дрожжевых суспензиях, приготовленных с добавлением экстрактов аронии и шиповника, по мере продолжения экспозиции отмечалось снижение количества дрожжевых клеток, примерно равное контрольному образцу. В суспензиях, приготовленных с добавлением экстрактов облепихи, наблюдалось брожение и множественное почкование клеток, поспособствовавшее увеличению общего количества дрожжевых клеток, по сравнению с другими вариантами использования экстрактов и контрольным опытом в каждой точке экспозиции. Через 90 мин экспозиции содержание клеток в суспензиях с облепихой возросло на 13–17 %. К концу опыта рост числа составил от 27 до 41 %, в зависимости от концентрации экстракта, по сравнению с контролем. При этом численно общее количество клеток в пробах с экстрактами облепихи возросло более существенно, т. к. каждую клетку с образовавшейся почкой считали за одну особь.

Следствием изменения активности почкования дрожжевых клеток в условиях внесения экстрактов является изменение характера их бродильной активности. Наблюдалось ухудшение газообразования в тесте при внесении экстракта ягод малины (при всех дозировках с начала и до окончания процесса брожения теста наблюдались самые

низкие значения подъемной силы). Из таблицы 4 видно, что подъемная сила теста с малиной в конце брожения составила 4 мин, в то время как у контроля и проб теста с другими экстрактами – 2–3 мин. В вариантах теста с добавлением экстрактов плодов аронии и шиповника в течение первых 60 мин интенсивность газообразования сохранялась на уровне контрольного варианта. В остальных временных точках интенсивность газообразования в тесте с экстрактом шиповника снижалась.

Поведение дрожжевых клеток на фоне внесения экстракта плодов облепихи неоднозначно. Несмотря на формирование компонентами экстракта облепихи наиболее кислой и поэтому наиболее «стрессовой» для дрожжевых клеток среды (3,41 ед. рН, табл. 1), проявился стимулирующий эффект. Он привел к усилению почкования дрожжевых клеток (менее выраженному в варианте с использованием 4 % экстракта плодов облепихи, табл. 3). Однако интенсивность газообразования в тесте с этим экстрактом была более низкой (через 60 мин брожения подъемная сила составила 5 мин, у контроля – 4 мин, через 120 мин брожения – 3–4 мин и 2 мин соответственно) и выравнивалась с контролем только к окончанию экспозиции (табл. 4).

Коррелятивно значениям кислотности экстрактов менялась и титруемая кислотность теста. Повышение кислотности теста как в начале, так и в конце брожения отмечено при добавлении экстракта облепихи: к окончанию экспозиции до 3,4, 4,0 и 4,8 град при введении 2, 3 и 4 % экстракта (табл. 5, рис. 2) соответственно. Отметим равную динамику нарастания как общей (титруемой), так и активной (рН) кислотности теста, являющейся причиной кислотного стресса для дрожжевых клеток.

Таблица 3. Влияние дозировки экстракта на почкование дрожжевых клеток

Table 3. Effect of extract dose on growth rate of yeasts

Вариант эксперимента	Содержание экстракта, %	Количество дрожжевых клеток в 1 см ³ , ×10 ⁶ /Продолжительность экспозиции, мин					
		0	30	60	90	120	150
Экстракт плодов аронии	2	1,20	1,05	1,13	1,08	1,08	1,13
	3	1,20	1,05	1,03	1,15	1,20	1,15
	4	1,20	1,05	1,03	1,05	1,20	1,20
Экстракт плодов облепихи	2	1,20	1,20	1,25	1,28	1,35	1,53
	3	1,20	1,20	1,35	1,30	1,45	1,55
	4	1,20	1,23	1,28	1,33	1,43	1,40
Экстракт ягод малины	2	1,20	1,23	0,90	0,75	0,70	0,73
	3	1,20	0,98	0,65	0,65	0,70	0,75
	4	1,20	1,18	0,70	0,68	0,65	0,60
Экстракт плодов шиповника	2	1,20	0,98	0,98	0,95	0,95	0,98
	3	1,20	1,10	1,10	1,10	1,00	1,00
	4	1,20	1,05	1,05	1,00	1,00	1,00
Контроль	0	1,20	1,23	1,20	1,13	1,10	1,10

Таблица 4. Влияние дозировки экстракта на подъемную силу теста

Table 4. Effect of extract dose on fermentation property of dough

Вариант эксперимента	Содержание экстракта, %	Подъемная сила теста, минут (± 1)/Продолжительность экспозиции, мин					
		0	30	60	90	120	150
Экстракт плодов аронии	2	11	4	4	3	2	2
	3	12	5	4	4	3	2
	4	10	5	3	4	3	3
Экстракт плодов облепихи	2	12	6	5	4	4	3
	3	12	5	5	4	3	3
	4	13	7	5	4	4	3
Экстракт ягод малины	2	14	9	5	5	4	4
	3	16	7	6	4	4	4
	4	16	7	6	4	4	4
Экстракт плодов шиповника	2	13	4	4	4	4	4
	3	11	5	4	4	4	4
	4	11	6	4	4	3	3
Контроль	0	12	5	4	3	2	3

Суммируя результаты проведенных исследований, необходимо отметить, что при использовании плодово-ягодных экстрактов в условиях хлебопекарного производства создание ими более или менее кислой среды не всегда будет иметь решающее влияние для активности дрожжей *S. cerevisiae*. Формируемая компонентами экстракта облепихи наиболее кислая и агрессивная из изученных условий среда (3,41 ед. pH) сопровождалась значительным повышением активности почкования дрожжевых клеток (число клеток в вариантах с экстрактами облепихи выросло от 13–18 % относительно контроля на 90-й мин экспозиции до 27–40 % относительно контроля к окончанию экспозиции). Это можно считать проявлением стимулирующего эффекта. Оказавший меньшее влияние на pH экстракт аронии практически не оказал влияния и на почкование

дрожжевых клеток. В условиях, когда в биологической системе присутствуют производные разных карбоновых кислот, некоторые из них (лимонная, янтарная и другие кислоты – участницы цикла Кребса, естественные регуляторы биохимических реакций) посредством своего участия в выработке ферментов и коферментов могут частично компенсировать стрессформирующее влияние низких значений pH. Как это наблюдается при введении в дрожжевую суспензию и тесто экстракта плодов облепихи.

Экстракт шиповника практически не оказал влияния на рост и размножение дрожжевых клеток, как и на процесс брожения теста, несмотря на формирование наиболее щадящей кислой среды – 4,95–4,61 ед. pH (рис. 2). Экстракт малины по формированию pH в растворе (в начале и конце экспозиции 4,81 и 4,49 ед. pH соответственно)

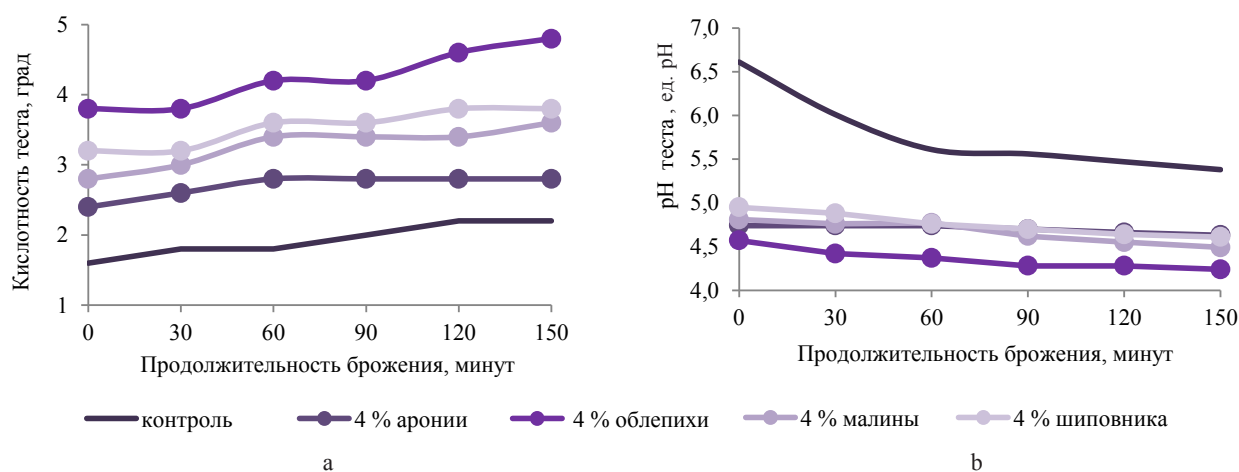


Рисунок 2. Изменение общей (а) и активной кислотности (b) теста в процессе брожения

Figure 2. Total (a) and active (b) acidity of dough during fermentation

Таблица 5. Влияние дозировки экстракта на скорость нарастания кислотности теста

Table 5. Effect of dose extract on acidity rate of dough

Вариант эксперимента	Содержание экстракта, %	Кислотность теста, град ($\pm 0,1$)/Продолжительность экспозиции, мин					
		0	30	60	90	120	150
Экстракт плодов аронии	2	2,2	2,2	2,2	2,4	2,6	2,6
	3	2,2	2,2	2,2	2,4	2,4	2,6
Экстракт плодов облепихи	2	2,6	2,6	3,0	3,2	3,2	3,4
	3	3,4	3,4	3,8	3,8	4,2	4,0
Экстракт ягод малины	2	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	2,8
	3	2,4	2,8	2,8	3,0	3,0	3,4
Экстракт плодов шиповника	2	2,2	2,4	2,6	2,8	2,8	2,8
	3	2,8	2,8	3,0	3,2	3,4	3,4
Контроль	0	1,6	1,8	1,8	2,0	2,2	2,2

близок к экстракту плодов аронии (в начале и конце экспозиции 4,74 и 4,63 ед. pH соответственно), по динамике pH в процессе брожения теста – к экстракту шиповника (рис. 2). Введение в раствор и тесто экстракта малины обуславливает ощутимое угнетение дрожжевых клеток. Через 60 мин экспозиции $0,65 \times 10^6$ – $0,90 \times 10^6$ клеток в 1 см^3 суспензии с экстрактом малины против $1,2 \times 10^6$ клеток в 1 см^3 суспензии на контроле, снизившееся к окончанию эксперимента до $0,60 \times 10^6$ – $0,75 \times 10^6$ клеток в 1 см^3 суспензии с экстрактом малины против $1,10 \times 10^6$ клеток в 1 см^3 дрожжевой суспензии в контрольном опыте. Это можно объяснить действием входящих в состав экстракта веществ с выраженным антимикробным и фунгистатическим действием – салициловой кислоты и ресвератрола [24]. Наибольшее снижение числа дрожжевых клеток отмечено в суспензиях с добавлением экстракта малины в дозировке 3 и 4 %.

Выводы

Введение плодово-ягодных экстрактов в состав теста для хлебобулочных изделий сопровождается повышением общей и активной кислотности, наиболее выраженной в вариантах использования экстрактов облепихи (к теоретическому окончанию процесса брожения до 4,8 град и 4,24 ед. pH соответственно). Повышение кислотности среды стало стресс-фактором в случае с экстрактом облепихи, повлекшим как усиление активности почкования дрожжевых клеток, свидетельством чего является самое большое количество дрожжевых клеток в вариантах с облепихой ($1,53 \times 10^6$ – $1,55 \times 10^6$ клеток в 1 см^3 суспензии с экстрактом облепихи против $1,10 \times 10^6$ клеток в 1 см^3 суспензии в контрольном опыте и $0,60 \times 10^6$ – $1,20 \times 10^6$ клеток по вариантам эксперимента), так и сохранение их бродильной активности.

Использование выявленных закономерностей изменения скорости размножения клеток хлебо-

пекарных дрожжей и проявляемой ими бродильной активности в условиях стрессовой ситуации, возникающей при введении в тесто натуральных плодово-ягодных экстрактов, характеризующихся высокой кислотностью, важно по технологическим причинам. Это дает возможность регуляции активности дрожжевого брожения применением плодово-ягодных экстрактов и подборки условий, приемлемых как с точки зрения нормального протекания процесса созревания теста, так и с точки зрения повышения пищевой ценности продукции хлебопекарного производства.

Учитывая выявленные направления действия рассматриваемых экстрактов в отношении хлебопекарных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, практический и научный интерес может представлять проведение дополнительных исследований в аспекте изучения других видов плодово-ягодных экстрактов.

Критерии авторства

Исследование было задумано, реализовано, проанализировано и описано авторами коллективно. Рукопись вычитана и принята в представленной версии как окончательная всеми авторами.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The study was conceived, implemented, analyzed, and described by the authors collectively. All authors approved of the final manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Использование экстрактов лекарственных растений в технологии хлебобулочных изделий / Т. Е. Лебеденко [и др.] // Наукові праці. 2010. Т. 38. № 1. С. 229–234.
2. Долматова О. И., Пожидаева Е. А., Гребенкина А. Г. Использование экстракта дикорастущих трав при производстве кисломолочного напитка // Пищевая промышленность. 2017. № 12. С. 26–28.
3. Икрами М. Б., Шарипова М. Б., Девонашоева Н. С. Влияние растительных экстрактов на технологические характеристики хлебобулочных изделий // Научный аспект. 2019. Т. 14. № 2. С. 1838–1843.
4. Келенкова Е. С., Егорова Е. Ю. Использование сухих экстрактов плодово-ягодного сырья для повышения пищевой ценности квасов брожения // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2021. Т. 379. № 1. С. 35–39. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2021.1.8>.
5. Влияние антиоксидантов на рост и биотехнологические свойства хлебопекарных дрожжей / З. Мингалеева [и др.] // Хлебопродукты. 2008. № 6. С. 46–47.
6. Baez A., Shiloach J. Effect of elevated oxygen concentration on bacteria, yeasts, and cells propagated for production of biological compounds // Microbial Cell Factories. 2014. Vol. 13. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12934-014-0181-5>.
7. Protein aggregation and membrane lipid modifications under lactic acid stress in wild type and *OPI1* deleted *Saccharomyces cerevisiae* strains / N. M. Berterame [et al.] // Microbial Cell Factories. 2016. Vol. 15. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0438-2>.
8. О морфологических свойствах штамма *S. cerevisiae* Y-503 в условиях осмотического, температурного и кислотного стресса / Э. А. Халилова [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 2–2. С. 133–141.
9. The fraction of cells that resume growth after acetic acid addition is a strain-dependent parameter of acetic acid tolerance in *Saccharomyces cerevisiae* / S. Swinnen [et al.] // FEMS Yeast Research. 2014. Vol. 14. № 4. P. 642–653. <https://doi.org/10.1111/1567-1364.12151>.
10. Geng P., Zhang L., Shi G. Y. Omics analysis of acetic acid tolerance in *Saccharomyces cerevisiae* // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2017. Vol. 33. № 5. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2259-9>.
11. Ishmayana S., Kennedy U. J., Learmonth R. P. Further investigation of relationships between membrane fluidity and ethanol tolerance in *Saccharomyces cerevisiae* // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2017. Vol. 33. № 12. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2380-9>.
12. A microfluidic device for inferring metabolic landscapes in yeast monolayer colonies / Z. S. Marinkovic [et al.] // eLife. 2019. Vol. 8. <https://doi.org/10.7554/eLife.47951>.
13. Морфологические особенности дрожжей рода *Saccharomyces* в процессе адаптации к экстремальным значениям глюкозы и этанола / Э. А. Исламагомедова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2020. Т. 205. № 1. С. 95–101. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-1-95-101>.
14. Stress-induced growth rate reduction restricts metabolic resource utilization to modulate osmo-adaptation time / A. R. Bonny [et al.] // Cell Reports. 2021. Vol. 34. № 11. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2021.108854>.
15. The yeast osmostress response is carbon source dependent / R. Babazadeh [et al.] // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01141-4>.
16. Котенко С. Ц., Исламагомедова Э. А., Халилова Э. А. Ферментативная активность и морфологические особенности дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-503 при культивировании в аэробных и анаэробных условиях // Юг России: экология, развитие. 2010. Т. 5. № 1. С. 12–16.
17. Влияние экстремальных значений pH на морфологические особенности дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* / Э. А. Исламагомедова [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 5–2. С. 219–225.
18. Changes in lipid metabolism convey acid tolerance in *Saccharomyces cerevisiae* / Z.-P. Guo [et al.] // Biotechnology for Biofuels. 2018. Vol. 11. № 1. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1295-5>.
19. Крикунова Л. Н., Осипова В. П., Лазарева И. В. Влияние янтарной кислоты на азотный обмен при развитии дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 7. С. 35–39.
20. Влияние янтарной кислоты на метаболизм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* / Л. Н. Крикунова [и др.] // Пиво и напитки. 2015. № 1. С. 36–38.
21. Подлесный А. И., Ломачинский В. А., Квасенков О. И. Консерванты в плодоовощной промышленности // Пищевая промышленность. 2006. № 2. С. 54–55.
22. Elucidating aromatic acid tolerance at low pH in *Saccharomyces cerevisiae* using adaptive laboratory evolution / R. Pereira [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2020. Vol. 117. № 45. P. 27954–27961. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013044117>.
23. Jarboe L. R., Royce L. A., Liu P. Understanding biocatalyst inhibition by carboxylic acids // Frontiers in Microbiology. 2013. Vol. 4. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00272>.

24. Причко Т. Г., Смелик Т. Л., Хилько Л. А. Биохимические показатели качества ягод малины с учетом сортовых особенностей // Плодоводство и ягодоводство России. 2017. Т. 48. № 2. С. 242–247.
25. Analysis of wild raspberries (*Rubus idaeus* L.): optimization of the ultrasonic-assisted extraction of phenolics and a new insight in phenolics bioaccessibility / N. R. Mihailović [et al.] // Plant Foods for Human Nutrition. 2019. Vol. 74. № 3. P. 399–404. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00756-4>.
26. Phytochemical composition and biological activity of berries and leaves from four romanian Sea Buckthorn (*Hippophae Rhamnoides* L.) varieties / A. Criste [et al.] // Molecules. 2020. Vol. 25. № 5. <https://doi.org/10.3390/molecules25051170>.
27. Determination of anthocyanins and chlorogenic acids in fruits of *Aronia* genus: The experience of chemosystematics / V. I. Deineka [et al.] // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2020. Vol. 46. № 7. P. 1390–1395. <https://doi.org/10.1134/S1068162020070031>.
28. Jurendić T., Ščetar M. *Aronia melanocarpa* products and by-products for health and nutrition: A Review // Antioxidants. 2021. Vol. 10. № 7. <https://doi.org/10.3390/antiox10071052>.
29. Исследование возможности иммобилизации антиоксидантов шиповника Даурского включением в белково-липидный комплекс / Б. А. Баженова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 301–311. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-301-311>.
30. Carotenoids, polyphenols, and ascorbic acid in organic Rosehips (*Rosa spp.*) cultivated in Lithuania / B. Medveckiene [et al.] // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 15. <https://doi.org/10.3390/app10155337>.
31. Ultrasonic and microwave activation of raspberry extract: antioxidant and anti-carcinogenic properties / N. B. Ereemeeva [et al.] // Foods and Raw Materials. 2019. Vol. 7. № 2. P. 264–273. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-264-273>.
32. Использование растительных компонентов в рецептуре питательных субстратов для повышения спиртоустойчивости дрожжей / Г. С. Качмазов [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2016. № 10. С. 39–43.
33. Особенности биохимического состава хлебобулочных изделий с добавками плодово-ягодных порошков / Л. П. Нилова [и др.] // Аграрная Россия. 2016. № 10. С. 20–26. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2016-10-20-26>.
34. Кольман О. Я., Иванова Г. В., Никулина Е. О. Влияние ягодного порошка на хлебопекарные свойства пшеничной муки // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2012. Т. 3. № 2. С. 166–167.
35. Wang Y., Lo W.-C., Chou C.-S. A modeling study of budding yeast colony formation and its relationship to budding pattern and aging // PLoS Computational Biology. 2017. Vol. 13. № 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005843>.

References

1. Lebedenko TE, Kananykhina EN, Sokolova NYu, Rapita VR. Ispol'zovanie ehkstraktov lekarstvennykh rasteniy v tekhnologii khlebobulochnykh izdeliy [Herbal extracts in bakery technology]. Scientific Works. 2010;38(1):229–234. (In Russ.).
2. Dolmatova OI, Pozhidaeva EA, Grebenkina AG. Using an extract of wild herbs in the production of a sour-milk drink. Food Industry. 2017;(12):26–28. (In Russ.).
3. Ikrami MB, Sharipova MB, Devonashoeva NS. Vliyanie rastitel'nykh ehkstraktov na tekhnologicheskie kharakteristiki khlebobulochnykh izdeliy [Effect of plant extracts on the technological characteristics of bakery products]. Nauchnyy aspekt [Scientific Aspect]. 2019;14(2):1838–1843. (In Russ.).
4. Kelenkova ES, Egorova EYu. Use of dry extracts of fruit and berry raw materials to increase the nutritional value of kvasses of fermentation. News of Institutes of Higher Education. Food Technology. 2021;379(1):35–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2021.1.8>.
5. Mingaleeva Z, Starovoytova O, Borisova S, Reshetnik O. Influence of antioxidants on growth and biotechnological properties of yeast. Bread products. 2008;(6):46–47. (In Russ.).
6. Baez A, Shiloach J. Effect of elevated oxygen concentration on bacteria, yeasts, and cells propagated for production of biological compounds. Microbial Cell Factories. 2014;13(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-014-0181-5>.
7. Berterame NM, Porro D, Ami D, Branduardi P. Protein aggregation and membrane lipid modifications under lactic acid stress in wild type and *OPII* deleted *Saccharomyces cerevisiae* strains. Microbial Cell Factories. 2016;15(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0438-2>.
8. Khalilova EA, Islammagomedova EA, Kotenko STs, Gasanov RZ, Abakarova AA, Aliverdieva DA. On the morphological properties of the strain *S. cerevisiae* Y-503 in the conditions of osmotic, temperature and acid stress. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Bulletin of the Samara Research Center of the Russian Academy of Sciences]. 2019;21(2–2):133–141. (In Russ.).
9. Swinnen S, Fernández-Niño M, González-Ramos D, van Maris AJA, Nevoigt E. The fraction of cells that resume growth after acetic acid addition is a strain-dependent parameter of acetic acid tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. FEMS Yeast Research. 2014;14(4):642–653. <https://doi.org/10.1111/1567-1364.12151>.
10. Geng P, Zhang L, Shi GY. Omics analysis of acetic acid tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2017;33(5). <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2259-9>.

11. Ishmayana S, Kennedy UJ, Learmonth RP. Further investigation of relationships between membrane fluidity and ethanol tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2017;33(12). <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2380-9>.
12. Marinkovic ZS, Vulin C, Acman M, Song X, Di Meglio J-M, Lindner AB, et al. A microfluidic device for inferring metabolic landscapes in yeast monolayer colonies. eLife. 2019;8. <https://doi.org/10.7554/eLife.47951>.
13. Islammagomedova EA, Khalilova EA, Kotenko STs, Abakarova AA, Aliverdieva DA. The morphological features of adaptation of the yeast of the genus *Saccharomyces* to extreme values of glucose and ethanol. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences. 2020;205(1):95–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-1-95-101>.
14. Bonny AR, Kochanowski K, Diether M, El-Samad H. Stress-induced growth rate reduction restricts metabolic resource utilization to modulate osmo-adaptation time. Cell Reports. 2021;34(11). <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2021.108854>.
15. Babazadeh R, Lahtvee P-J, Adiels CB, Goksör M, Nielsen JB, Hohmann S. The yeast osmostress response is carbon source dependent. Scientific Reports. 2017;7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01141-4>.
16. Kotenko STs, Islammagomedova EA, Halilova EA. The fermentative activity and morphological speciality of yeast *Saccharomyces cerevisiae* Y-503 at cultivation in aerobic and anaerobic conditions. South of Russia: ecology, development. 2010;5(1):12–16. (In Russ.).
17. Islammagomedova EA, Khalilova EA, Kotenko STs, Gasanov RZ, Aliverdieva DA. Influence of extreme pH on morphological features of yeast *saccharomyces cerevisiae*. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Bulletin of the Samara Research Center of the Russian Academy of Sciences]. 2018;20(5–2):219–225. (In Russ.).
18. Guo Z-P, Khoomrung S, Nielsen J, Olsson L. Changes in lipid metabolism convey acid tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. Biotechnology for Biofuels. 2018;11(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1295-5>.
19. Krikunova LN, Osipova VP, Lazareva IV. The influence of succinic acid on nitrogen metabolism during development of yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Storage and Processing of Farm Products. 2017;(7):35–39. (In Russ.).
20. Krikunova LN, Ryabova SM, Peschanskaya VA, Urusova LM. Effects of succinic acid on the metabolism of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Beer and beverages. 2015;(1):36–38. (In Russ.).
21. Podlesnyy AI, Lomachinskiy VA, Kvasenkov OI. Konservanty v plodoovoshchnoy promyshlennosti [Preservatives in the fruit and vegetable industry]. Food Industry. 2006;(2):54–55. (In Russ.).
22. Pereira R, Mohamed ET, Radi MS, Herrgård MJ, Feist AM, Nielsen J, et al. Elucidating aromatic acid tolerance at low pH in *Saccharomyces cerevisiae* using adaptive laboratory evolution. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2020;117(45):27954–27961. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013044117>.
23. Jarboe LR, Royce LA, Liu P. Understanding biocatalyst inhibition by carboxylic acids. Frontiers in Microbiology. 2013;4. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00272>.
24. Prichko TG, Smelik TL, Khilko LA. Biochemical parameters of the raspberry berries quality taking into account the variety peculiarities. Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia. 2017;48(2):242–247. (In Russ.).
25. Mihailović NR, Mihailović VB, Ćirić AR, Srećković NZ, Cvijović MR, Joksović LG. Analysis of wild raspberries (*Rubus idaeus* L.): optimization of the ultrasonic-assisted extraction of phenolics and a new insight in phenolics Bioaccessibility. Plant Foods for Human Nutrition. 2019;74(3):399–404. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00756-4>.
26. Criste A, Urcan AC, Bunea A, Furtuna FRP, Olah NK, Madden RH, et al. Phytochemical composition and biological activity of berries and leaves from four romanian Sea Buckthorn (*Hippophae Rhamnoides* L.) varieties. Molecules. 2020;25(5). <https://doi.org/10.3390/molecules25051170>.
27. Deineka VI, Tretyakov MYu, Oleiniz EYu, Pavlov AA, Deineka LA, Blinova IP, et al. Determination of anthocyanins and chlorogenic acids in fruits of *Aronia* genus: The experience of chemosystematics. Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2020;46(7):1390–1395. <https://doi.org/10.1134/S1068162020070031>.
28. Jurendić T, Ščetar M. *Aronia melanocarpa* products and by-products for health and nutrition: A Review. Antioxidants. 2021;10(7). <https://doi.org/10.3390/antiox10071052>.
29. Bazhenova BA, Burkhanova AG, Zabalueva YuYu, Dobretsky RA. Immobilization of daurian rosehip antioxidants by protein-lipid inclusion. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):301–311. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-301-311>.
30. Medveckiene B, Kulaitiene J, Jariene E, Vaitkevičienė N, Hallman E. Carotenoids, polyphenols, and ascorbic acid in organic Rosehips (*Rosa spp.*) cultivated in Lithuania. Applied Sciences. 2020;10(15). <https://doi.org/10.3390/app10155337>.
31. Eremeeva NB, Makarova NV, Zhidkova EM, Maximova VP, Lesova EA. Ultrasonic and microwave activation of raspberry extract: antioxidant and anti-carcinogenic properties. Foods and Raw Materials. 2019;7(2):264–273. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-264-273>.
32. Kachmazov GS, Bagaeva UV, Gaeva AA, Khripankova MS. Using of vegetable ingredients in the recipe of nutrient substrate for increasing alcohol tolerance of yeast. Storage and Processing of Farm Products. 2016;(10):39–43. (In Russ.).

33. Nilova LP, Shelenga TV, Dubrovskaya NO, Horeva VI. Features of biochemical composition of bakery products with additives of fruit and berry powders. *Agrarian Russia*. 2016;(10):20–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2016-10-20-26>.
34. Kolman OYa, Ivanova GV, Nikulina EO. Berry powder influence on baking qualities of wheat flour. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2012;3(2):166–167.
35. Wang Y, Lo W-C, Chou C-S. A modeling study of budding yeast colony formation and its relationship to budding pattern and aging. *PLoS Computational Biology*. 2017;13(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005843>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-832-848>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Изучение влияния продуктов переработки овса на изменение качественных характеристик мучных кондитерских изделий



Н. А. Щербакова^{ID}, С. Ю. Мистенева*^{ID}, О. С. Руденко^{ID},
Н. Б. Кондратьев^{ID}, А. В. Баскаков^{ID}

Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности^{ROR}, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 27.07.2021

Принята после рецензирования: 21.10.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: svetlana_mst@mail.ru

© Н. А. Щербакова, С. Ю. Мистенева, О. С. Руденко, Н. Б. Кондратьев, А. В. Баскаков, 2021

Аннотация.

Введение. Включение в рацион питания продуктов из цельнозернового зерна способствует снижению риска возникновения ряда хронических заболеваний. Овес и продукты его переработки являются перспективным сырьем для создания функциональных продуктов питания за счет содержания в них бета-глюкана, имеющего клинически доказанную эффективность. Цель исследования – модификация нутриентного состава мучных кондитерских изделий группы сахарного печенья путем введения в рецептурный состав продуктов переработки овса и изучение динамики изменения качественных характеристик полуфабрикатов и готовых изделий.

Объекты и методы исследования. Композитные смеси муки и толокна овсяного, модельные суспензии композитных смесей муки и рецептурные модели печенья с использованием толокна овсяного и хлопьев овсяных в различных соотношениях. Исследование органолептических, физико-химических, реологических и структурно-механических показателей осуществляли с использованием стандартных методов.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что массовая доля белка, жира и содержание пищевых волокон в композитных смесях с толокном повышаются при увеличении его содержания и находятся в диапазонах значений: белок 11,9–12,5 %, жир 2,3–3,7 %, пищевые волокна 4,1–4,5 %. Коэффициенты набухания смесей увеличиваются, по сравнению с мукой пшеничной (2,94), и составляют 3,41–4,60. Исследование образцов модельных суспензий показало, что с увеличением доли толокна их вязкость возрастает от 50 до 500 Па·с. Второй этап работы заключался в исследовании динамики изменения качественных характеристик печенья с толокном овсяным. Наибольшая прочность 1700 г характерна для образца с наибольшим количеством толокна. Намокаемость изделий увеличивается, по сравнению с контрольным образцом (193 %), при введении толокна в количестве 20 и 30 % и составляет 220 и 221 % соответственно. Результаты исследований активности воды показывают, что толокно способствует снижению данного показателя в печенье с 0,360 до 0,290 по мере увеличения его концентрации.

Выводы. Установлены оптимальные количества толокна овсяного и хлопьев овсяных в рецептуре печенья – 30 и 10 % от массы муки соответственно. Изучены зависимости качественных характеристик композитных смесей муки, модельного теста и готовых изделий от концентрации толокна и хлопьев. Определены оптимальные технологические параметры производства печенья и разработаны рецептуры для предприятий отрасли.

Ключевые слова. Печенье, бета-глюкан, толокно овсяное, хлопья овсяные, модификация, рецептурный состав

Для цитирования: Изучение влияния продуктов переработки овса на изменение качественных характеристик мучных кондитерских изделий / Н. А. Щербаков [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 832–848. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-832-848>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Effect of Oat-Based Ingredients on the Quality of Pastry Products

Natalia A. Shcherbakova^{ID}, Svetlana Yu. Misteneva*^{ID}, Oxana S. Rudenko^{ID},
Nikolay B. Kondrat'ev^{ID}, Andrew V. Baskakov^{ID}

All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry^{ROR}, Moscow, Russia

Received: July 27, 2021

Accepted in revised form: October 21, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021



Abstract.

Introduction. Whole grain products can prevent some chronic diseases. Oats and oat-based foods are rich in beta-glucan, which makes them a perfect ingredient for functional foods. The present research objective was to introduce oat-based ingredients into the formulation of sugar cookies and study the quality of the finished product.

Study objects and methods. The study involved various formulations of sugar cookies with different proportions of oat meal and composite flour. Sensory, physicochemical, rheological, structural, and mechanical properties were determined according to standard methods.

Results and discussion. The mass shares of protein, fat, and dietary fiber increased together with the share of oat meal: protein – 11.9–12.5%, fat – 2.3–3.7%, dietary fiber – 4.1–4.5%. The swelling rates were 3.41–4.60, which was higher than in the wheat flour sample (2.94). Oat meal increased the viscosity of the model suspensions from 50 to 500 Pa·s. The sample with the biggest share of oat meal had the greatest strength (1700 g). The water absorption also increased (193%): it was 220 when the share of oat meal was 20% and 221% when it was 30%. Oat meal decreased the water activity from 0.360 to 0.290 as its concentration grew.

Conclusion. The optimal amount of oat meal was 30% and that of oatmeal flakes – 10% of the flour amount. The research also defined the effect of oat meal and oat flakes on the composite flour blend, model dough, and sugar cookies. The article introduces a new commercial formulation of sugar biscuits.

Keywords. Biscuit, beta-glucan, oat tolokno, oat flakes, modification, recipe

For citation: Shcherbakova NA, Misteneva SYu, Rudenko OS, Kondrat'ev NB, Baskakov AV. Effect of Oat-Based Ingredients on the Quality of Pastry Products. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):832–848. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-832-848>.

Введение

Распространенность избыточного веса, ожирения и других неинфекционных заболеваний, связанных со структурой и рационом питания, среди взрослого и детского населения является серьезной проблемой всего мирового сообщества. Сложившаяся ситуация приводит не только к существенному повышению государственных затрат на здравоохранение, но и отрицательно сказывается на качестве и продолжительности жизни людей во многих странах. Неправильное питание входит в десять первых факторов риска, усугубляющих глобальное бремя болезней. Рацион питания населения характеризуется отсутствием достаточного количества фруктов, овощей и продуктов на основе цельного зерна, избыточным потреблением соли, насыщенных жиров и добавленных сахаров, поступающих с пищевыми продуктами промышленного производства.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) определила понятие «неправильного питания» – дисбаланс энергетической ценности и/или питательных веществ в рационе питания человека [1].

Одним из важных факторов совершенствования рационов является доступность пищевых продуктов, в том числе кондитерских изделий, созданных на основе руководящих принципов ВОЗ в области питания. Реализация Стратегии повышения качества пищевой продукции (распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.06.2016 № 1364-р «Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации

до 2030 года») предусматривает обеспечение условий для производства пищевой продукции нового поколения с заданными характеристиками качества. Поэтому перед научно-исследовательскими организациями и предприятиями всех отраслей пищевой промышленности поставлены задачи по разработке и внедрению нового ассортимента изделий, способствующих повышению качества и структуры питания людей [2–6].

Одной из эффективных стратегий оптимизации качества существующих продуктов питания, производимых различными отраслями пищевой промышленности, является проведение комплекса действий, направленных на изменение их рецептурного состава. Концепция изменения рецептуры – относительно новая стратегия разработки продуктов с полезными свойствами. Изменение рецептуры пищевых продуктов – это процесс изменения существующего, часто популярного, промышленно произведенного пищевого продукта с целью сделать его полезным для здоровья [7, 8].

Печенье разных сортов используется не только как десерт, но и как альтернативный «снэковый» продукт для перекуса, поскольку имеет привлекательные вкусовые характеристики, длительный срок хранения, удобно в употреблении и относится к низкому ценовому сегменту (рис. 1) [9].

Повышение спроса на изделия с функциональными пищевыми ингредиентами, со сниженным количеством сахара, жира и соли является одной из тенденций современного рынка продуктов питания, в том числе кондитерских изделий [9].



Рисунок 1. Продажи кондитерских изделий по видам

Figure 1. Sales of confectionery products by type

К функциональным пищевым ингредиентам относят физиологически активные, ценные и безопасные для здоровья ингредиенты с известными физико-химическими характеристиками. Для них выявлены и научно обоснованы полезные для сохранения и улучшения здоровья свойства, установлена суточная физиологическая потребность. Например, растворимые и нерастворимые пищевые волокна [10].

Кондитерские изделия группы печенья характеризуются высоким содержанием добавленного сахара (до 40 %) и жира (до 35 %), что определяет основу формирования его реологических и качественных характеристик. Изменение соотношения сырья внутри рецептурного состава многокомпонентных дисперсных систем или введение в их состав новых ингредиентов приведет к изменению их структуры и органолептических показателей [11]. Следовательно, проведение исследований по модификации рецептурного состава печенья и изучение влияния сырья на его характеристики является актуальным и практически значимым.

В Руководящих принципах по здоровому питанию ВОЗ рекомендуется включение в рацион питания цельнозерновых продуктов с целью снижения риска возникновения хронических заболеваний, таких как ожирение, диабет и сердечно-сосудистые заболевания. Цельнозерновые продукты содержат множество питательных веществ, в том числе пищевые волокна, омега-3-полиненасыщенные жирные кислоты, минеральные вещества и витамины [2, 12].

Овес и продукты его переработки являются перспективным сырьем для создания продуктов питания функциональной направленности. Овес перерабатывается как цельное зерно, в котором много водорастворимых пищевых волокон, называемых β -глюканами (рис. 2) [13].

Имеются литературные данные, позволяющие предположить, что β -глюкан овса снижает уровень

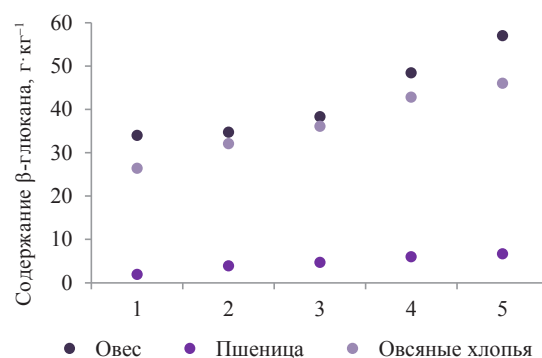


Рисунок 2. Содержание β -глюкана в образцах овса, пшеницы и овсяных хлопьев

Figure 2. β -glucan in oats, wheat, and oat flakes samples

холестерина липопротеинов низкой плотности. Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) допускает наличие связи между потреблением цельнозерновых овсяных продуктов и снижением риска возникновения ишемической болезни сердца. Появляется все больше свидетельств того, что потребление продуктов переработки овса, по сравнению с аналогичными продуктами из пшеницы, снижает гликемический ответ организма на пищу. Существует ряд исследований, доказывающих положительное влияние цельного овса и овсяного β -глюкана на контроль аппетита. Клинически доказано, что употребление не менее 4 г β -глюканов из овса или ячменя на 30 г доступных углеводов способствует снижению уровня глюкозы в крови [12, 14–17]. Проведение исследовательских работ в данном направлении может лечь в основу создания мучных кондитерских изделий для специализированного питания, в частности для людей, страдающих диабетом.

Овес содержит до 15 % белка, более высокий уровень глобулина и более низкий уровень проламина, чем пшеница. Также обеспечивает лучший баланс незаменимых аминокислот для человека (рис. 3, 4).

Биологическую ценность белков определяет степень задержки азота в организме или эффективность его утилизации для поддержания азотистого равновесия у взрослых. Это зависит от аминокислотного состава белков. Аминокислотой, лимитирующей биологическую ценность белков пшеницы и овса, является лизин. Однако аминокислотный скор лизина в белке овса составляет 71 %, что на 20 % выше, чем в белке пшеницы. Это свидетельствует о высокой биологической ценности белка овса.

Овес содержит 5,2–9,4 % липидов (включая свободные жирные кислоты, преимущественно



Рисунок 3. Соотношения белковых фракций овса и пшеницы

Figure 3. Ratios of protein fractions in oats and wheat

ненасыщенные, триглицериды, гликолипиды и фосфолипиды) (рис. 5). Основные свободные жирные кислоты овса: насыщенная пальмитиновая (16–22 %), мононенасыщенная олеиновая (28–40 %) и полиненасыщенная линолевая (36–46 %). Высокое содержание фосфолипидов (≥ 20 %) отличает овес от других масличных культур. Полиненасыщенные жирные кислоты являются незаменимыми питательными веществами для человека [18, 19].

Целью работы является модификация нутриентного состава мучных кондитерских изделий группы сахарного печенья путем введения в рецептурный состав продуктов переработки овса и изучение динамики изменения качествен-

ных характеристик полуфабрикатов и готовых изделий.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования стали: композитные смеси муки и толокна овсяного, модельные суспензии композитных смесей муки и рецептурные модели печенья с использованием толокна овсяного и хлопьев овсяных в различных соотношениях. Исследование органолептических, физико-химических, реологических и структурно-механических показателей проведено с использованием стандартных методов.

Органолептические показатели готовой продукции определены по ГОСТ 24901-2014 и ГОСТ 5897-90; массовая доля влаги – по ГОСТ 5900-2014; намокаемость готовых изделий – по ГОСТ 10114-80; массовая доля жира – по ГОСТ 31902-2012,

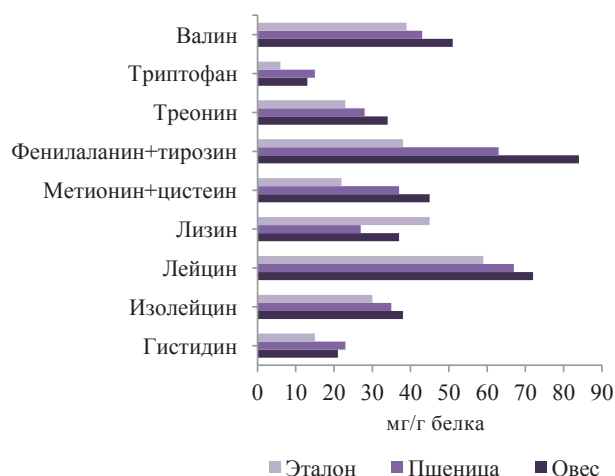


Рисунок 4. Аминокислотный состав белка (мг/г белка) овса и пшеницы в сравнении с эталонной моделью для взрослых ФАО/ВОЗ (2007)

Figure 4. Protein amino acid composition (mg/g protein) of oats and wheat compared to the FAO/WHO Adult Reference Model (2007)

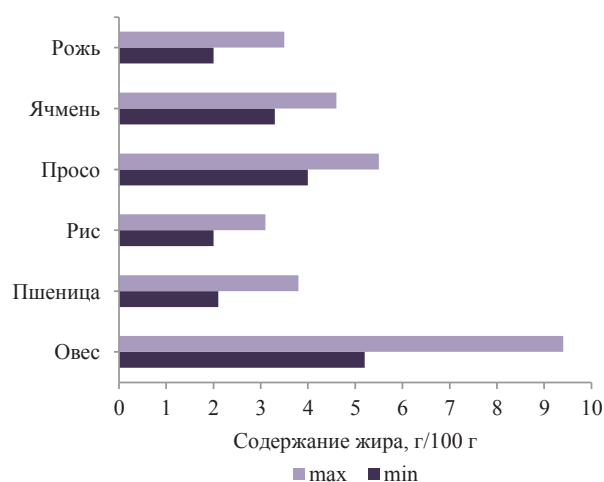


Рисунок 5. Содержание жира в зерновых продуктах

Figure 5. Fat content in cereal products



Рисунок 6. Химический состав толокна овсяного, хлопьев овсяных и муки пшеничной высшего сорта

Figure 6. Chemical composition of oat meal, oat flakes, and premium wheat flour

содержание пищевых волокон – по ГОСТ 54014-2010; массовая доля белка – по ГОСТ 10846-91 и ГОСТ 34551-2019, количество клейковины – по ГОСТ Р 54478-2011; массовая доля золы – по ГОСТ 27494-2016; коэффициент набухания – по МВИ 92-19825192-2021 «Методика определения коэффициента набухания муки»; насыпная плотность – по МВИ 93-19825192-2021 «Методика определения насыпной плотности муки»; жирнокислотный состав жировой фракции – по ГОСТ Р 54687-2011; прочность – по МВИ 84-19825192-2020 «Методика определения прочности печенья»; плотность теста и готовых изделий – по ГОСТ 15810-14. Активность воды определена на анализаторе AquaLab 4TE (Decagon Devices, США). Температура теста измерена с помощью термометра. Высота тестовой заготовки и готовых изделий, диаметр тестовой заготовки и готовых изделий измерены с помощью штангенциркуля и выражены в миллиметрах. Масса тестовой заготовки и масса готового изделия определены путем взвешивания на электронных лабораторных весах AND GF 1000 с точностью до 0,1 г.

Ежегодно в мире выращивается от 25 до 20 млн т овса. Крупнейшим производителем овса является Европейский Союз, за ним следуют Россия, Канада и Австралия [18].

В России производят следующие продукты переработки овса: крупу, хлопья, муку диетическую и толокно. Толокно – вид овсяной муки, высококалорийный питательный продукт. Толокно вырабатывают из целого овса, очищенного от сорной примеси, шуплых и недоразвитых зерен. Зерно предварительно замачивают в воде с температурой 35 °С в течение 2 ч для увлажнения до 30 %. Влажный овес выдерживают в варочном аппарате в течение 1,5–2 ч, затем высушивают до 5–6 %, охлаждают, шелушат и размалывают в муку.

В результате получают продукт, крахмал которого почти полностью декстринизирован [20, 21].

Таблица 1. Процентные соотношения муки пшеничной высшего сорта и толокна овсяного в композитных смесях муки

Table 1. Ratios of premium wheat flour and oat meal in composite flour mixes

Обозначение смесей	Соотношение компонентов в смесях, %	
	Мука	Толокно овсяное
Мука пш. в.с.	100	–
Смесь ₁	80	20
Смесь ₂	70	30
Смесь ₃	60	40
Смесь ₄	50	50

Толокно является готовым к употреблению продуктом, обладает сладковатым вкусом и гармоничным приятным зерновым запахом с ореховым послевкусием. Применение толокна овсяного не требует изменения технологического процесса производства печенья, поскольку по основным физическим свойствам оно схоже с мукой пшеничной. Овсяное толокно применяется при создании продуктов для детского и диетического питания, мясных и молочных продуктов, а также напитков. Однако его использование в производстве мучных кондитерских изделий пока не имеет широкого распространения [22–24].

Овсяные хлопья разных видов вырабатывают из овсяной крупы высшего сорта. В результате присутствия технологической стадии дополнительного пропаривания и плющения хлопья приобретают нежную консистенцию и приятный вкус, что служит основой для их использования в пищевой промышленности [20, 21].

Химический состав толокна овсяного, хлопьев овсяных и муки пшеничной высшего сорта, используемых в данной работе, представлен на рисунке 6.

В настоящей работе для создания рецептурных моделей сахарного печенья использованы композитные смеси муки, состоящие из муки пшеничной высшего сорта и толокна овсяного, в соотношениях, представленных в таблице 1.

Для изучения влияния введения в рецептуру толокна овсяного на изменение качественных характеристик готовых изделий разработаны различные рецептурные модели печенья. Для проведения сравнительной оценки качественных характеристик был выработан контрольный образец печенья с использованием 100 % муки пшеничной высшего сорта (контроль) (табл. 2).

Разработка четырех вариантов рецептурных моделей обусловлена необходимостью определения возможного количественного диапазона

Таблица 2. Соотношение сырьевых компонентов в рецептурных моделях печенья

Table 2. Ratio of raw materials in sugar cookies

Наименование и характеристики сырья	Рецептурные модели, г							
	Контроль	PM ₁		PM ₂		PM ₃		PM ₄
Мука пшеничная высший сорт ГОСТ 26574-2017	68,0	54,4	Смесь ₁	47,6	Смесь ₂	40,8	Смесь ₃	34,0
Толокно овсяное ГОСТ 2929-75	–	13,6		20,4		27,2		34,0
Жир растительный твердый (содержание твердого жира при температуре 20 °С – 26 %; НЖК 48,7 %; МНЖК 40,6 %; ПНЖК 10,8 %)	16,0	16,0		16,0		16,0		16,0
Пудра сахарная из сахара белого (ГОСТ 33222-2015)	14,0	14,0		14,0		14,0		14,0
Инвертный сироп (массовая доля сухих веществ 80 %, массовая доля редуцирующих веществ 78 %)	2,5	2,5		2,5		2,5		2,5
Экстракт ячменно-солодовый (массовая доля сухих веществ 75 %)	4,3	4,3		4,3		4,3		4,3
Соль пищевая	0,2	0,2		0,2		0,2		0,2
Химические разрыхлители	0,7	0,7		0,7		0,7		0,7

введения толокна овсяного в рецептуру сахарного печенья.

Замес теста осуществлен по трехстадийной технологии, предусматривающей предварительное приготовление суспензии и эмульсии (рис. 7).

Для обеспечения качественного процесса формирования теста в лабораторных условиях его расчетную влажность принимали равной $16,0 \pm 0,5$ %. Геометрические параметры тестовых заготовок: высота $4,8 \pm 0,3$ мм, диаметр $47,0 \pm 1,0$ мм. Температура теста 26 ± 1 °С. Изделия выпекали при температуре 190 ± 3 °С в течение $9,5 \pm 0,5$ мин, охлаждали до комнатной температуры и упаковывали в герметичные термосвариваемые пакеты из полипропиленовой пленки. Массовая доля влаги готовых изделий $5,5 \pm 1,0$ %.

Этапы проведения экспериментальных исследований представлены на рисунке 8.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе работы проведены исследования качественных характеристик композитных смесей

муки. Физико-химические показатели смесей в сравнении с мукой пшеничной высшего сорта представлены в таблице 3.

Введение толокна овсяного в композитные смеси муки приводит изменению к их макронутриентного состава: увеличению содержания белка, жира и общего количества пищевых волокон. Увеличение содержания толокна овсяного в композитных смесях муки обуславливает увеличение коэффициента набухания. Это связано с повышенной способностью полисахаридов толокна овсяного, в частности содержащегося в нем бета-глюкана, связывать воду по сравнению с белково-углеводным комплексом пшеничной муки. Крахмал овса обладает большей способностью к набуханию по сравнению с крахмалом пшеницы. Наблюдается снижение насыпной плотности смесей по мере увеличения содержания толокна овсяного, связанное с размером частиц сырьевых компонентов и характером их взаимодействия [25, 26].

Увеличение массовой доли золы в смесях связано с присутствием минеральных веществ, общее содержание которых выше в толокне овсяном по



Рисунок 7. Технологическая схема приготовления теста для печенья по трехстадийной технологии

Figure 7. Three-stage technology of cookie dough

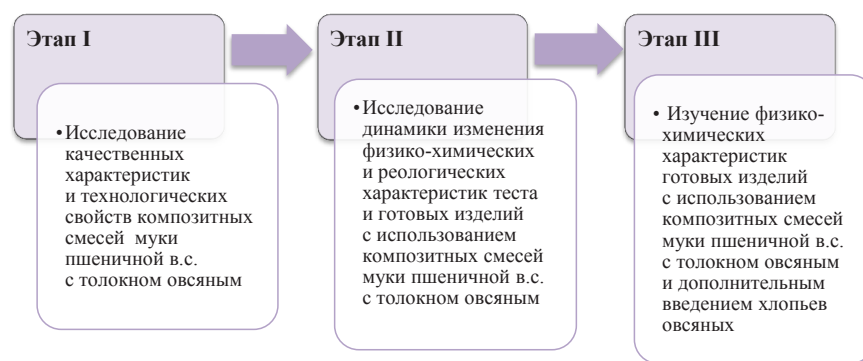


Рисунок 8. Этапы проведения экспериментальных исследований

Figure 8. Stages of experimental research

сравнению с мукой пшеничной. Данный фактор может оказывать влияние на функционально-технологические свойства клейковины муки и приводить к снижению качества готовых изделий [11].

В настоящее время существуют объективные трудности для производителей мучных кондитерских изделий, поскольку на рынке российского сырья присутствует мука хлебопекарная, обладающая высокими хлебопекарными характеристиками: повышенным содержанием белка (глиадин и глютеин) и большим количеством клейковины. Данные показатели не являются оптимальными для производства многих сортов мучных кондитерских изделий, в частности сахарного печенья [26, 27].

Изученная в работе зависимость количества клейковины и массовой доли белка в композитных смесях муки от количества толокна овсяного представлена на рисунке 9.

Введение в смеси муки толокна овсяного приводит к закономерному снижению в них количества клейковины, обусловленному фракционным составом белков овса. Данный факт в определенных пределах количественных значений содержания клейковины

может выступать преимуществом исследуемых смесей, в частности Смесей₁ и Смесей₂, по сравнению с мукой пшеничной высшего сорта, и положительно влиять на качественные характеристики печенья. Общее содержание белка в смесях повышается за счет белков группы глобулинов, преобладающих в толокне.

Известно, что бета-глюкан овса способен образовывать высоковязкие растворы даже при низких концентрациях. Увеличение концентрации растворенного полимера приводит к увеличению вязкости и изменению плотности дисперсной системы. Механические воздействия (перемешивание, сбивание) могут влиять на физико-химические свойства бета-глюкана и способствовать увеличению вязкости содержащих его комплексных систем. Например, теста для мучных кондитерских изделий [28].

Исследование динамики изменения вязкости и плотности проводили на модельных суспензиях, состоящих из исследуемой композитной смеси муки и воды. Это позволяет исключить влияние других видов сырья (сахара, инвертного сиропа, жира) на величину данных показателей. Приготовление модельной суспензии осуществлялось на лабораторном

Таблица 3. Физико-химические показатели муки пшеничной высшего сорта и композитных смесей муки

Table 3. Physicochemical parameters of premium wheat flour and composite flour mixes

Название показателя	Образец				
	Мука	Смесь ₁	Смесь ₂	Смесь ₃	Смесь ₄
Массовая доля влаги, %	7,3	7,1	6,8	6,8	7,2
Массовая доля белка, %	11,7	11,9	12,1	12,2	12,5
Массовая доля жира, %	1,4	2,3	2,7	3,4	3,7
Содержание пищевых волокон, %	3,8	4,1	4,2	4,3	4,5
Коэффициент набухания	2,94	3,41	3,80	3,87	4,60
Насыпная плотность, кг/м ³	566	560	544	539	538
Массовая доля золы, не растворимой в растворе соляной кислоты массовой долей 10 %, %	0,52	0,80	0,92	1,07	1,23

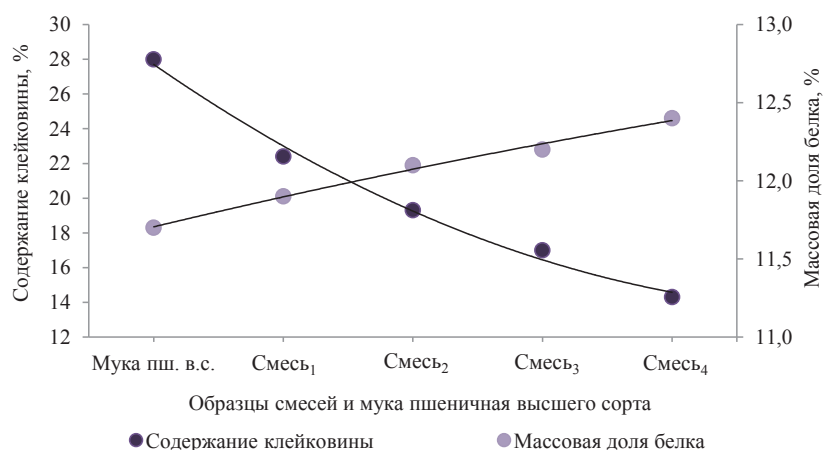


Рисунок 9. Зависимость количества клейковины и массовой доли белка в композитных смесях от количества толокна овсяного

Figure 9. Effect of oatmeal on gluten and protein

миксере с 2-мя венчиками и числом оборотов 600 об/мин. Массовую долю влаги модельной суспензии принимали равной 68,5 %. Контрольным образцом являлась модельная суспензия с использованием муки пшеничной высшего сорта.

Результаты исследований изменения вязкости и плотности суспензий, в зависимости от количества толокна овсяного в композитных смесях муки, представлены на рисунке 10.

Исследование вязкости образцов модельных суспензий, в которых количество толокна в смесях муки менялось от 20 до 50 %, показало, что с увеличением доли толокна вязкость модельных суспензий резко возрастает от 50 до 500 Па·с. Поэтому для приготовления теста оптимальным будет использование Смесей₁ и Смесей₂. По сравнению с

модельной суспензией из муки пшеничной вязкость суспензий из Смесей₁, Смесей₂, Смесей₃ и Смесей₄ увеличивается в 4, 7, 15, 37 раз соответственно. Наблюдается снижение плотности полученных модельных суспензий с увеличением концентраций толокна овсяного.

Характер зависимости вязкости модельных суспензий от коэффициента набухания муки пшеничной и композитных смесей муки представлен на рисунке 11.

Установлено, что повышение коэффициента набухания модельных смесей в области высоких концентраций толокна овсяного оказывает более значительное влияние на нарастание вязкости модельных суспензий, чем в области больших разбавлений. Полученные данные свидетельствуют о

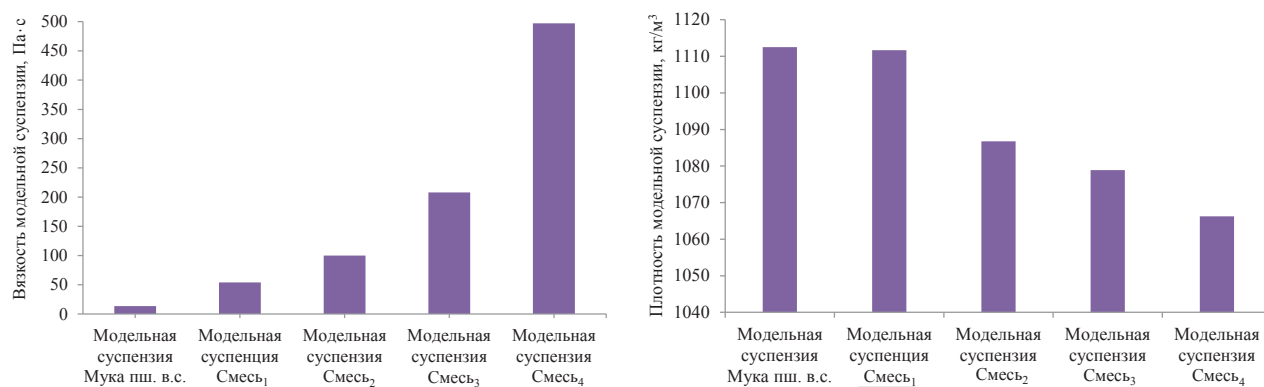


Рисунок 10. Изменение вязкости и плотности модельных суспензий в зависимости от количества толокна овсяного в композитных смесях муки

Figure 10. Effect of oat meal on viscosity and density of model suspensions

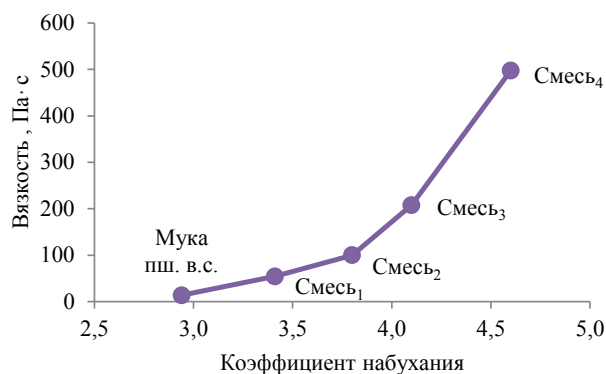


Рисунок 11. Зависимость вязкости модельных суспензий из муки пшеничной и композитных смесей муки от коэффициента набухания

Figure 11. Effect of swelling rate on viscosity of model suspensions

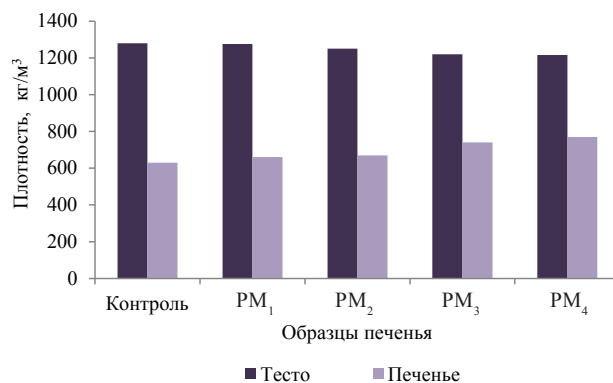


Рисунок 12. Показатели плотности теста и готовых изделий

Figure 12. Indicators of density of dough and finished products

том, что на стадии приготовления теста с введением толокна овсяного потребуются корректировка ряда технологических параметров, обеспечивающих качественное проведение процесса замеса теста и формирования тестовых заготовок.

Второй этап работы заключался в исследовании динамики изменения качественных характеристик готовых изделий с толокном овсяным.

Качественные характеристики готовых изделий представлены в таблице 4, сравнительные показатели плотности теста и готовых изделий – на рисунке 12.

Добавление овсяного толокна приводит к увеличению прочности печенья. Наибольшая прочность 1700 г характерна для образца PM₄ с наибольшим количеством добавленного овсяного толокна (50 % от массы муки). Значения показателей щелочности и массовой доли золы во всех образцах печенья находились в пределах, регламентируемых ГОСТ 24901-2014.

При введении толокна овсяного в исследуемых количествах в рецептурные модели сахарного печенья наблюдается динамика незначительного снижения плотности теста вследствие уменьшения общего

количества белков, способствующих образованию клейковины, связыванию воды и повышению его упруго-вязких свойств. В готовых изделиях наблюдается обратный характер изменения плотности. В PM₃ и PM₄ данный показатель увеличивается, по сравнению с контрольным образцом, – на 17,5 и 22,2 % соответственно. Это может быть обусловлено недостаточным количеством белков муки, способствующих формированию клейковинного каркаса и структуры печенья.

Полученные данные изменения плотности теста коррелируются с рассмотренным выше характером изменения плотности в модельных суспензиях (рис. 13).

Показатель намокаемости, наряду с показателем плотности, является важной оценкой качества сахарного печенья, косвенно характеризующий его структуру и пористость. При введении в рецептуру толокна овсяного в концентрациях PM₁ и PM₂ наблюдается положительная динамика изменения данного показателя. Она обусловлена снижением количества клейковины и ограниченным набуханием белков пшеничной муки, вследствие чего формируется рассыпчатая песчаная структура печенья. Дальнейшее увеличение концентрации

Таблица 4. Качественные характеристики готовых изделий

Table 4. Quality characteristics of finished products

Наименование показателя	Рецептурные модели				
	Контроль	PM ₁	PM ₂	PM ₃	PM ₄
Массовая доля общего сахара, %	20,1	19,8	19,8	19,5	19,4
Намокаемость, %	193	220	221	180	159
Прочность, г	1430	1480	1560	1670	1700
Активность воды	0,360	0,341	0,301	0,299	0,290

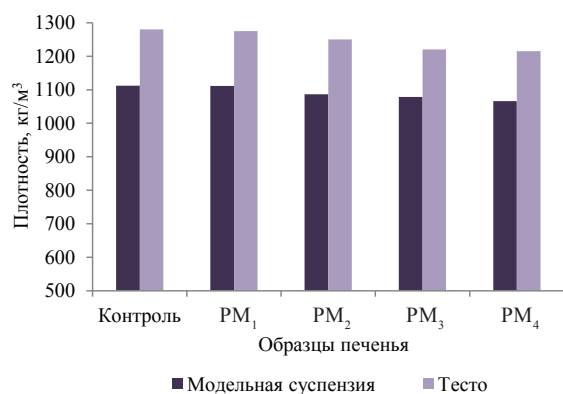


Рисунок 13. Сравнительные показатели плотности модельных суспензий композитных смесей муки и теста

Figure 13. Comparative indicators of the density of model suspensions of composite flour mixes and dough

толокна овсяного в PM₃ и PM₄ приводит к снижению показателя намокаемости готовых изделий, свидетельствующему об уплотнении их структуры, а также снижению пористости и рассыпчатости изделий.

Активность воды A_w – показатель, являющийся характеристикой состояния влаги в продукте. Наряду с массовой долей влаги активность воды является фактором, влияющим на рост микроорганизмов, скорость протекания химических и физико-химических процессов в готовом изделии и его стабильность в процессе хранения. Активность воды зависит не только от массовой доли влаги в продукте, но и от его рецептурного состава и вида используемых сырьевых компонентов. Результаты исследований данного показателя демонстрируют, что толокно овсяное способствует связыванию водной фазы печенья, обеспечивая снижение активности воды в готовом изделии по мере увеличения его концентрации. Данный факт может оказывать положительное влияние на стабильность продукта при хранении.

С целью изучения влияния толокна овсяного на химический состав сахарного печенья произведен расчет показателей содержания белка, жира и углеводов (рис. 14).

Установлено, что замена муки пшеничной высшего сорта на толокно овсяное в рецептуре сахарного печенья приводит к изменению показателей его химического состава. Замена 50 % муки пшеничной высшего сорта на толокно овсяное (PM₄) способствует увеличению содержания белка на 5 %, жира на 6 % и приводит к снижению углеводов на 5 %. Содержание пищевых волокон в толокне овсяном на 30 % превышает их содержание в муке пшеничной высшего сорта. Несмотря на это, введение его в рецептуру сахарного печенья в максимальном

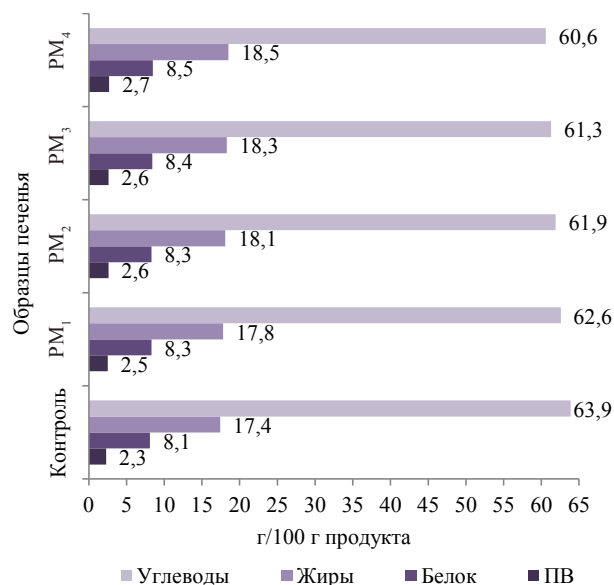


Рисунок 14. Химический состав контрольного образца и рецептурных моделей печенья

Figure 14. Chemistry: control sample vs. cookie formulations

количестве 50 % (PM₄) обеспечивает увеличение содержания пищевых волокон лишь на 17 % (до 2,7 г/100 г изделия).

Для потребителей неотъемлемой составляющей качества пищевой продукции являются ее органолептические характеристики, в частности внешний вид и вкусовое восприятие. В работе оценка готовых изделий осуществлялось с использованием качественного и количественного методов. При количественном методе тестируемый образец печенья оценен по 5-балльной системе по следующим

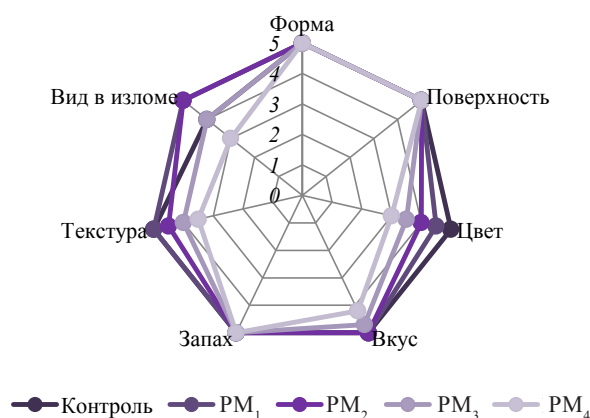


Рисунок 15. Органолептическая оценка контрольного образца и рецептурных моделей печенья

Figure 15. Sensory evaluation: control sample vs. cookie formulations

критериям качества: форма, поверхность, цвет, вид в изломе, запах, вкус и текстура. Распределение баллов по каждому дескриптору органолептических показателей готовых изделий представлено на профилограмме (рис. 15).

Качественные характеристики по каждому дескриптору контрольного образца и рецептурных моделей описаны таблице 5.

Органолептическая оценка показала, что тестируемые образцы готовых изделий с модифицированным составом имеют высокую дегустационную оценку по показателям формы и поверхности. С увеличением количества толокна овсяного в изделиях наблюдалось нарастание интенсивности соломенного цвета с преобладанием серого оттенка, что привело к снижению оценки данного показателя дегустаторами во всех

рецептурных моделях. В PM_1 и PM_2 появляется приятный орехово-злаковый оттенок вкуса. В PM_3 и PM_4 наблюдается доминирование вкуса толокна овсяного, не оказывающего отрицательного воздействия на общую приемлемость печенья. Установлено существенное влияние толокна овсяного на текстуру готовых изделий. В PM_1 и PM_2 присутствует характерная для сахарного печенья сухая и рассыпчатая текстура. В PM_3 и PM_4 появляется сопротивляемость печенья откусыванию и разжевыванию. В данных рецептурных моделях смачивание слюной продукта при разжевывании приводит к образованию массы вязкой и клейкой структуры, негативно влияющей на общее восприятие изделия и наиболее ярко проявляющийся в PM_4 . PM_1 и PM_2 обладают лучшей пористостью по сравнению с контрольным образцом. Однако PM_3 и

Таблица 5. Качественные характеристики контрольного образца и рецептурных моделей

Table 5. Qualitative characteristics: control sample vs. cookie formulations

Наименование показателя	Рецептурные модели				
	Контроль	PM_1	PM_2	PM_3	PM_4
Форма	Правильная, круглая, равномерная по всей толщине, без вздутий и повреждений края				
Поверхность	Гладкая, ровная, сухая, без трещин и прочих дефектов				
Цвет	Равномерный по всему объему изделия, насыщенный светло-соломенный	Равномерный по всему объему, светло-соломенный со слегка сероватым оттенком	Равномерный по всему объему, соломенный с сероватым оттенком	Равномерный по всему объему, соломенный с серым оттенком	Равномерный по всему объему, темно-соломенный с серым оттенком
Вкус и запах	Свойственные выпеченному изделию, характерно выраженные	Свойственные выпеченному изделию, характерно выраженные, приятные гармоничные. Приятное орехово-злаковое послевкусие	Свойственные выпеченному изделию, характерно выраженные, приятные гармоничные. Орехово-злаковый вкус	Свойственные выпеченному изделию, характерно выраженные. Овсяный вкус	Свойственные выпеченному изделию. Преобладание интенсивного овсяного вкуса с жареной нотой
Текстура	При раскусывании или разламывании рассыпчатая, не требующая продолжительного жевания, сухая, песчанистая		При раскусывании или разламывании рассыпчатая, не требующая продолжительного жевания	Плотная, рассыпчатая, слегка крошащаяся, появляется небольшая сопротивляемость откусыванию и вязкость массы при разжевывании	Плотная, не рассыпчатая, значительная сопротивляемость откусыванию и вязкость массы при разжевывании
Вид в изломе	Пропеченное по всему объему без пустот и следов непромеса	Пропеченное по всему объему с тонкостенной мелкой пористостью, без пустот	Пропеченное по всему объему, пористость равномерная с горизонтально направленными порами среднего размера	Пропеченное по всему объему, со среднего размера слегка неравномерными горизонтально направленными порами	Пропеченное по всему объему с неравномерной и недостаточной пористостью

Таблица 6. Количество муки пшеничной, толокна овсяного и хлопьев овсяных в рецептурных моделях

Table 6. Amount of wheat flour, oat meal, and oat flakes in cookie formulations

Наименование и характеристики сырья	Соотношение компонентов муки, % от ее общего количества			
	PM ₃	PM ₅	PM ₄	PM ₆
Мука пшеничная высший сорт	60	60	50	50
Толокно овсяное	40	30	50	30
Хлопья овсяные	–	10	–	20

PM₄ характеризуются недостаточной и неравномерно развитой пористостью.

Отрицательная динамика изменения качественных характеристик образцов печенья с высоким содержанием продуктов переработки овса (толокна овсяного) (PM₃ и PM₄) предопределила проведение третьего этапа исследований: увеличения содержания продуктов переработки овса в сахарном печенье путем введения в его рецептурный состав хлопьев овсяных взамен части толокна овсяного и создание рецептурных моделей PM₅ и PM₆. Для выполнения

поставленной задачи в рецептурной модели PM₃ овсяные хлопья вводили взамен 25 % овсяного толокна (PM₅). В обеих рецептурных моделях на продукты переработки овса было заменено 40 % муки пшеничной. В PM₄ овсяные хлопья вводили взамен 40 % овсяного толокна (PM₆), во второй паре рецептурных моделей на продукты переработки овса заменили 50 % муки пшеничной (табл. 6).

Эксперимент проводили при константных качественных характеристиках и рецептурных соотношениях всего остального сырья, идентичных

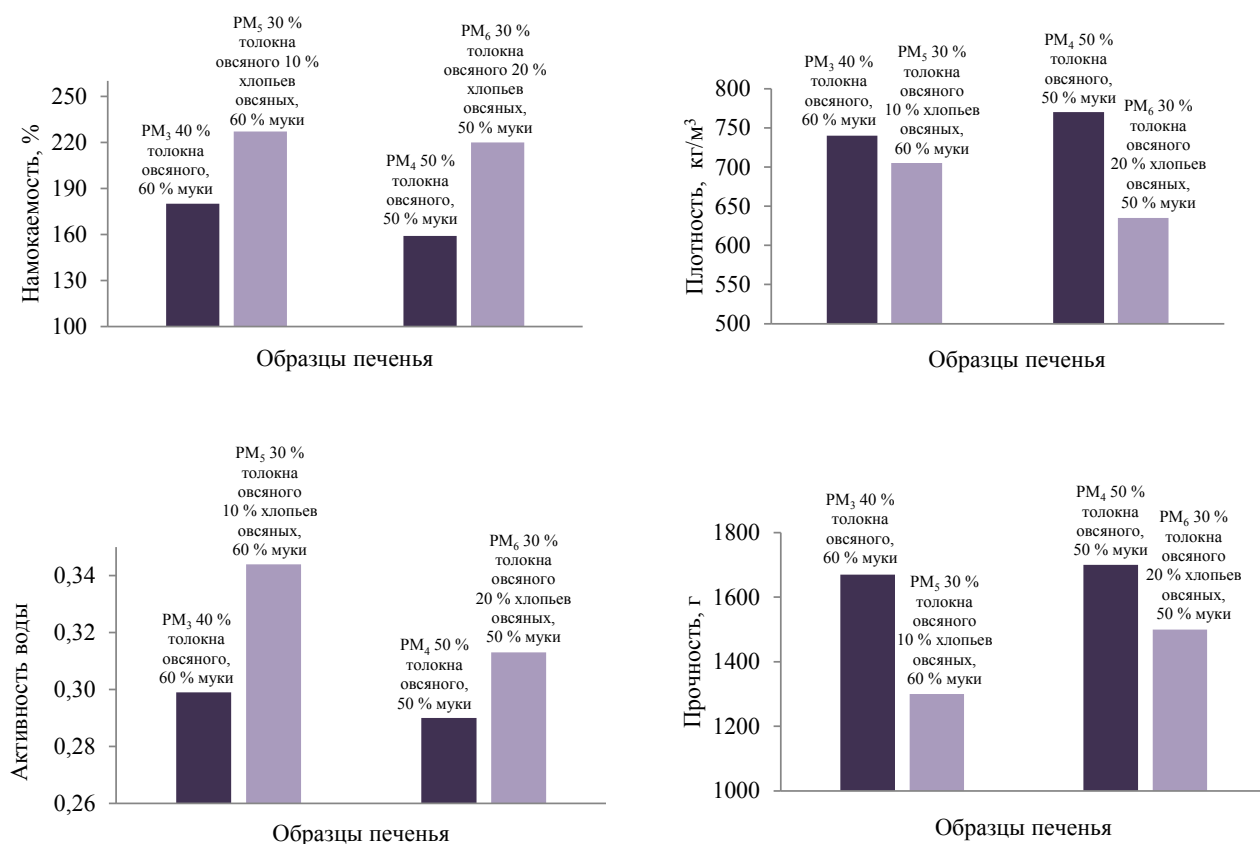


Рисунок 16. Качественные характеристики печенья с овсяными хлопьями в сравнении с печеньем с толокном овсяным

Figure 16. Qualitative characteristics: cookies with oat flakes vs. oat meal cookies

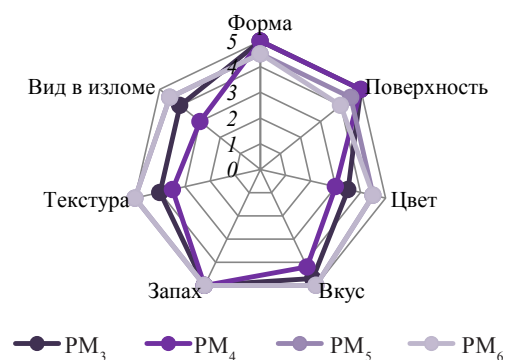


Рисунок 17. Органолептические характеристики печенья с овсяными хлопьями в сравнении с печеньем с толокном овсяным

Figure 17. Sensory properties: cookies with oat flakes vs. oat meal cookies

технологических режимах и параметрах производства изделий.

Результаты исследования качественных характеристик печенья с овсяными хлопьями (PM₅ и PM₆) в сравнении с PM₃ и PM₄ представлены на рисунке 16.

Сравнение в парах рецептурных моделей PM₃/PM₅ и PM₄/PM₆ показало, что ведение в рецептуру печенья хлопьев овсяных взамен части толокна привело к положительной динамике изменения качественных характеристик готовых изделий, по сравнению с образцами, содержащими высокие концентрации толокна овсяного. Намокаемость изделий увеличилась в паре PM₃/PM₅ – на 26 %, в паре PM₄/PM₆ – на 38 %. При этом увеличение общего количества овсяных хлопьев в рецептуре (PM₆) привело к снижению показателя намокаемости печенья по сравнению с PM₅. Наблюдается снижение плотности и прочности готовых изделий, в том числе обусловленное разницей в размерах частиц дисперсной фазы толокна и хлопьев, влияющей на формирование и характер

конечной структуры изделия. Дисперсность толокна и удельная поверхность его частиц значительно выше, чем у овсяных хлопьев. В связи с этим в образцах с хлопьями наблюдается увеличение показателя активности воды вследствие снижения количества связанной влаги.

Результаты исследования качественных характеристик печенья с овсяными хлопьями PM₅ и PM₆ в сравнении с PM₃ и PM₄ представлены на рисунке 17.

Органолептическая оценка показала, что тестируемые образцы готовых изделий с введением овсяных хлопьев имеют высокую дегустационную оценку по всем рассматриваемым дескрипторам. Изделия имеют правильную и равномерную по всей толщине форму, без вздутий и повреждений края, поверхность с характерными вкраплениями частиц хлопьев и незначительной шероховатостью, отрицательно не сказывающимися на общем восприятии изделия. Цвет темно-соломенный. Вкус характерно выраженный, приятный с гармоничным овсяно-злаковым привкусом без постороннего запаха. Текстура рассыпчатая, слегка крошащаяся с небольшой сопротивляемостью при откусывании, более ярко выраженной в PM₆. В изломе изделия, пропеченного по всему объему, наблюдаются неравномерные поры среднего размера, обусловленные наличием фракций хлопьев овсяных, с присутствием вкраплений коричневого цвета. В сравнении с рецептурными моделями с толокном (PM₃ и PM₄) рецептурные модели с хлопьями (PM₅ и PM₆) были более высоко оценены дегустаторами. Однако PM₅ (с 10 % хлопьев, 30 % толокна овсяного и 60 % муки пшеничной) имеет более высокие дегустационные баллы по всем дескрипторам.

Жирнокислотный состав жировой фракции сахарного печенья позволяет прогнозировать интенсивность протекания окислительных процессов и оказывает существенное влияние на их стабильность в процессе хранения. Исследования жирнокислотного состава, наряду с другими факторами, позволяют прогнозировать сроки годности продуктов (табл. 7).

Таблица 7. Жирнокислотный состав жировой фракции печенья

Table 7. Fatty acid composition of the fatty fraction in cookies

Жирная кислота	Обозначение	Рецептурные модели				
		Контроль	PM ₁	PM ₂	PM ₃	PM ₄
Лауриновая	12:0	0,1	–	–	–	–
Миристиновая	14:0	0,6	0,9	0,8	0,8	0,3
Пальмитиновая	16:0	39,8	38,6	40,4	40,5	41,1
Стеариновая	18:0	4,5	6,0	4,4	4,4	4,3
Олеиновая	18:1	40,0	39,9	39,4	39,8	39,0
Линолевая	18:2	12,1	12,6	13,6	13,2	13,3
Арахидовая	20:0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Гадолеиновая	20:1	–	0,2	–	0,1	0,1

Установлено, что введение в рецептурный состав печенья продуктов переработки овса в исследуемых количествах не оказало существенного влияния на состав жировой фракции рецептурных моделей. Во всех изделиях жировая фракция характеризуется высоким содержанием насыщенной пальмитиновой (38,6–41,1 %) и мононенасыщенной олеиновой кислот (39,0–40,0 %), наличием ненасыщенной линолевой кислоты (12,1–13,3 %). Увеличение массовой доли толокна овсяного в рецептуре печенья от 0 до 50 % приводит к увеличению массовой доли линолевой кислоты на 1,1–1,5 %, что прогнозирует увеличение риска окислительной порчи.

Выводы

Введение толокна овсяного в рецептуру сахарного печенья, в зависимости от концентрации, приводит к увеличению вязкости теста, повышению намокаемости (в количестве до 30 % от массы муки) и снижению показателя активности воды готовых изделий. Использование толокна овсяного позволяет снизить общее количество клейковины в тесте и в определенных концентрациях способствует формированию лучшей структуры изделия по сравнению с контрольным образцом с мукой пшеничной. Оптимальным количеством для сахарного печенья является введение 30 % толокна овсяного взамен муки пшеничной. Повышение количества указанного сырья свыше 30 % приводит к отрицательной динамике изменения качественных и органолептических характеристик продукта, а именно способствует снижению показателя намокаемости. Дальнейшее увеличение продуктов переработки овса в рецептурах печенья можно производить за счет введения дополнительно к толокну овсяных хлопьев. Это способствует повышению баллов при дегустационной оценке по каждому из рассматриваемых критериев, снижает показатели плотности и увеличивает намокаемость полученных

изделий. Оптимальное количество овсяных хлопьев, дополнительно вводимых к толокну овсяному, составляет 10 % от общего количества муки в рецептуре. Продукты переработки овса оказывают влияние на жирнокислотный состав печенья, способствуя повышению массовой доли линолевой кислоты. Это может увеличивать риск окислительной порчи готового изделия. Модификация нутриентного состава сахарного печенья путем введения в рецептурный состав продуктов переработки овса (толокна овсяного и хлопьев овсяных) является одним из доступных путей совершенствования нутриентного состава мучных кондитерских изделий, в том числе за счет повышения содержания растворимых пищевых волокон – бета-глюкана. При этом данный способ модификации не требует изменения технологического процесса производства печенья и использования дополнительного оборудования. Разработанные рецептурные модели легли в основу создания ассортимента сахарного печенья для предприятий отрасли.

Критерии авторства

Н. А. Щербакова – 30 %, С. Ю. Мистенева – 30 %, О. А. Руденко – 15 %, Н. Б. Кондратьев – 15 %, А. В. Баскаков – 10 %.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

N.A. Shcherbakova – 30%, S.Yu. Misteneva – 30%, O.S. Rudenko – 15%, N.B. Kondrat'ev – 15%, A.V. Baskakov – 10%.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. What is improper nutrition? URL: <https://www.who.int/features/qa/malnutrition/ru/> (date of the application: 01.04.2021).
2. Principles of sustainable healthy diets in worldwide dietary guidelines: Efforts so far and future perspectives / D. Martini [et al.] // *Nutrients*. 2021. Vol. 13. № 6. <https://doi.org/10.3390/nu13061827>.
3. The burden of excessive saturated fatty acid intake attributed to ultra-processed food consumption: a study conducted with nationally representative cross-sectional studies from eight countries / E. M. Steele [et al.] // *Journal of Nutritional Science*. 2021. Vol. 10. <https://doi.org/10.1017/jns.2021.30>.
4. Cena H., Calder P. C. Defining a healthy diet: Evidence for the role of contemporary dietary patterns in health and disease // *Nutrients*. 2020. Vol. 12. № 2. <https://doi.org/10.3390/nu12020334>.
5. A review of total & added sugar intakes and dietary sources in Europe / V. Azaïs-Braesco [et al.] // *Nutrition Journal*. 2017. Vol. 16. № 1. <https://doi.org/10.1186/s12937-016-0225-2>.
6. Законодательное обеспечение государственной политики в области производства функциональных и специализированных пищевых продуктов питания в Российской Федерации. URL: <https://council.gov.ru/activity/activities/roundtables/88318/> (дата обращения: 01.04.2021).

7. The impact of food reformulation on nutrient intakes and health, a systematic review of modelling studies / C. Federici [et al.] // BMC Nutrition. 2019. Vol. 5. № 1. <https://doi.org/10.1186/s40795-018-0263-6>.
8. Varzakas T., Kafetzopoulos D. Strategic reformulation for development of healthier food products: Emerging technologies and novel ingredients / editors V. Raikos, V. Ranawana // Reformulation as a strategy for developing healthier food products: Challenges, recent developments and future prospects. Cham: Springer, 2019. P. 199–217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23621-2_9.
9. Adolescent snacking behaviors are associated with dietary intake and weight status / N. I. Larson [et al.] // Journal of Nutrition. 2016. Vol. 146. № 7. P. 1348–1355. <https://doi.org/10.3945/jn.116.230334>.
10. The link between the consumer and the innovations in food product development / R. P. F. Guiné [et al.] // Foods. 2020. Vol. 9. № 9. <https://doi.org/10.3390/foods9091317>.
11. Cauvain S. P., Clark R. H. Baking technology and nutrition: Towards a healthier world. Wiley, 2019. 222 p.
12. Rebello C. J., O’Neil C. E., Greenway F. L. Dietary fiber and satiety: The effects of oats on satiety // Nutrition Reviews. 2016. Vol. 74. № 2. P. 131–147. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuv063>.
13. Characterization of cereal β -glucan extracts from oat and barley and quantification of proteinaceous matter / C. Zielke [et al.] // PloS ONE. 2017. Vol. 12. № 2. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172034>.
14. The cholesterol-lowering effect of oats and oat beta glucan: Modes of action and potential role of bile acids and the microbiome / S. A. Joyce [et al.] // Frontiers in Nutrition. 2017. Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00171>.
15. Steinert R. E., Raederstorff D., Wolever T. M. S. Effect of consuming oat bran mixed in water before a meal on glycemic responses in healthy humans – A pilot study // Nutrients. 2016. Vol. 8. № 9. <https://doi.org/10.3390/nu8090524>.
16. Nutritional advantages of oats and opportunities for its processing as value added foods – a review / P. Rasane [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2015. Vol. 52. № 2. P. 662–675. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1072-1>.
17. The effect of oat β -glucan on postprandial blood glucose and insulin responses: a systematic review and meta-analysis / A. Zurbau [et al.] // European Journal of Clinical Nutrition. 2021. Vol. 75. № 11. P. 1540–1554. <https://doi.org/10.1038/s41430-021-00875-9>.
18. Johnson J., Wallace T. Whole grains and their bioactives: Composition and health. Wiley, 2019. 504 p. <https://doi.org/10.1002/9781119129486>.
19. Protein from oat: Structure, processes, functionality, and nutrition / O. E. Mäkinen [et al.] // Sustainable protein sources / editors S. R. Nadathur, J. P. D. Wanasundara, L. Scanlin. Academic Press, 2017. P. 105–119. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00006-8>.
20. Ушаков Т. И., Чиркова Л. В. Овёс и продукты его переработки // Хлебопродукты. 2015. № 11. С. 49–51.
21. Чеботарев О. Н., Шаззо А. Ю., Мартыненко Я. Ф. Технология муки, крупы и комбикормов. М. – Ростов-на-Дону: MapT, 2004. 688 с.
22. Аникина Е. Н., Пасько О. В. Конструирование молочно-растительной основы для производства биопродукта с овсяным толокном // Индустрия питания. 2018. Т. 3. № 1. С. 33–38. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2018-6-1-5>.
23. Использование овсяного толокна в технологии продуктов функционального назначения / А. Е. Куцова [и др.] // Вестник международной академии холода. 2015. № 2. С. 23–27.
24. Анализ современных тенденций в области производства продуктов питания для людей, ведущих активный образ жизни (часть 2) / Л. Г. Елисеева [и др.] // Пищевая промышленность. 2017. № 2. С. 11–15.
25. Loskutov I. G., Khlestkina E. K. Wheat, barley, and oat breeding for health benefit components in grain // Plants. 2021. Vol. 10. № 1. <https://doi.org/10.3390/plants10010086>.
26. Мелешкина Е. П. О новых подходах к качеству пшеничной муки // Контроль качества продукции. 2016. № 11. С. 13–18.
27. Technological properties of flour and their effect on quality indicators of sugar cookies / T. V. Savenkova [et al.] // Пищевые системы. 2019. Т. 2. № 2. С. 13–19. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-13-19>.
28. A concise review on the molecular structure and function relationship of β -glucan / B. Du [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2019. Vol. 20. № 16. <https://doi.org/10.3390/ijms20164032>.

References

1. What is improper nutrition? [Internet]. [cited 2021 Apr 01]. Available from: <https://www.who.int/features/qa/malnutrition/ru/>.
2. Martini D, Tucci M, Bradfield J, Di Giorgio A, Marino M, Bo’ CD, et al. Principles of sustainable healthy diets in worldwide dietary guidelines: Efforts so far and future perspectives. Nutrients. 2021;13(6). <https://doi.org/10.3390/nu13061827>.

3. Steele EM, Batis C, Cediel G, Louzada MLDC, Khandpur N, Machado P, et al. The burden of excessive saturated fatty acid intake attributed to ultra-processed food consumption: a study conducted with nationally representative cross-sectional studies from eight countries. *Journal of Nutritional Science*. 2021;10. <https://doi.org/10.1017/jns.2021.30>.
4. Cena H, Calder PC. Defining a healthy diet: Evidence for the role of contemporary dietary patterns in health and disease. *Nutrients*. 2020;12(2). <https://doi.org/10.3390/nu12020334>.
5. Azaïs-Braesco V, Sluik D, Maillot M, Kok F, Moreno LA. A review of total & added sugar intakes and dietary sources in Europe. *Nutrition Journal*. 2017;16(1). <https://doi.org/10.1186/s12937-016-0225-2>.
6. Zakonodatel'noe obespechenie gosudarstvennoy politiki v oblasti proizvodstva funktsional'nykh i spetsializirovannykh pishchevykh produktov pitaniya v Rossiyskoy Federatsii [Legislative support of state policy in the field of production of functional and specialized foods in the Russian Federation] [Internet]. [cited 2021 Apr 01]. Available from: <https://council.gov.ru/activity/activities/roundtables/88318/>.
7. Federici C, Detzel P, Petracca F, Dainelli L, Fattore G. The impact of food reformulation on nutrient intakes and health, a systematic review of modelling studies. *BMC Nutrition*. 2019;5(1). <https://doi.org/10.1186/s40795-018-0263-6>.
8. Varzakas T, Kafetzopoulos D. Strategic reformulation for development of healthier food products: Emerging technologies and novel ingredients. In: Raikos V, Ranawana V, editors. *Reformulation as a strategy for developing healthier food products: Challenges, recent developments and future prospects*. Cham: Springer; 2019. pp. 199–217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23621-2_9.
9. Larson NI, Miller JM, Watts AW, Story MT, Neumark-Sztainer DR. Adolescent snacking behaviors are associated with dietary intake and weight status. *Journal of Nutrition*. 2016;146(7):1348–1355. <https://doi.org/10.3945/jn.116.230334>.
10. Guiné RPF, Florença SG, Barroca MJ, Anjos O. The link between the consumer and the innovations in food product development. *Foods*. 2020;9(9). <https://doi.org/10.3390/foods9091317>.
11. Cauvain SP, Clark RH. *Baking technology and nutrition: Towards a healthier world*. Wiley; 2019. 222 p.
12. Rebello CJ, O'Neil CE, Greenway FL. Dietary fiber and satiety: The effects of oats on satiety. *Nutrition Reviews*. 2016;74(2):131–147. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuv063>.
13. Zielke C, Kosik O, Ainalem M-L, Lovegrove A, Stradner A, Nilsson L. Characterization of cereal β -glucan extracts from oat and barley and quantification of proteinaceous matter. *PLoS ONE*. 2017;12(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172034>.
14. Joyce SA, Kamil A, Fleige L, Gahan CGM. The cholesterol-lowering effect of oats and oat beta glucan: Modes of action and potential role of bile acids and the microbiome. *Frontiers in Nutrition*. 2017;6. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00171>.
15. Steinert RE, Raederstorff D, Wolever TMS. Effect of consuming oat bran mixed in water before a meal on glycemic responses in healthy humans – A pilot study. *Nutrients*. 2016;8(9). <https://doi.org/10.3390/nu8090524>.
16. Rasane P, Jha A, Sabikhi L, Kumar A, Unnikrishnan VS. Nutritional advantages of oats and opportunities for its processing as value added foods – a review. *Journal of Food Science and Technology*. 2015;52(2):662–675. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1072-1>.
17. Zurbau A, Noronha JC, Khan TA, Sievenpiper JL, Wolever TMS. The effect of oat β -glucan on postprandial blood glucose and insulin responses: a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2021;75(11):1540–1554. <https://doi.org/10.1038/s41430-021-00875-9>.
18. Johnson J, Wallace T. *Whole grains and their bioactives: Composition and health*. Wiley; 2019. 504 p. <https://doi.org/10.1002/9781119129486>.
19. Mäkinen OE, Sozer N, Ercili-Cura D, Poutanen K. Protein from oat: Structure, processes, functionality, and nutrition. In: Nadathur SR, Wanasundara JPD, Scanlin L, editors. *Sustainable protein sources*. Academic Press; 2017. pp. 105–119. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00006-8>.
20. Ushakov TI, Chirkova LV. Oats and its products. *Bread products*. 2015;(11):49–51. (In Russ.).
21. Chebotarev ON, Shazzo AYU, Martynenko YaF. *Tekhnologiya muki, krupy i kombikormov* [Technology of flour, cereals, and compound feeds]. Moscow – Rostov-na-Donu: MarT; 2004. 688 p. (In Russ.).
22. Anikina EN, Pasko OV. Dairy and vegetable base engineering for bioproduct with oatmeal manufacture. *Food Industry*. 2018;3(1):33–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2018-6-1-5>.
23. Kutsova AE, Kutsov SV, Sergienko IV, Lyutikova AO. The use of oatmeal in technology of functional foods. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2015;(2):23–27. (In Russ.).
24. Eliseeva LG, Gribova NA, Berketova LV, Kryukova EV. Analysis of current trends in the field of food products for people leading an active lifestyle (part 2). *Food Processing Industry*. 2017;(2):11–15. (In Russ.).
25. Loskutov IG, Khlestkina EK. Wheat, barley, and oat breeding for health benefit components in grain. *Plants*. 2021;10(1). <https://doi.org/10.3390/plants10010086>.
26. Meleshkina EP. O novykh podkhodakh k kachestvu pshenichnoy muki [On new approaches to wheat flour quality]. *Production Quality Control*. 2016;(11):13–18. (In Russ.).

27. Savenkova TV, Soldatova EA, Misteneva SYu, Taleysnik MA. Technological properties of flour and their effect on quality indicators of sugar cookies. *Food Systems*. 2019;2(2):13–19. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-13-19>.
28. Du B, Meenu M, Liu H, Xu B. A concise review on the molecular structure and function relationship of β -glucan. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(16). <https://doi.org/10.3390/ijms20164032>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-849-858>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Исследование способа интенсификации экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой



Л. В. Плотникова^{ORCID}, И. Б. Плотников*^{ORCID}, П. П. Иванов^{ORCID},
А. Г. Семенов^{ORCID}, И. О. Плотникова^{ORCID}, К. Б. Плотников^{ORCID}

Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 05.09.2021

Принята после рецензирования: 29.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: plotnikov-ib@mail.ru



© Л. В. Плотникова, И. Б. Плотников, П. П. Иванов,
А. Г. Семенов, И. О. Плотникова, К. Б. Плотников, 2021

Аннотация.

Введение. Продукты, содержащие в своем составе натуральные экстракты, пользуются большим спросом. Целью работы является разработка способа интенсификации процесса экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой путем повышения температуры системы взаимодействующих фаз, а также изучение нового способа и нахождение оптимальных значений параметров его проведения.

Объекты и методы исследования. В качестве сырья были выбраны замороженные ягоды клюквы и голубики, широко распространенные на территории РФ. Сырье предварительно подвергалось медленному замораживанию до температуры -18°C . Исследование проводилось в аппарате с вибрационной тарелкой.

Результаты и их обсуждение. С целью интенсификации процесса экстрагирования аппарат был снабжен рубашкой, в которую подавался теплоноситель. Его подача в момент включения аппарата приводит к размораживанию поверхностного слоя ягод и снижает эффективность измельчения, а после протекания процесса разрушения приводит к увеличению его продолжительности. Для устранения данных недостатков разработан новый способ, заключающийся в подаче теплоносителя по окончании процесса измельчения сырья. С целью нахождения оптимальных значений параметров, влияющих на процесс, была проведена серия экспериментов. Полученные данные после математической обработки позволили получить регрессионные уравнения. Установленные оптимальные параметры процесса позволили определить минимальное значение продолжительности процесса разрушения: для ягод клюквы – 2,5 мин, для ягод голубики – 1,5 мин при минимальных затратах мощности: для ягод клюквы – 17,8 Вт, для ягод голубики – 11,7 Вт.

Выводы. Полученные результаты позволяют повысить экономическую эффективность технологического процесса производства натуральных экстрактов, что позволит снизить стоимость готового продукта и увеличить доступность данного продукта для потребителя. Значения параметров процесса могут быть положены в основу проектирования аппаратов данного типа и служить практическими рекомендациями для проведения процесса экстрагирования в аппарате с вибрационной тарелкой замороженного плодово-ягодного сырья.

Ключевые слова. Экстрагирование, клюква, голубика, вибрация, теплоноситель, оптимизация, экстрагент, замораживание

Для цитирования: Исследование способа интенсификации экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой / Л. В. Плотникова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 849–858. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-849-858>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Extraction of Frozen Berry Raw Materials with a Vibration Tray Device

Liubov V. Plotnikova^{ORCID}, Igor B. Plotnikov*^{ORCID}, Pavel P. Ivanov^{ORCID},
Andrey G. Semenov^{ORCID}, Irina O. Plotnikova^{ORCID}, Konstantin B. Plotnikov^{ORCID}

Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: September 05, 2021

Accepted in revised form: November 29, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



Abstract.

Introduction. Products containing natural extracts are in great demand. However, poor production technologies make them too expensive to satisfy consumer demand. As a result, a variety of intensification methods have been developed to increase the economic efficiency of extraction, e.g. low-frequency mechanical vibrations. However, frozen raw materials have to be processed at low temperatures, which makes the method less efficient. The research objective was to intensify the extraction process from frozen berries in a vibration tray device by increasing the temperature of the system of interacting phases.

Study objects and methods. The research involved frozen cranberries and blueberries. They grow everywhere in Western Siberia and are rich vitamins and minerals. The berries were subjected to slow freezing at -18°C , which destroyed the cell structure and increased the processing efficiency. The study was carried out in a lab device with a vibrating tray. All parameters were measured by standard methods.

Results and discussion. The extraction device was equipped with a jacket into which a coolant was fed, i.e. water with a temperature of 55°C . A preliminary series of experiments revealed two negative aspects associated with the supply of coolant into the jacket. First, the surface layer started to thaw, which reduced the efficiency of grinding. Second, the processing time increased. A new method was developed to solve these problems: the coolant was supplied at the end of the grinding. The time of the coolant supply depended on the type of raw materials. The processes that occurred within the device depended on two factors: the frequency of vibrations of the tray and the diameter of the holes in the tray. These factors could be adjusted to intensify the process, but they increased the power costs and energy consumption. A series of experiments determined the optimal values of these parameters. A mathematical analysis revealed regression equations, i.e. how the destruction time and power costs affected the main parameters. The established optimal process parameters made it possible to determine the minimal time of the destruction process: for cranberries – 2.5 min, for blueberries – 1.5 min. The minimal power consumption was 17.8 watts for cranberries and 11.7 watts for blueberries.

Conclusion. The research increased the economic efficiency of the technological process of natural extraction, which can reduce the cost of the finished product and increase its availability. The values of the process parameters can be used to design new similar devices and serve as practical recommendations for berry extraction in vibration tray devices.

Keywords. Extraction, cranberry, blueberry, vibration, heat carrier, optimization, extractant, freezing

For citation: Plotnikova LV, Plotnikov IB, Ivanov PP, Semenov AG, Plotnikova IO, Plotnikov KB. Extraction of Frozen Berry Raw Materials with a Vibration Tray Device. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):849–858. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-849-858>.

Введение

Экстракты, полученные из плодово-ягодного сырья, нашли широкое применение в пищевой промышленности, а также в пивобезалкогольной и молочной. Применение данных экстрактов в качестве вкусо-ароматических и красящих добавок позволяет получить продукты с приятным и естественным вкусом, которые находят отклик у потребителей. Кроме того, экстракты из плодово-ягодного сырья имеют богатый витаминный состав, что позволит увеличить пищевую ценность конечного продукта и сформировать свойства, характерные для профилактических продуктов питания [1–7].

Сдерживающим фактором широкого распространения продуктов, имеющих в своем составе натуральные экстракты, является их высокая стоимость. Это связано с высокой себестоимостью самих экстрактов из-за несовершенства технологии их производства и высокой ценой исходного сырья. Классическими способами получения экстрактов являются перколяция и мацерация. Сущность перколяции заключается в многократном пропускании экстрагента через слой сырья, неподвижно расположенного на сите. Продолжительность

процесса достигает 2–4 суток. Кроме высокой продолжительности производства готового продукта, данный способ не позволяет получить высокое содержание целевых компонентов в готовом экстракте, а также требует использования дорогостоящего экстрагента, исключающего микробиологическую порчу в ходе технологического процесса. Например, водно-спиртовой раствор различной концентрации. Применение каскада перколяционных аппаратов также не позволит решить данную проблему. Низкую эффективность процесса экстрагирования данным способом можно объяснить малоэффективными гидродинамическими условиями массопереноса. Это является одним из основных факторов, влияющих на четвертую стадию процесса экстрагирования в системе твердое тело – жидкость, – перенос растворенного целевого компонента с поверхности твердой фазы в ядро потока экстрагента. Мацерация, предполагающая периодическое перемешивание реакционной смеси (плодово-ягодное сырье – экстрагент), не относится к высокоэффективным способам экстрагирования и имеет те же недостатки, что и перколяция [8–12].

С целью интенсификации процесса применяются различные способы, которые можно разделить на две

группы. К первой относятся химические способы, для которых характерно использование различных экстрагентов и их комбинаций. Например, экстракция сверхкритическими газами. Вторая группа содержит физические способы, заключающиеся в улучшении гидродинамической обстановки внутри аппарата и создании рационального температурного режима проведения процесса. В качестве распространенных способов интенсификации экстрагирования плодово-ягодного сырья можно выделить ультразвуковую экстракцию, экстракцию в поле центробежных сил и экстрагирование в поле низкочастотных механических колебаний. Также применяется комбинация этих способов [13–16]. С точки зрения применимости интересен физический способ интенсификации, заключающийся в наложении на систему взаимодействующих фаз поля низкочастотных механических колебаний.

Данный способ используется в аппарате с вибрационной тарелкой. Конструкция аппарата представляет собой цилиндрический корпус с крышкой и днищем, внутри которого установлен перфорированный диск с отбортовкой – тарелка. Тарелка приводится в движение от электродвигателя через кривошипно-шатунный механизм и совершает возвратно поступательные движения с частотой, составляющей 10–20 Гц, и амплитудой, изменяемой в пределах 3–8 мм. Помимо простоты конструкции, способ, осуществляемый в данном аппарате, позволяет сократить продолжительность процесса до 15–20 мин и получить высокий выход целевых компонентов. Также в данном аппарате возможна обработка замороженного плодово-ягодного сырья.

Сбор плодово-ягодного сырья ограничен по времени сезонностью созревания, поэтому важным является вопрос его сохранности с целью дальнейшей переработки. В настоящее время используется два способа консервирования свежего плодово-ягодного сырья – сушка и замораживание. Сушка предполагает удаление большей части влаги, что позволяет без дополнительных расходов хранить плодово-ягодное сырье в течение длительных сроков. Для данного вида консервирования характерен ряд особенностей: высокая энергоемкость и вероятность повреждения термолабильных нутриентов экстрагированного сырья. Последний фактор приводит к возникновению дополнительных стадий – набухания и растворения целевого компонента, – которые характеризуются высокой продолжительностью и значительным диффузионным сопротивлением. Все это делает сушку не рациональной при переработке плодово-ягодного сырья в концентрированные экстракты [17].

Замораживание как способ консервирования проводится медленно, что позволяет не использовать дорогостоящее скороморозильное оборудование и подготовить сырье для дальнейшего экстрагирования. При медленном замораживании до темпера-

туры -18°C происходит рост крупных кристаллов льда, который приводит к повреждению клеточной стенки, а при дальнейшем экстрагировании облегчает проникновение экстрагента внутрь клетки. Температурный режим хранения не является строгим, т. е. колебания температур относительно установленной могут составлять до 8°C . Колебания температуры более 2°C приводят к перекристаллизации, т. е. к повреждению стенки клеток. Замораживание позволяет сохранить максимальное количество полезных компонентов полученного экстракта, а при применении щадящих способов экстрагирования и криоконцентрирования получить продукт с составом, который не уступает исходному [18].

Аппарат с вибрационной тарелкой позволяет не только перерабатывать сырье без предварительной дефростации, но и проводить несколько стадий производства в нем. Такие стадии, как дефростация сырья и измельчение, требуют производственные площади и наличие специального оборудования, а также дополнительные транспортные манипуляции. Это ведет к росту потерь и себестоимости готового продукта. В аппарате с вибрационной тарелкой происходит измельчение, размораживание и экстрагирование, что положительно влияет на экономическую составляющую процесса производства экстрактов. Следует отметить возможность легкой перенастройки аппарата с одного вида сырья на другой. Это позволяет создавать универсальные технологические линии с гибкой поточной структурой.

Несмотря на все достоинства данного аппарата, выход целевых компонентов недостаточно велик. Для его увеличения в качестве экстрагента применялся водно-спиртовой раствор [19]. Однако применение данного экстрагента накладывает дополнительные требования к герметичности технологического оборудования, пожаро- и взрывобезопасности. Данный вид экстрагента характеризуется высокой стоимостью, необходимостью лицензирования и разработкой схем улавливания паров спирта при концентрировании экстракта выпариванием и т. д. В связи с этим существует необходимость интенсификации процесса другими методами.

Особенностью переработки замороженного сырья в рассматриваемом аппарате является пониженная температура, составляющая 10°C . Это негативно сказывается на скорости экстрагирования, т. к. температура является одним из ведущих факторов, влияющих на процессы массообмена и массопереноса.

Целью работы является разработка способа интенсификации процесса экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой путем повышения температуры системы взаимодействующих фаз, а также изучение нового способа и нахождение оптимальных значений его параметров.

Объекты и методы исследования

В качестве сырья были выбраны ягоды клюквы и голубики, широко распространенные в нашей стране, в том числе Западной Сибири. Ягоды клюквы имеют богатый витаминный состав, преобладающим компонентом которого является витамин С. Кроме того, они содержат дубильные и красящие, воскообразные и другие вещества, а также жиры. Минеральные вещества представлены калием, кальцием, фосфором, железом и марганцем.

Ягоды голубики имеют богатый витаминный и минеральный состав. Из органических веществ в них преобладают углеводы (свыше 70 % сухого веса). Сахара представлены глюкозой и фруктозой, сахарозы содержится небольшое количество или отсутствует полностью. Из органических кислот в состав ягод входят лимонная, яблочная и щавелевая, но по количеству преобладает лимонная. Помимо указанных веществ, в состав ягод голубики входят клетчатка, пектиновые, дубильные и красящие вещества. Семена голубики богаты жиром (28,56–32,17 %) [20].

Схема экстрактора с вибрационной тарелкой представлена на рисунке 1. Аппарат состоит из цилиндрического корпуса 1, снабженного теплообменной рубашкой, в которой имеются патрубки для ввода и вывода теплоносителя. Корпус сверху имеет крышку 7 с патрубком для загрузки экстрагента, а снизу – днище 4 с патрубком 3 для вывода готового продукта. Внутри на вертикальном штоке 5 закреплен рабочий орган – вибрационная тарелка 2 – с зазором относительно стенки аппарата не более 2 мм. Плоскость тарелки перфорирована отверстиями цилиндрической формы, обеспечивая живое сечение 16,5 %. По периферии тарелка имеет отбортовку высотой 12 мм, направленную вниз. С заданными амплитудой и частотой рабочий орган

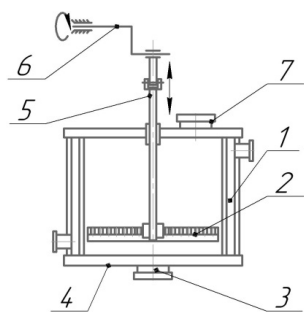


Рисунок 1. Экстрактор с вибрационной тарелкой:
1 – корпус; 2 – перфорированная тарелка;
3 – устройство вывода фаз; 4 – днище; 5 – шток;
6 – кривошипно-шатунный механизм; 7 – крышка

Figure 1. Extractor with a vibrating tray: 1 – jacket;
2 – perforated tray; 3 – phase output device; 4 – bottom;
5 – stock; 6 – crank mechanism; 7 – lead

совершает возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости за счет кривошипно-шатунного механизма 6.

Экстрактор работает следующим образом. Плодово-ягодное сырье температурой -18°C загружают в корпус под вибрационную тарелку, после чего закрывается крышка. Высота от днища до тарелки составляет 45 мм. Через патрубок в крышке заливается экстрагент (вода температурой $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$) и включается электродвигатель, приводящий в движение вибрационную тарелку через кривошипно-шатунный механизм. Амплитуда колебаний тарелки составляет 8 мм.

Для повышения температуры системы взаимодействующих фаз, находящихся внутри аппарата, в рубашку подается теплоноситель – вода температурой 55°C . В процессе работы сырье подвергается разрушению, размораживанию и экстрагированию. После окончания процесса аппарат разгружается через патрубок 3 [21].

В процессе работы измерялся показатель содержания сухих водорастворимых веществ в экстракте. Для этого отбирались пробы в объеме 5 мл. Далее они подвергались фильтрованию и термостатированию при температуре 20°C с последующим измерением содержания сухих водорастворимых веществ рефрактометрическим методом. Частота колебаний тарелки устанавливалась и контролировалась по частоте вращения вала электродвигателя при помощи тахометра НТ-522.

Для определения дисперсного состава твердой фазы применялся набор сит с номерами 1,7, 1,25, 1, 0,63, 0,45, 0,4, 0,315 и 0,2. Анализ проводился следующим образом. Систему твердое тело – жидкость процеживали последовательно через сита. Сход с каждого сита подвергался сушке при температуре 23°C с продолжительностью не менее 24 ч. Затем полученную твердую фазу взвешивали на аналитических весах 2 класса ВЛР-200г, погрешность которых не превышает $\pm 0,15$ мг, с применением набора образцовых гирь, погрешность которых не превышает 0,01 мг.

С целью получения более точных значений измеряемых параметров проводилась серия повторных опытов. Результаты, значительно отличающиеся от средних, исключались. Кроме того, качественный анализ каждой пробы полученного экстракта проводился в трех повторях, что позволяет говорить о достоверности результатов.

Для нахождения оптимальных значений параметров работы аппарата варьировались два фактора: диаметр отверстий перфорации вибрационной тарелки и частота ее колебаний. В таблице 1 представлены регулируемые параметры проведения процесса.

Условия проведения эксперимента были выбраны, исходя из литературных источников, а

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

Table 1. Experimental conditions

Фактор	Обозначение факторов	Уровни		Центр эксперимента	Шаг варьирования
		Нижний	Верхний		
Диаметр отверстий перфорации тарелки (d), мм	C ₁	2,5	3,5	3	0,5
Частота колебаний тарелки (T), Гц	C ₂	8,3	13,3	10,8	1,7

также основывались на предварительной серии экспериментов.

Результаты и их обсуждение

Серия экспериментов с нагревом системы взаимодействующих фаз показала два негативных момента. Подача теплоносителя в рубашку одновременно с запуском привода колебаний тарелки приводит к быстрому нагреву системы. Это вызывает быстрое размораживание верхних слоев плодово-ягодного сырья и приобретение ими упругих свойств. В результате эффективность разрушения снижается. Однако в некоторых случаях разрушение не происходило вовсе, что характерно при использовании ягод клюквы. В итоге менее эффективное разрушение приводит к увеличению продолжительности процесса и снижению концентрации целевых компонентов в готовом

экстракте. На рисунке 2 приведена зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя в момент включения аппарата для ягод голубики и клюквы.

Подача теплоносителя по истечении времени, достаточного для полного разрушения, приводит к увеличению продолжительности процесса в целом. На рисунке 3 приведена зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при поздней подаче теплоносителя ягод голубики и клюквы.

Из графиков видно, что подача теплоносителя после окончания процесса разрушения сырья приводит к ступенчатости выхода целевых компонентов. То есть процесс, происходящий в аппарате, делится на две стадии. На первой стадии происходит разрушение ягод и их размораживание, после чего начинается процесс экстрагирования. На второй стадии происходит доизмельчение сырья и процесс экстрагирования, продолжающийся до предельного насыщения экстрагента целевыми компонентами.

Одной из задач исследования нового способа является нахождение рационального времени подачи теплоносителя и нагрева системы взаимодействующих фаз с целью интенсификации экстрагирования. При этом процессы измельчения сырья и его размораживания должны быть уже закончены. Это позволит сгладить ступенчатость выхода целевых компонентов в экстрагент.

Размеры частиц шрота не должны превышать 1 мм в 80 % его массы, что является рациональным для проведения процесса экстрагирования. Была

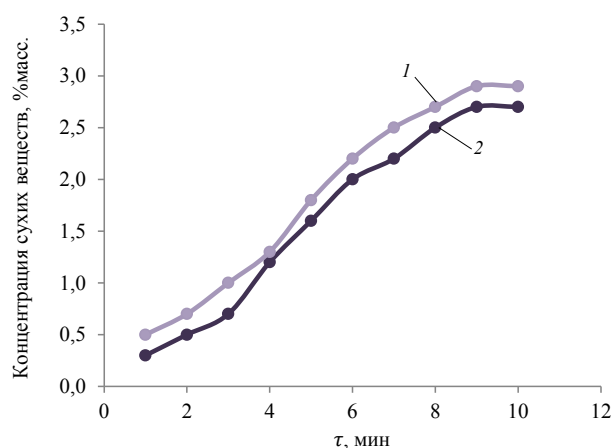


Рисунок 2. Зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя в момент включения аппарата для ягод голубики (1) и клюквы (2)

Figure 2. Effect of extraction time on the yield when the coolant was fed at the onset: 1 – blueberries, 2 – cranberries

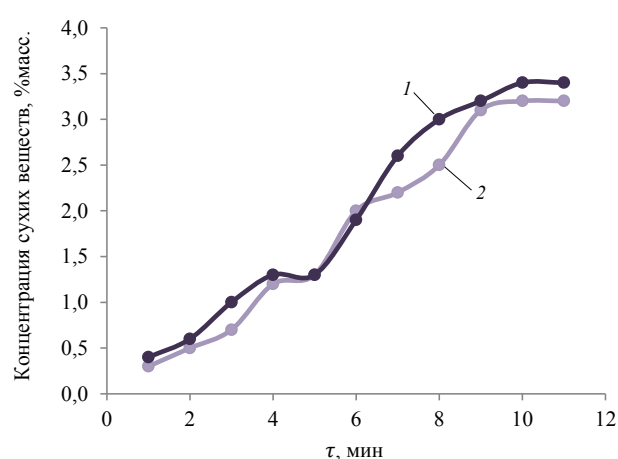


Рисунок 3. Зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя после протекания процесса разрушения для ягод голубики (1) и клюквы (2)

Figure 3. Effect of extraction time on the yield when the coolant was fed after grinding: 1 – blueberries, 2 – cranberries

проведена серия экспериментов, в которой для определения скорости разрушения и размеров частиц твердой фазы через каждую минуту процесс останавливался и при помощи ситового анализа определялся гранулометрический состав. Результаты показали, что рациональным временем подачи теплоносителя после начала протекания процесса в исследуемых условиях проведения эксперимента для ягод клюквы было 3 мин, а для ягод голубики 2 мин. Разные показатели времени измельчения можно объяснить различными физико-механическими свойствами ягод. Ягоды голубики, в отличие от ягод клюквы, имеют меньшую упругость и разрывную прочность кожицы и мякоти, которые легко разрываются при оттаивании поверхностных слоев.

Результаты проведенных исследований с подачей теплоносителя в рубашку после окончания процесса измельчения сырья позволили выявить новизну данного способа, что легло в основу патентной заявки.

Ведущими факторами, влияющими на разрушение сырья, являются частота колебаний вибрационной тарелки и диаметр отверстий ее перфорации. Данные факторы влияют как на продолжительность процесса, так и на затраты мощности. Поэтому необходимо определить их оптимальные значения, позволяющие добиться минимальной продолжительности процесса разрушения сырья при минимальных затратах мощности.

Серия экспериментов со значениями варьируемых параметров, указанных в таблице 1, позволила получить экспериментальные данные. Их обработка в программе STATISTICA дала регрессионные уравнения зависимости продолжительности процесса разрушения сырья от частоты колебаний вибрационной тарелки и диаметра отверстий перфорации, а также затрат мощности от этих же параметров. Для ягод клюквы уравнения приобретают следующий вид:

$$\tau = 210,87 + 60,01 \times C_1 - 18,07 \times C_2 \quad R = 98,2 \quad (1)$$

$$N = -51,31 + 11,21 \times C_1 + 6,9 \times C_2 - 1,41 \times C_1 \times C_2 \quad R = 95,6 \quad (2)$$

где коэффициент C_1 – безразмерное значение фактора – диаметр отверстий; C_2 – безразмерное значение фактора – частота колебания вибрационной тарелки.

Оценка адекватности полученного уравнения экспериментальным данным проводилась по параметру R (коэффициент множественной регрессии), который показывает насколько точно уравнения описывают экспериментальные данные. Уравнения для ягод голубики выглядят следующим образом:

$$\tau = 149,4 + 59,55 \times C_1 - 17,85 \times C_2 \quad R = 98,7 \quad (3)$$

$$N = 12,1 + 0,74 \times C_1 + 0,25 \times C_2 - 0,17 \times C_1 \times C_2 \quad R = 97,2 \quad (4)$$

Полученные регрессионные уравнения (1)–(4), описывающие зависимость продолжительности первой стадии – разрушение сырья, размораживание с переходом сока в объем экстрагента, носят линейный характер и учитывают совместное влияние исследуемых факторов. Характер кривой для первой стадии процесса – прямая. Однако на графиках, представленных на рисунках 2–4, этот характер не явно выражен, что можно объяснить погрешностями при определении содержания сухих веществ в экстракте. При этом линия тренда имеет корректный вид. Анализ коэффициентов при факторах позволяет утверждать, что увеличение диаметра отверстий в вибрационной тарелке приводит к росту продолжительности процесса, а увеличение частоты колебаний вибрационной тарелки, напротив, снижает продолжительность первой стадии. Необходимо отметить, что значимое межфакторное взаимодействие отсутствует. Сопоставимые по величине коэффициенты факторов говорят об одинаковой природе и силе их влияния на продолжительность процесса, т. е. вид сырья и его свойства в этом вопросе не играют основную роль. Анализ регрессионных уравнений, описывающих зависимость затрат мощности от факторов диаметра отверстий и частоты колебаний вибрационной тарелки, позволяет утверждать следующее. Увеличение диаметра отверстий и частоты колебаний ведет к росту затрачиваемой мощности, но появляется межфакторное взаимодействие, которое снижает эти затраты. Величина коэффициента при межфакторном взаимодействии указывает на его весомость.

Для нахождения оптимальных значений параметров, при которых продолжительность процесса и затраты мощности будут минимальны, была проведена оптимизация, осуществленная с использованием метода Ньютона в системе Microsoft Excel.

В результате были определены значения частоты колебаний вибрационной тарелки и диаметра отверстий перфорации для ягод клюквы: $T = 13,3$ Гц, $d = 3$ мм и ягод голубики: $T = 11,7$ Гц, $d = 2,5$ мм. Полученные значения факторов были проверены опытным путем. Результаты показали, что расхождение между теоретическими и практическими значениями продолжительности процесса и затрат мощности не превышает 5 %. Различная величина факторов для каждого вида ягод может быть объяснена разницей в структуре и свойствах замороженных ягод. Ягоды голубики в замороженном состоянии имеют меньшее значение предела прочности, чем ягоды клюквы, и разрушаются при меньших значениях нагрузки. Значение конечной концентрации сухих веществ в экстракте составило 3,2 и 3,4 %масс. для ягод клюквы и голубики соответственно. Рациональное время подачи теплоносителя в рубашку для ягод клюквы составляет 2,5 мин, а для ягоды голубики 1,5 мин.

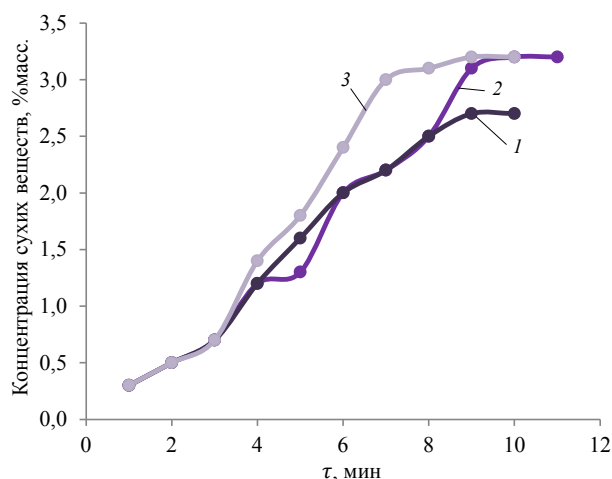


Рисунок 4. Зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя в момент включения аппарата (1), после протекания процесса разрушения (2) и после 2,5 мин работы аппарата (3) для ягод клюквы

Figure 4. Effect of extraction time on the yield when the coolant was fed at the onset (1), after grinding (2), and at 2.5 min (3): cranberries

На рисунке 4 приведены зависимости выхода сухих водорастворимых веществ от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя в момент включения аппарата, после протекания разрушения и после 2,5 мин работы аппарата для ягод клюквы.

График, представленный на рисунке 4, позволяет утверждать, что недостатки, выявленные предварительной серией экспериментов, исключаются новым способом подачи теплоносителя. Кривая 3 при прочих равных условиях имеет большее конечное значение концентрации сухих водорастворимых веществ, чем кривая 1: 3,2 против 2,7 %масс. Данный результат объясняется усложнением процесса разрушения ягод в аппарате при их быстром размораживании. Это замедляет процесс экстрагирования и за исследуемый промежуток времени система не успевает выйти на равновесную концентрацию, соответствующую выбранному соотношению обрабатываемых фаз. Несмотря на то, что в опытах (2) и (3) конечное содержание целевого компонента совпадает и система достигает значения равновесной концентрации, продолжительность процесса кривой 3 меньше. Следовательно, меньше затраты энергии на его проведение. Кроме того, кривая 3 не имеет ступенчатого участка, который явно выражен на кривой 2 в промежутке между четвертой и пятой минутами, и характеризуется минимальным приростом концентрации сухих водорастворимых веществ. Это ведет к увеличению продолжительности

процесса в целом. Кривая 3 имеет больший угол наклона, чем кривые 1 и 2, что говорит о высокой скорости протекающего при этих параметрах процесса. До подачи теплоносителя резкий рост концентрации экстракта объясняется интенсивным измельчением сырья, размораживанием сока и его переходом в экстрагент. Подача теплоносителя после 2,5 мин от начала процесса способствует созданию в аппарате гидродинамических условий, близких к аппарату «идеального смешения». Они характеризуются гидромеханическим воздействием на частицы обрабатываемой твердой фазы, практически мгновенным выравниванием температурных и концентрационных полей, что ведет к повышению скорости протекающего процесса экстрагирования. Это обстоятельство подтверждается еще и тем, что к моменту окончания процесса, соответствующего 9 мин, температура в аппарате совпадает с температурой подаваемого теплоносителя – 55 °С.

Таким образом, исследованный режим работы аппарата с вибрационной тарелкой, реализующий определенные по уравнениям (1) и (2) оптимальные значения основных параметров, позволяет добиться максимальной скорости извлечения сухих водорастворимых веществ и достижения их равновесной концентрации. Этот результат достигается в результате организованного прохождения всех этапов переработки замороженного плодово-ягодного сырья, а именно первичное дробление замороженных ягод, сопровождающееся размораживанием кристаллов льда и выходом не связанного сока, и последующее доизмельчение при повышенных температурах, также сопровождающееся выходом из клеточной ткани сока и экстрагированием капиллярно-пористой структуры мякоти ягод.

Кроме перечисленных положительных эффектов с точки зрения технологии получения концентрированных плодово-ягодных экстрактов, способ имеет ряд достоинств. Полученный экстракт имеет температуру 52–54 °С, что позволит упростить транспортировку и фильтрование, а также дальнейшее концентрирование с применением вакуум-выпарных установок.

Расчет экономической эффективности реализации рассматриваемого способа показал, что дополнительные затраты, связанные с капитальными вложениями на оборудование теплообменного аппарата для нагрева теплоносителя, а также эксплуатационные затраты, связанные с нагревом и подачей теплоносителя, нивелируются повышением выхода сухих водорастворимых веществ и сокращением продолжительности проведения процесса.

При переходе от периодического способа организации технологического потока к непрерывному за счет использования каскада из аппаратов с

вибрационной тарелкой используемый аппарат может сохранять высокую температуру между циклами разгрузки готового продукта и загрузки сырья. Это приведет к размораживанию ягод на начальной стадии процесса и нарушит благоприятные условия для их разрушения. Для исключения данного недостатка предлагается удалять теплоноситель из рубашки аппарата. Это позволит металлоконструкции аппарата остыть до температуры окружающей среды за время разгрузки экстракта и загрузки сырья.

Выводы

К результатам работы можно отнести следующее:

- проведено экспериментальное исследование способа интенсификации процесса получения плодово-ягодных экстрактов из замороженного сырья;
- определены факторы, влияющие на процессы, протекающие в аппарате;
- с помощью серии экспериментов и применения математической обработки полученных данных определены оптимальные значения параметров процесса для рассматриваемого способа, результаты которых были подтверждены контрольной серией экспериментов.

Данные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- новый разработанный способ экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья позволит повысить экономическую эффективность технологического процесса производства натуральных экстрактов. Следовательно, снизится стоимость готового продукта и увеличится доступность данного продукта для потребителя;
- полученные оптимальные значения параметров проведения процесса в аппарате с вибрационной тарелкой могут быть положены в основу проектирования аппаратов данного типа и служить практическими рекомендациями для проведения

процесса экстрагирования в аппарате с вибрационной тарелкой замороженного плодово-ягодного сырья.

С целью снижения степени измельчения шрота после подачи теплоносителя, а также сокращения расхода мощности частота колебаний вибрационной тарелки на второй стадии процесса может быть снижена. Однако ее величина будет зависеть от скорости процесса экстрагирования и типа сырья. Данный аспект подлежит дальнейшему исследованию.

Критерии авторства

П. П. Иванов – руководство работой в целом (20 %).
Л. В. Плотникова – планирование эксперимента, разработка методики проведения эксперимента и обработка результатов, написание рукописи (30 %).
И. Б. Плотников – проведение исследований (20 %).
А. Г. Семенов – консультация по математической обработке экспериментальных данных (10 %).
И. О. Плотникова – консультация в ходе исследований (10 %).
К. Б. Плотников – консультация в ходе написания рукописи (10 %).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

P.P. Ivanov supervised the project (20%).
L.V. Plotnikova designed the experiment, developed the method, processed the results, and wrote the manuscript (30%).
I.B. Plotnikov performed the research (20%).
A.G. Semenov consulted on the mathematical processing (10%).
I.O. Plotnikova consulted on the experiment (10%).
K.B. Plotnikov proofread the manuscript (10%).

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) extract impairs nairovirus infection by inhibiting the attachment to target cells / M. Mirandola [et al.] // Pathogens. 2021. Vol. 10. № 8. <https://doi.org/10.3390/pathogens10081025>.
2. Optimization of canthaxanthin extraction from fermented biomass of *Paracoccus carotinifaciens* VTP20181 bacteria strain isolated in Vietnam / L. X. Duy [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 117–125. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-117-125>.
3. α -amylase from white pitaya (*Hylocereus undatus* L.) peel: optimization of extraction using full factorial design / Z. Shad [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 79–86. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-79-86>.
4. Ultrasonic and microwave activation of raspberry extract: antioxidant and anti-carcinogenic properties / N. B. Eremeeva [et al.] // Foods and Raw Materials. 2019. Vol. 7. № 2. P. 264–273. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-264-273>.
5. Valorization of european cranberry bush (*Viburnum opulus* L.) berry pomace extracts isolated with pressurized ethanol and water by assessing their phytochemical composition, antioxidant, and antiproliferative activities / L. Dienaite [et al.] // Foods. 2020. Vol. 9. № 10. <https://doi.org/10.3390/foods9101413>.

6. Fractionation of cranberry pomace lipids by supercritical carbon dioxide extraction and on-line separation of extracts at low temperatures / L. Tamkutė [et al.] // Journal of Supercritical Fluids. 2020. Vol. 163. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104884>.
7. The effect of postharvest ultraviolet irradiation on the content of antioxidant compounds and the activity of antioxidant enzymes in tomato / L. Dyshlyuk [et al.] // Heliyon. 2020. Vol. 6. № 1. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03288>.
8. Zero waste biorefining of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) pomace into functional ingredients by consecutive high pressure and enzyme assisted extractions with green solvents / V. Kitrytė [et al.] // Food Chemistry. 2020. Vol. 322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126767>.
9. Phytochemical analysis, antioxidant activities and optimized extraction of embelin from different genotypes of *Embelia ribes* Burm f.: a woody medicinal climber from Western Ghats of India / V. Kamble [et al.] // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2020. Vol. 26. № 9. P. 1855–1865. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00859-2>.
10. Optimization of microwave and ultrasound extraction methods of açai berries in terms of highest content of phenolic compounds and antioxidant activity / M. Hanula [et al.] // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 23. <https://doi.org/10.3390/app10238325>.
11. Agnieszka M., Michał S., Robert K. Selection of conditions of ultrasound-assisted, three-step extraction of ellagitannins from selected berry fruit of the *Rosaceae* family using the response surface methodology // Food Analytical Methods. 2020. Vol. 13. № 8. P. 1650–1665. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01762-y>.
12. Utilization of strawberry and raspberry waste for the extraction of bioactive compounds by deep eutectic solvents / M. Vázquez-González [et al.] // LWT. 2020. Vol. 130. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109645>.
13. Evaluation of green extraction processes, lipid composition and antioxidant activity of pomegranate seed oil / E. Rojo-Gutiérrez [et al.] // Journal of Food Measurement and Characterization. 2021. Vol. 15. № 2. P. 2098–2107. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00804-7>.
14. Berry fruits as source of pectin: Conventional and non-conventional extraction techniques / N. Muñoz-Almagro [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2021. Vol. 186. P. 962–974. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.016>.
15. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review / L. R. Adetunji [et al.] // Food Hydrocolloids. 2017. Vol. 62. P. 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015>.
16. Enzymatic extraction of pectin from artichoke (*Cynara scolymus* L.) by-products using Celluclast®1.5L / C. Sabater [et al.] // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 190. P. 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.055>.
17. Popov A. M., Plotnikov K. B., Donya D. V. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials // Foods and Raw Materials. 2017. Vol. 5. № 1. P. 137–143. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143>.
18. Cryoconcentration of flavonoid extract for enhanced biophotovoltaics and pH sensitive thin films / A. Demirbas [et al.] // Biotechnology Progress. 2018. Vol. 34. № 1. P. 206–217. <https://doi.org/10.1002/btpr.2557>.
19. The determination of antioxidant activity of ethanol extracts of gynostemma pentaphyllum / A. A. Nizamova [et al.] // Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences. 2021. Vol. 17. № 1. P. 91–98.
20. Prevention and treatment effects of edible berries for three deadly diseases: Cardiovascular disease, cancer and diabetes / H. Yang [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 59. № 12. P. 1903–1912. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1432562>.
21. Способ получения плодово-ягодных экстрактов: пат. 2547176C1 Рос. Федерация. № 2014101853/13 / Сорокопуд А. Ф. [и др.]; заявл. 21.01.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. 6 с.

References

1. Mirandola M, Salvati MV, Rodigari C, Appelberg KS, Mirazimi A, Maffei ME, et al. Cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) extract impairs nairovirus infection by inhibiting the attachment to target cells. Pathogens. 2021;10(8). <https://doi.org/10.3390/pathogens10081025>.
2. Duy LX, Toan TQ, Anh DV, Hung NP, Huong TTT, Long PQ, et al. Optimization of canthaxanthin extraction from fermented biomass of *Paracoccus carotinifaciens* 20181 VTP bacteria strain isolated in Vietnam. Foods and Raw Materials. 2021;9(1):117–125. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-117-125>.
3. Shad Z, Mirhosseini H, Motshakeri M, Sanjabi MR, Meor Hussin AS. α -amylase from white pitaya (*Hylocereus undatus* L.) peel: optimization of extraction using full factorial design. Foods and Raw Materials. 2021;9(1):79–86. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-79-86>.
4. Ereemeeva NB, Makarova NV, Zhidkova EM, Maximova VP, Lesova EA. Ultrasonic and microwave activation of raspberry extract: antioxidant and anti-carcinogenic properties. Foods and Raw Materials. 2019;7(2):264–273. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-264-273>.
5. Dienaite L, Pukalskiene M, Pereira CV, Matias AA, Venskutonis PR. Valorization of european cranberry bush (*Viburnum opulus* L.) berry pomace extracts isolated with pressurized ethanol and water by assessing their phytochemical composition, antioxidant, and antiproliferative activities. Foods. 2020;9(10). <https://doi.org/10.3390/foods9101413>.

6. Tamkutė L, Pukalskas A, Syrpas M, Urbonavičienė D, Viškelis P, Venskutonis PR. Fractionation of cranberry pomace lipids by supercritical carbon dioxide extraction and on-line separation of extracts at low temperatures. *Journal of Supercritical Fluids*. 2020;163. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104884>.
7. Dyshlyuk L, Babich O, Prosekov A, Ivanova S, Pavsky V, Chaplygina T. The effect of postharvest ultraviolet irradiation on the content of antioxidant compounds and the activity of antioxidant enzymes in tomato. *Heliyon*. 2020;6(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03288>.
8. Kitrytė V, Kavaliauskaitė A, Tamkutė L, Pukalskienė M, Syrpas M, Rimantas Venskutonis P. Zero waste biorefining of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) pomace into functional ingredients by consecutive high pressure and enzyme assisted extractions with green solvents. *Food Chemistry*. 2020;322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126767>.
9. Kamble V, Attar U, Umdale S, Nimbalkar M, Ghane S, Gaikwad N. Phytochemical analysis, antioxidant activities and optimized extraction of embelin from different genotypes of *Embelia ribes* Burm f.: a woody medicinal climber from Western Ghats of India. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2020;26(9):1855–1865. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00859-2>.
10. Hanula M, Wyrwiz J, Moczowska M, Horbańczuk OK, Pogorzelska-Nowicka E, Wierzbicka A. Optimization of microwave and ultrasound extraction methods of açai berries in terms of highest content of phenolic compounds and antioxidant activity. *Applied Sciences*. 2020;10(23). <https://doi.org/10.3390/app10238325>.
11. Agnieszka M, Michał S, Robert K. Selection of conditions of ultrasound-assisted, three-step extraction of ellagitannins from selected berry fruit of the *Rosaceae* family using the response surface methodology. *Food Analytical Methods*. 2020;13(8):1650–1665. <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01762-y>.
12. Vázquez-González M, Fernández-Prior Á, Bermúdez Oria A, Rodríguez-Juan EM, Pérez-Rubio AG, Fernández-Bolaños J, et al. Utilization of strawberry and raspberry waste for the extraction of bioactive compounds by deep eutectic solvents. *LWT*. 2020;130. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109645>.
13. Rojo-Gutiérrez E, Carrasco-Molinari O, Tirado-Gallegos JM, Levorio-Gómez A, Chávez-González ML, Baeza-Jiménez R, et al. Evaluation of green extraction processes, lipid composition and antioxidant activity of pomegranate seed oil. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2021;15(2):2098–2107. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00804-7>.
14. Muñoz-Almagro N, Ruiz-Torralba A, Méndez-Albiñana P, Guerra-Hernández E, García-Villanova B, Moreno R, et al. Berry fruits as source of pectin: Conventional and non-conventional extraction techniques. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021;186:962–974. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.016>.
15. Adetunji LR, Adekunle A, Orsat V, Raghavan V. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. *Food Hydrocolloids*. 2017;62:239–250. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015>.
16. Sabater C, Corzo N, Olano A, Montilla A. Enzymatic extraction of pectin from artichoke (*Cynara scolymus* L.) by-products using Celluclast®1.5L. *Carbohydrate Polymers*. 2018;190:43–49. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.055>.
17. Popov AM, Plotnikov KB, Donya DV. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials. *Foods and Raw Materials*. 2017;5(1):137–143. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143>.
18. Demirbas A, Groszman K, Pazmiño-Hernandez M, Vanegas DC, Welt B, Hondred JA, et al. Cryoconcentration of flavonoid extract for enhanced biophotovoltaics and pH sensitive thin films. *Biotechnology Progress*. 2018;34(1):206–217. <https://doi.org/10.1002/btpr.2557>.
19. Nizamova AA, Galiakhmetova EK, Mochalov KS, Bokov DO, Farnam G, Kudashkina NV. The determination of antioxidant activity of ethanol extracts of gynostemma pentaphyllum. *Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021;17(1):91–98.
20. Yang H, Tian T, Wu D, Guo D, Lu J. Prevention and treatment effects of edible berries for three deadly diseases: Cardiovascular disease, cancer and diabetes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017;59(12):1903–1912. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1432562>.
21. Sorokopud AF, Sorokopud VV, Plotnikov IB, Plotnikova LV. Fruit-and-berry extracts production method. Russia patent RU 2547176C1. 2015.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-859-868>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Исследование возможности применения гранулированного сахаросодержащего продукта с функциональными добавками при производстве жележных начинок

А. А. Славянский^{ID}, В. А. Грибкова^{ID}, Н. В. Николаева*^{ID},
Д. П. Митрошина^{ID}



Московский государственный университет технологий
и управления им. К. Г. Разумовского (ПКУ)^{ROR}, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 27.10.2021

Принята после рецензирования: 17.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: n.nikolaeva@mguttm.ru

© А. А. Славянский, В. А. Грибкова, Н. В. Николаева, Д. П. Митрошина, 2021

Аннотация.

Введение. Актуальной задачей для пищевой промышленности является производство продуктов питания, обогащенных макро- и микронутриентами. Цель исследования – показать возможность использования обогащенного гранулированного сахаросодержащего продукта, позволяющего снизить калорийность продукта и повысить его функциональные свойства, а также обеспечивающего простоту внесения в ходе технологического процесса.

Объекты и методы исследования. Свойства гранулированного сахаросодержащего продукта с добавками мальтодекстрина, тростниковой мелассы и ламинарии японской: скорость роста гранул и их структура (методом сканирующей микроскопии и рентгенографии), гранулометрический состав, растворимость (методом определения относительной скорости растворения вещества), а также органолептические и физико-химические показатели желе на его основе (рефрактометрическим и титриметрическим методами).

Результаты и их обсуждение. При исследовании свойств гранулированного сахаросодержащего продукта был выявлен ряд его отличий от белого сахара. Он содержит сахарозу в кристаллическом и аморфном состоянии, что влияет на распределение нутриентов внутри продукта. Скорость роста гранул влияет на получаемую структуру продукта и его растворимость, которая снижается в 2,5 раза с увеличением размера гранул и уменьшается, по сравнению с кристаллическим сахаром, из-за особенностей внутренней структуры. Это требует корректировки технологических процессов производства кондитерских изделий с использованием гранулированного сахаросодержащего продукта (желе). Разработанное желе обладает пониженной энергетической ценностью из-за частичной замены сахара на мальтодекстрин и мелассу, а также улучшенной пищевой ценностью. Разработанные образцы желе с применением гранулированного сахаросодержащего продукта по органолептическим (22,3 балла) и физико-химическим показателям (сухое вещество < 68 %, кислотность > 2,28 %) соответствуют нормативным требованиям на данный вид продукта.

Выводы. Применение гранулированного сахаросодержащего продукта позволяет упростить дозирование продукта и обогащающих добавок, улучшить санитарно-гигиеническое состояние производственных помещений и условия труда персонала.

Ключевые слова. Желе, жележный продукт, йод, белый сахар, кристаллическая затравка, ламинария, мальтодекстрин, меласса

Для цитирования: Исследование возможности применения гранулированного сахаросодержащего продукта с функциональными добавками при производстве жележных начинок / А. А. Славянский [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 859–868. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-859-868>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Granulated Sugar-Containing Functional Products in Jelly Fillings

Anatoliy A. Slavyanskiy^{ID}, Vera A. Gribkova^{ID}, Natalia V. Nikolaeva*^{ID},
Daria P. Mitroshina^{ID}

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies
and Management (The First Cossack University)^{ROR}, Moscow, Russia

Received: October 27, 2021

Accepted in revised form: November 17, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: n.nikolaeva@mguttm.ru

© A.A. Slavyanskiy, V.A. Gribkova, N.V. Nikolaeva, D.P. Mitroshina, 2021

Abstract.

Introduction. Iodine is one of the most important elements for maintaining human health and cognitive skills. Contemporary food industry is looking for new functional foods fortified with macro- and micronutrients. Confectionery products occupy a fairly large segment of human diet. The present research objective was to substitute traditional white sugar with an experimental granulated sugar-containing product that contained maltodextrin, cane molasses, and Japanese kelp extract. This substitute could reduce the calorie content of jelly and increase its functional properties while maintaining its sensory profile, e.g. consistency, increasing its shelf-life, and simplifying the technological process.

Study objects and methods. Granulated sugar-containing product is a new component for the confectionery industry, but its effect on technological processes is unpredictable. The research featured an experimental granulated sugar-containing product with maltodextrin, cane molasses, and Japanese kelp. The growth rate of granules and their structure were studied by scanning microscopy and radiography, the granulometric composition and solubility – by determining the relative dissolution rate, the effect of the granulated sugar-containing product on the sensory and physicochemical parameters of jelly – by refractometry and titrimetry.

Results and discussion. The experimental granulated sugar-containing product contained sucrose both in crystalline and amorphous state, which affected the distribution of nutrients within the product. The growth rate of granules affected the resulting structure of the product and its solubility, which decreased by 2.5 times as the size of the granules grew. The dissolution rate decreased compared to crystalline sugar. As a result, the technological process of jelly production had to be adjusted. The developed jelly had a lower energy value and better nutritional qualities. The high content of vitamins and macro- and microelements makes it a functional product. The experimental jelly received 22.3 points for sensory profile. Its physico-chemical parameters (soluble solids < 68%, acidity > 2.28%) met the standard requirements for this type of product.

Conclusion. The new granulated sugar-containing product simplified the technological process and improved the sanitary, hygienic, and working conditions.

Keywords. Jelly, jelly product, iodine, white sugar, crystal seed, laminaria, maltodextrin, molasses

For citation: Slavyanskiy AA, Gribkova VA, Nikolaeva NV, Mitroshina DP. Granulated Sugar-Containing Functional Products in Jelly Fillings. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):859–868. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-859-868>.

Введение

Каждый микро- и макроэлемент играет важную роль для здоровья человека, особенно йод. Исследования Всемирной организации здравоохранения выявили зарегистрированный йододефицит у более трети населения Земли [1].

Йод относится к группе эссенциальных (жизненно необходимых) микроэлементов. Он обеспечивает нормальное развитие и функционирование щитовидной железы и всего организма человека в целом. Достаточное содержание этого микроэлемента в организме человека предупреждает появление и дальнейшее развитие ряда заболеваний щитовидной железы [2].

Недостаточное количество йода в организме приводит к расстройству функционирования эндокринной системы человека и к общим расстройствам организма, таким как быстрая утомляемость, нарушение памяти, рассредоточение внимания, снижение гемоглобина в крови, падение общего иммунитета и появление отеков. Изначально эти процессы протекают незаметно, но с годами становятся опасными для жизни.

На рисунке 1 представлены данные о частоте эндокринных заболеваний из-за дефицита йода в организме людей различных возрастных групп.

Исследования показывают, что многие люди не задумываются о нехватки йода в организме, а также об употреблении продуктов, богатых или обогащенных им. Только 19,8 % респондентов среди взрослого населения целенаправленно потребляют продукты обогащенные йодом. Остальные (80,2 %) не употребляют либо не знают об их использовании (рис. 2).

Йод не вырабатывается в организме, поэтому он должен поступать в него в нужном количестве извне. Для снижения йодной недостаточности в организме необходимы постоянные источники органического йода, роль которых могут выполнять йодированные продукты питания. В настоящее время в продаже в свободном доступе представлены продукты, обогащенные йодом, но этого недостаточно для решения проблемы йододефицита в целом.

Во всем мире разработки в области современного питания человека нацелены на создание функциональных продуктов, которые

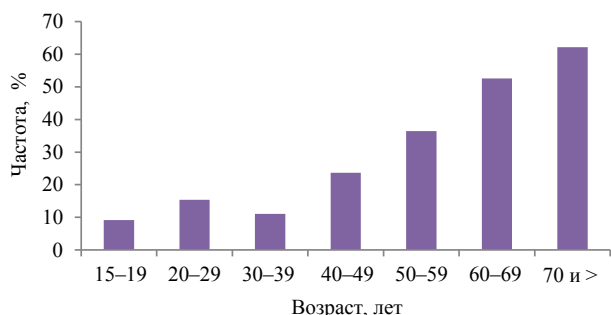


Рисунок 1. Частота возникновения патологии щитовидной железы в различных возрастных группах

Figure 1. Incidence of thyroid pathology in different age groups

присутствуют в ежедневном рационе всех слоев населения. За счет содержащихся в их составе разнообразных функциональных ингредиентов (в т. ч. микроэлементов) они помогают восполнить дефицит питательных и биологически активных нутриентов, а также сохранить и улучшить состояние здоровья человека [3].

Проблемы несбалансированного питания всегда были темой медицинских дискуссий. В настоящее время они являются объектом серьезного научного анализа. На сегодняшний день отмечается смещение акцентов от медицинских мер сохранения трудоспособности человека в сторону создания профилактической системы с применением продуктов питания как основных факторов сокращения неблагоприятного влияния окружающей среды и условий труда на здоровье, трудоспособность и эффективность деятельности человека. В связи с этим биохимический состав всей пищевой продукции, в том числе кондитерской, должен быть скорректирован: снижены ее калорийность и сахароемкость, а содержание биологически активных веществ и

пищевых волокон должно быть увеличено. Поэтому создание кондитерских изделий, обогащенных важными для организма человека нутриентами, в том числе йодом, считается актуальным направлением для развития кондитерской индустрии.

Обогащение продуктов органическим йодом проводится различными йодсодержащими добавками и технологиями их введения. Главными критериями контроля данного процесса являются: точная дозировка вводимого компонента; равномерное распределение вводимого элемента во всей массе продукта; простота внесения без повреждающего технологического воздействия [4].

Одним из способов обогащения рациона необходимыми элементами является использование гранулированных сахаросодержащих продуктов. На данный момент они широко используются в пищевой промышленности: в качестве индивидуальных добавок к пище или рецептурных ингредиентов. Например, в кондитерских изделиях.

Объекты и методы исследования

В диетический или профилактический рацион питания людей входит кондитерское изделие – желе, которое является альтернативой тяжелым десертам. Желе представлено на продуктовом рынке в огромном ассортименте. Проведенные статистические исследования показали, что объем, который занимает желе на российском рынке, составляет примерно 9,3 % от всего объема кондитерских изделий. Это говорит о том, что рынок потребления жележных изделий в Российской Федерации находится на высоком уровне.

По технологиям, традиционно используемым при производстве плодово-ягодного желе, предусматривается большое количество вводимого сахара, что сказывается на калорийности готового изделия. Белый сахар, являясь сырьем для многих отраслей, остается продуктом питания с высокой энергетической ценностью и низким содержанием

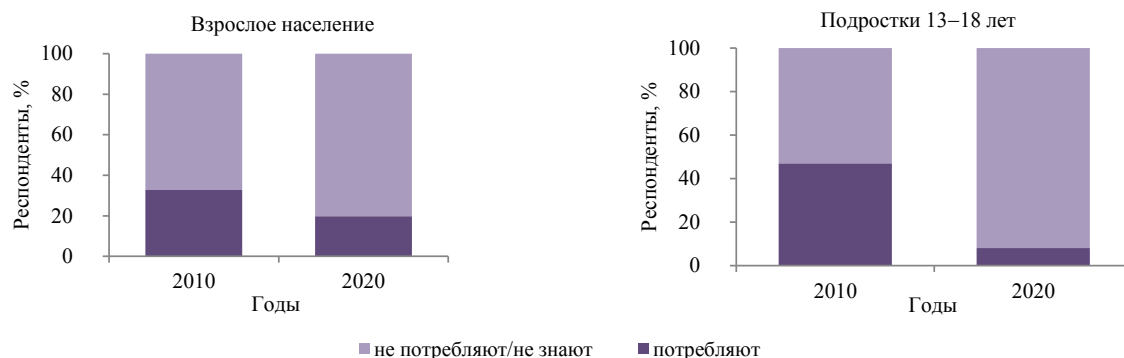


Рисунок 2. Результаты опроса взрослого и подросткового населения по использованию йодированных продуктов

Figure 2. Survey of iodized products in the diet of adults and adolescents

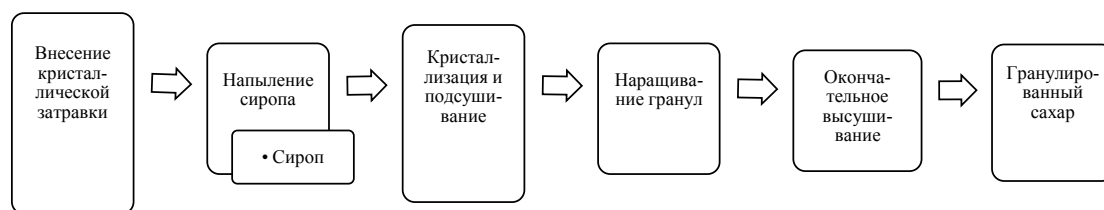


Рисунок 3. Технологическая схема получения гранулированного сахаросодержащего продукта

Figure 3. Technological scheme of the experimental granular sugar-containing product

микро- и макронутриентов. Обогащение биологически активными компонентами повышает его качество и функциональность, дает возможность использовать в производстве различных продуктов детского питания и профилактического назначения, в биофармацевтической промышленности и т. д. [5].

Существует несколько способов обогащения сахара биологически активными веществами и полезными пищевыми добавками: получение сахарного сиропа, обогащенного биологическими активными веществами; обогащение белого сахара в центробежном поле по завершении операции его промывания; получение гранулированного сахара, который имеет однородный состав и прочность и лучше сохраняет нативные свойства содержащихся в нем добавок в процессе хранения и транспортировки [6].

Технология производства гранулированного сахаросодержащего продукта представлена на рисунке 3.

По этой схеме можно производить гранулированный сахаросодержащий продукт с пониженным содержанием сахара, но без потери степени сладости, и введением в него функциональных добавок.

Результаты и их обсуждение

Для производства желе в рецептуре вместо традиционного сахара предлагается использовать гранулированный сахаросодержащий продукт, обогащенный йодом. Технология его производства основана на получении гранул из концентрированного сахарного сиропа на затравке в грануляторе (рис. 4).

Основной рабочий корпус гранулятора 2 выполнен из нержавеющей стали и состоит из двух цилиндров: наружного и внутреннего. Внутри рабочего корпуса в слое гранул 9 установлен мешальный механизм в виде шести лопастей 11, приводящийся в движение электроприводом 10. В боковой части наружного цилиндра установлено выгрузочное отверстие 5, предназначенное для отвода из гранулятора готового продукта, который собирается в приемный сборник 6. Основное дно рабочего корпуса сетчатое. Через него в камеру вентилятором 7 осуществляется ввод воздуха, нагретого в колорифере 8. Крышка рабочего

корпуса выполнена из прозрачного материала, что облегчает визуальный контроль за протеканием процесса. Крышка оборудована форсункой 1, через которую на слой гранул 9 распыляется сахарный сироп. Сахарный сироп для наращивания гранул подается насосом 13 из сборника 14. При этом он проходит через теплообменник 12 и нагревается до заданной температуры. Для отвода отработанного запыленного воздуха из рабочей камеры в крышке гранулятора предусмотрены патрубки, по которым воздух перекачивается в циклон 4, где проходит очистку от сахарной пыли. Для предотвращения пыления после циклона установлен вентилятор 3. За счет этого в рабочей камере возникает разрежение.

В качестве кристаллической затравки используются гранулы мальтодекстрина и экстракта ламинарии японской с размером частиц 0,3–0,5 мм в соотношении 1:1. Затравку распределяют ровным слоем в 25–35 мм на сетчатом дне рабочей камеры гранулятора и прогревают горячим воздухом до требуемой температуры. В процессе наращивания на гранулы затравки в виде пленки равномерно напыляют концентрированный раствор сахара (80–83 % сухих веществ) в смеси с мелассой (0,5–1,2 % к массе раствора сахара). В пленке одновременно происходит два процесса, обеспечивающих рост гранул, – испарение воды и кристаллизация сахарозы. Гранулы наращивают до 2,0–4,0 мм и продувают их

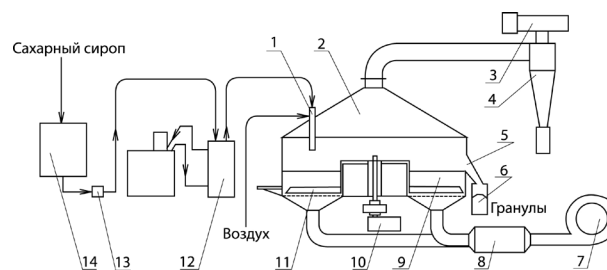


Рисунок 4. Схема установка для грануляции сахаросодержащего продукта

Figure 4. Experimental granulation set

слой горячим воздухом (107–115 °С), чем вызывают их высушивание до влажности 4,0–6,0 %. Данный интервал температур способствует высушиванию гранул без нарушения их структуры. Это обеспечивает хороший гранулометрический состав готового продукта и однородную структуру [7].

Введение в гранулятор мальтодекстрина в смеси с ламинарией расширяет функциональные свойства гранулированного сахаросодержащего продукта из-за наличия в водорослях ламинарии йода (2,7–3,0 %) в виде йодидов, йодорганических соединений и высокомолекулярных полисахаридов: ламинарина (до 21 %), маннита (до 21 %), альгина и альгиновой кислоты (до 25 %), аскорбиновой кислоты, витаминов В₁, В₂, В₁₂, D, макроэлементов. Мальтодекстрин представляет собой многокомпонентную смесь, состоящую из остатков крахмала различной длины, полученных в ходе протекания неполного гидролиза полисахарида: глюкозы, мальтозы, олиго- и полисахаридов, которые имеют сладкий вкус, легко усваиваются и используются в качестве подсластителей в спортивном, лечебном и детском питании [8]. Из-за введения в гранулированный сахаросодержащий продукт таких функциональных добавок, как мальтодекстрин и тростниковая меласса, обладающих сладким вкусом и использующихся в качестве подсластителей, появляется возможность снизить общую сахароемкость и коллорийность получаемого продукта (табл. 1).

Ламинария японская в виде сухого экстракта применяется в качестве биологически активной добавки для улучшения работы щитовидной железы.

Экстракт ламинарии содержит органически связанный йод, не накапливающийся в организме, а его излишки легко выводятся с мочой. Такая форма йода безопаснее препаратов неорганического йода и не вызывает побочных эффектов. Применение природного органически связанного йода в дозах, в два раза превышающих суточную потребность организма, не вызывает излишних изменений в работе

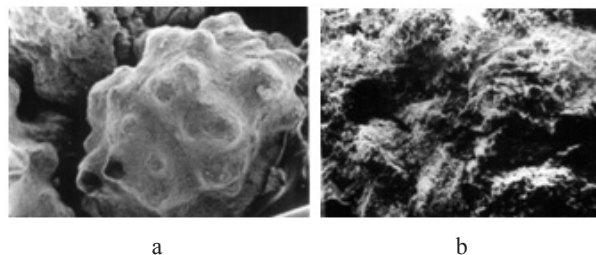


Рисунок 5. Микрофотографии гранул при увеличении в 50 раз (а) и в 200 раз (б)

Figure 5. Granules magnified 50 times (a) and 200 times (b)

щитовидной железы. Поэтому экстракт ламинарии японской можно использовать в широком диапазоне концентраций без опасения появления йодизма у потребителя [9].

В качестве основного сырья сахаросодержащего раствора, используемого для наращивания гранул, может использоваться растворенный белый сахар или полупродукт сахарного производства – сироп повышенной цветности и невысокой чистоты после выпарной станции, непригодный для производства стандартного белого сахара. Это позволяет снизить стоимость получаемого продукта.

Гранулированный сахаросодержащий продукт из-за своего состава и производства имеет отличительные физико-химические и технологические свойства от кристаллического белого сахара. Это нужно учитывать при планировании и разработке технологических процессов производства. Например, кондитерских изделий с его использованием [10, 11].

Гранулированный сахаросодержащий продукт – это смесь пористых частицы и их агломератов размером 2,0–4,0 мм неправильной формы светлороманового цвета (рис. 5).

На фотографиях видно, что гранулы полученного сахаросодержащего продукта имеют внешние и внутренние поры размером 10–60 мкм различной конфигурации. Это обеспечивает гранулам большую площадь контактной поверхности: общая площадь пор составляет 3–5 % от всей поверхности среза гранулы [12].

Структура гранулированного сахаросодержащего продукта изучалась с использованием рентгенографии (рис. 6).

На рентгенограмме образцов гранулированного сахаросодержащего продукта, наряду с отчетливыми пиками, незначительно присутствует аморфное гало. Анализ соотношения площадей аморфного гало и пиков позволяет говорить о степени кристалличности продукта и присутствии аморфной составляющей в образце, т. е. гранулированный сахаросодержащий продукт характеризуется неполной степенью кристалличности сахарозы. Таким

Таблица 1. Сравнение сахара и сахаросодержащего продукта (на 100 г)

Table 1. Sugar vs. sugar-containing product (per 100 g)

Характеристика	Сахар	Сахаросодержащий продукт
Калорийность, ккал	399,00	138,40
Белки, г	0	5,67
Жиры, г	0	0,08
Углеводы, г	99,80	25,43
Пищевые волокна, г	0	0,07
Вода, г	0	0
Органические кислоты, г	0	0,3
Зола, г	0	0,4

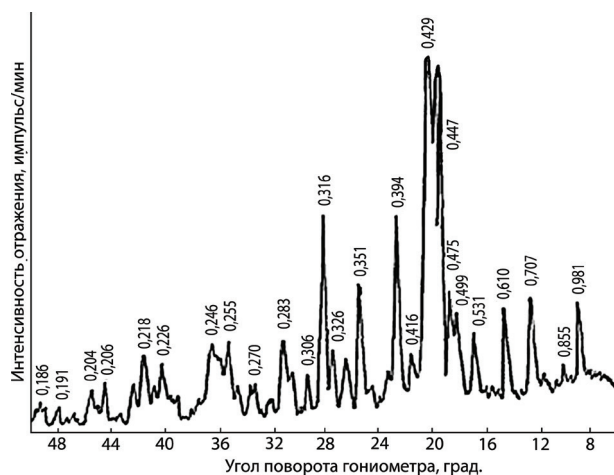


Рисунок 6. Рентгенограмма гранулированного сахаросодержащего продукта

Figure 6. X-ray diffraction pattern of the granular sugar-containing product

образом, получаемый аморфно-кристаллический сахаросодержащий продукт включает сахарозу в виде кристаллов в аморфном состоянии, а нутриенты сырья могут входить в кристаллическую решетку или распределяться в аморфной части [13, 14].

Гранулированный сахаросодержащий продукт хорошо растворяется в воде, но скорость его растворения отличается от кристаллического белого сахара и зависит от многих факторов, таких как качество продукта, его гранулометрия и температура растворения. Это объясняется наличием в грануле определенного процента аморфной составляющей [15].

Из рисунка 7 видно, что с уменьшением размера гранул их растворимость увеличивается. Это связано с тем, что общая активная площадь контакта с растворителем всего объема продукта больше у гранул с меньшим размером, чем у более крупных гранул с аналогичным объемом.

Поэтому при производстве гранулированного сахаросодержащего продукта важно контролировать скорость образования и роста гранул [16, 17]. Установлено, что скорость образования гранул зависит от чистоты исходного сахаросодержащего раствора и описывается имперической зависимостью, которая корректна для диапазона чистоты 88–94 %:

$$v_{\text{гр}} = 130 \cdot (100 - \text{Ч})^{-2,217} \quad (1)$$

где $v_{\text{гр}}$ – скорость отобразования гранул; Ч – чистота раствора, %. Удельное приращение приведенного радиуса гранулы рассчитывается согласно зависимости [18]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = \frac{(l^3 - R^3)\Delta c}{3R^3} \left[1 - \exp\left(\frac{D\tau}{B}\right) \right] \quad (2)$$

где τ – длительность процесса наращивания, с; B – коэффициент диффузии сахарозы, $\text{м}^2/\text{с}$; R – радиус гранулы, $l = 2R$, м; $\Delta c = c_{\text{н}} - c_{\text{н}} > 0$ – концентрация пересыщения в начальный период времени; $B = (A(l - R) - (l^3/3)\ln(R/l) - R^3/18)/(l - R)$, $A = (R^3 + 2l^3)/(6R)$.

При разработке технологии желейных продуктов были использованы основы традиционной технологии получения желе на основе гранулированного сахаросодержащего продукта с использованием пектина и органических кислот [19]. В разрабатываемой технологии ставится цель уменьшить содержание сахара в рецептуре на 35 %, т. к. в ходе эксперимента было выявлено, что снижение сахара на 30 % не сказывается на качестве получаемого продукта, а уменьшение на 40 % отрицательно отражается на органолептических и прочностных характеристиках желе [20]. Соотношение сок:сахаросодержащий продукт в разрабатываемой рецептуре составило 66:34 (для ягод красной смородины) и 67:33 (для ягод черной смородины) соответственно. Контролем служили образцы аналогичного желе, изготовленные по традиционной технологии, с соотношением сок:сахар 56:44 (для желе из красной смородины) и 57:43 (для желе из черной смородины) соответственно.

Главными этапами в производстве ягодной желейной начинки являются такие технологические операции, как подготовка всех видов сырья к последующим этапам переработки, смешение смеси всех ингредиентов в соответствии с рецептурой, уваривание желейной массы, формование путем горячего разлива массы в формы с последующими процессами сушки и охлаждения изделия до соответствующих влажности и температуры, упаковка и хранение готового продукта [21].

Основными ингредиентами рецептурной смеси для разрабатываемого желе являются пюре из

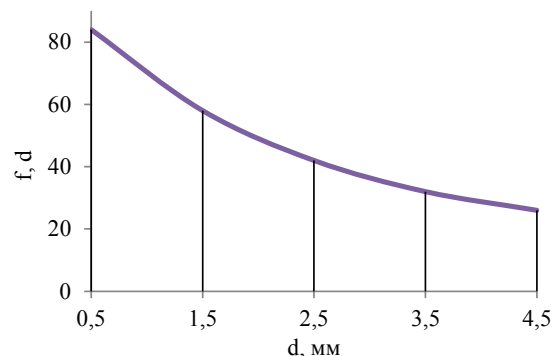


Рисунок 7. Зависимость относительной скорости растворения гранул от размера

Figure 7. Effect of granule size on their relative dissolution rate

ягод черной или красной смородины и гранулированный сахаросодержащий продукт в указанных соотношениях.

Чтобы не допустить включений в желейную массу примесей, ягодное пюре дополнительно перетирают на протирачной машине и перекачивают в сборник для подготовки ягодно-сахарной смеси.

Сухой порошок пектина подвергается подготовке путем замачивания его в воде при температуре 45–50 °С в течение 1,5–2 ч до полного набухания.

Для предотвращения преждевременного студнеобразования смеси из-за увеличенного времени растворения гранулированного сахаросодержащего продукта перед его добавлением в ягодное пюре специально добавляют растворы солей-модификаторов или буферных солей (лактат натрия, цитрат натрия, дифосфат натрия и др.). Благодаря солям-модификаторам сокращается продолжительность процесса высыхания желе.

Перед поступлением в варочный аппарат рецептурная смесь имеет влажность примерно 45 %. Она должна быть уварена до влажности 30–32 % при температуре, которая не превышает 85 °С, в течение 10–20 мин. В процессе уваривания удаляется чрезмерная жидкость. Вследствие этого в смеси увеличивается в процентном отношении содержание пектина и кислоты. Этого достаточно для образования студня при охлаждении массы. В присутствии солей-модификаторов удаляется большое количество воды, а сухие вещества в желе доводятся до 68–72 %.

Затем желейная масса, прошедшая этап уваривания, отправляется на остужение, т. к. ее температура должна быть выше на 5–7 °С температуры студнеобразования.

Выстаивают формы с желе при температуре 15–25 °С в специализированной камере, в которой происходит процесс ее студнеобразования в течение 20–45 мин при постепенном снижении температуры массы.

Аппаратурно-технологическая схема поточной линии производства желе, обогащенного йодом представлена на рисунке 8.

Подготовленное пюре из ягодного сырья загружается в смесители 1, откуда насосом 2 закачивается в усреднительный сборник протирачной машины 3 и через дозатор подается в протирачную машину 4. После протирачной машины пюре из ее приемного сборника 5 насосами 6 загружается в смесители 9, где оно тщательно перемешивается с остальными ингредиентами рецептурной смеси (гранулированный сахаросодержащий продукт, набухший в воде пектин, лактат натрия). Они из сборников 7 через дозаторы 8 подаются в смеситель 9. Готовая смесь насосом 6 перекачивается в накопительную емкость 10, откуда насосом-дозатором 11 смесь прокачивается непрерывным потоком через варочную колонку 12. Из варочной колонки уваренная масса через пароотделитель 13 пропускается через смеситель 14, где ее смешивают со стабилизатором, и направляется на стадию формования. Горячая смесь при помощи отливочной машины 15 отливается в подготовленные формы, установленные на транспортной ленте 17, движущейся в охлаждающий шкаф 16, где происходит процесс студнеобразования. Освобожденное от форм при помощи пневматического устройства 18 желе укладывается в лотки, движущиеся по транспортеру 19, и поступает в сушилку 20, где обдувается горячим воздухом, нагнетаемым вентилятором 21 из паровых калорифетров 22, а затем воздухом комнатной температуры для охлаждения. Из сушилки по транспортеру 23 лотки с готовым желе поступают на укладку, герметичную укупорку и упаковку. После чего готовая продукция выдерживается в течение суток для окончания протекания процессов желирования.

Для разработанной продукции была проведена технологическая и товароведная оценка качества. В соответствии с требованиями контроля качества данного вида продукции через шесть месяцев хранения образцы разработанного желе исследовали по химическому составу, структурным показателям, безопасности и органолептике. Результаты органолептической оценки желе с пониженным содержанием сахара и обогащенных экстрактом ламинарии японской представлены в таблице 2.

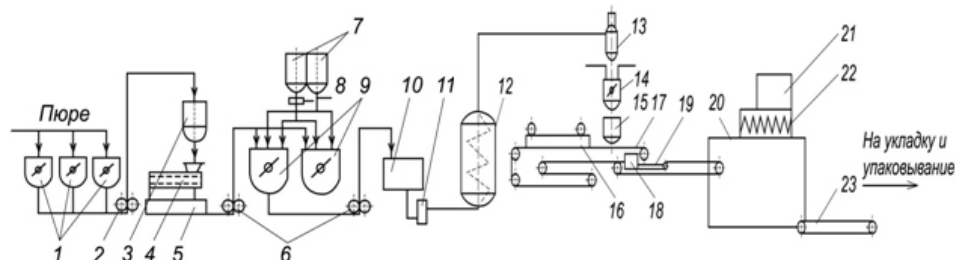


Рисунок 8. Аппаратурно-технологическая схема поточной линии производства желе, обогащенного йодом

Figure 8. Production line scheme for iodine-fortified jelly

Таблица 2. Органолептическая оценка желе из ягод смородины

Table 2. Sensory evaluation of currant jelly

Изделие	Внешний вид, балл	Цвет, балл	Вкус, балл	Запах, балл	Консистенция, балл	Сумма баллов
Опытный образец желе из красной смородины	4,6	4,8	4,5	4,4	4,5	22,3
Контрольный образец желе из красной смородины	4,8	4,6	4,7	4,5	4,5	22,4
Опытный образец желе из черной смородины	4,7	4,7	4,5	4,6	4,3	22,8
Контрольный образец желе из черной смородины	4,9	4,8	4,9	4,8	4,9	24,1

Как видно из таблицы 2, разработанные образцы не имеют сильных отрицательных отличий от контрольных образцов по таким показателям, как внешний вид, вкус и консистенция. Дегустационная оценка показала, что данные показатели не снижаются в течение 6 месяцев с момента производства образцов. Это соответствует срокам хранения, указанным в нормативных документах для данного вида продукта.

При исследовании разработанного желе по физико-химическим показателям продукции было установлено, что в них содержится не менее 68,0 % растворимых сухих веществ, а титруемых кислот – не более 2,39 %. Это полностью соответствует требованиям нормативных документов.

Выводы

Набор требований к качеству сырья и продуктов питания остаются неизменными. На химический состав и питательную ценность всех продуктов влияют технологические приемы их переработки и хранения.

Поэтому в работе была предложена технология изготовления желе на основе ягодного сырья и пектина с применением сахаросодержащего продукта, обогащенного мальтодекстрином и сухим экстрактом ламинарии, вместо кристаллического белого сахара без осложнения технологического процесса приготовления. Применение гранулированного сахаросодержащего продукта позволит упростить

дозирование продукта в технологическом процессе, улучшить санитарно-гигиеническое состояние производственных помещений и условия труда персонала.

Разработанное желе обладает пониженной энергетической ценностью за счет частичной замены сахара на мальтодекстрин и тростниковую мелассу, улучшенной пищевой ценностью, обусловленной содержанием витаминов, макро- и микроэлементов, вносимых с ягодным сырьем, мальтодекстрином, мелассой и экстрактом ламинарии. Это делает получаемое желе функциональным продуктом.

Критерии авторства

А. А. Славянский руководил проектом. В. А. Грибкова, Н. Н. Николаева и Д. П. Митрошина участвовали как исполнители.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.A. Slavyanskiy supervised the project. V.A. Gribkova, N.N. Nikolaeva, and D.P. Mitroshina performed the experiments.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Key features of human nutrition behavior / R. S. Rabadanova [et al.] // Revista Inclusiones. 2020. Vol. 7. P. 170–181.
2. Vitamins: Key role players in boosting up immune response – A mini review / M. F. Aslam [et al.] // Vitamins and Minerals. 2017. Vol. 6. № 1. <https://doi.org/10.4172/2376-1318.1000153>.
3. Поиск формализованных связей между потребительскими свойствами сахара и параметрами технологического процесса его производства / М. И. Егорова [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 3. С. 196–204. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-196-204>.
4. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-лопастном смесителе / С. Н. Черпицкий [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 1. С. 3–6.
5. Развитие национальной инфраструктуры качества в области сахарной промышленности / Е. А. Тарасова [и др.] // Сахар. 2021. № 5. С. 20–23. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2021-5-20-23>.

6. Способ производства гранулированного сахаросодержащего продукта: пат. 2749907С1 Рос. Федерация. № 2020125123 / Орлова А. Ю. [и др.]; заявл. 29.07.2020; опубл. 18.06.2021, Бюл. № 17. 6 с.
7. Способ производства гранулированного сахаросодержащего продукта: пат. 2652128С1 Рос. Федерация. № 2017135402 / Славянский А. А., Антишина С. А., Якубенко В. П.; заявл. 05.10.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 12. 5 с.
8. Крылова Э. Н. Нетрадиционные виды сырья для кондитерских изделий лечебно-профилактического назначения // Пищевая промышленность. 2000. № 4. С. 61.
9. Кароматов И. Дж., Ашурова Н. Г., Амонов К. У. Ламинария, морская капуста // Биология и интегративная медицина. 2017. № 2. С. 194–213.
10. Sharma Y. K., Patil P. P., Mangla S. K. Analyzing risks in safety and security of food using grey relational an analysis // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. № 12. P. 9–19.
11. A new sensory sweetness definition and sweetness conversion method of five natural sugars, based on the Weber-Fechner Law / Y. Mao [et al.] // Food Chemistry. 2019. Vol. 281. P. 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.049>.
12. Maidannyk V. A., Nurhadi B., Roos Y. H. Structural strength analysis of amorphous trehalose-maltodextrin systems // Food Research International. 2017. Vol. 96. P. 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.029>.
13. Bērziņš K., Suryanarayanan R. Compression-induced crystallization in sucrose-polyvinylpyrrolidone amorphous solid dispersions // Crystal Growth and Design. 2018. Vol. 18. № 2. P. 839–848. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.7b01305>.
14. Frenzel S. Crystallization schemes in the sugar industry // ChemBioEng Reviews. 2020. Vol. 7. № 5. P. 159–166. <https://doi.org/10.1002/cben.202000010>.
15. Инновационные технологии для импортозамещения глюкозы / Н. П. Андреев [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 11. С. 55–59.
16. Sucrose crystallization: Modeling and evaluation of production responses to typical process fluctuations / B. J. C. de Castro [et al.] // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2019. Vol. 36. № 3. P. 1237–1253. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190363s20180240>.
17. Thakral S., Sonje J., Suryanarayanan R. Anomalous behavior of mannitol hemihydrate: Implications on sucrose crystallization in colyophilized systems // International Journal of Pharmaceutics. 2020. Vol. 587. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119629>.
18. Naumenko Yu. Modeling a flow pattern of the granular fill in the cross section of a rotating chamber // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5. № 1–89. P. 59–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110444>.
19. Желе, муссы, самбуки. Технология приготовления. Правила подачи. Ассортимент. URL: <https://www.foodtours.ru/toiks-299-2.html> (дата обращения: 01.06.2021).
20. Разработка технологии производства мучной восточной сладости чак-чак на основе полифункциональных компонентов растительного происхождения / А. В. Семенова [и др.] // Агропродовольственная экономика. 2019. № 10. С. 69–75.
21. Гартел Р. У., фон Эльбе Й. Г., Хофбергер Р. Сахаристые кондитерские изделия. СПб.: Профессия, 2019. 784 с.

References

1. Rabadanova RS, Bogatyreva SN, Artemyeva SI, Aralova EV, Polozhentseva IV, Pisarevsky KL. Key features of human nutrition behavior. Revista Inclusiones. 2020;7:170–181.
2. Aslam MF, Majeed S, Aslam S, Irfan JA. Vitamins: Key role players in boosting up immune response – A mini review. Vitamins and Minerals. 2017;6(1). <https://doi.org/10.4172/2376-1318.1000153>.
3. Egorova MI, Raynik VV, Mikhaleva IS, Kretova YaA, Nikolaeva ES. Searching for formalized connections between the consumer properties of sugar and technological process parameters of its production. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018;80(3):196–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-196-204>.
4. Cherpitskiy SN, Tarshis MYu, Korolev LV, Kapranova AV. Study of the process of mixing of loose materials in a drum-blade mixer. Chemical and Petroleum Engineering. 2020;(1):3–6. (In Russ.).
5. Tarasova EA, Guryeva KB, Slavyanskiy AA, Lebedeva NN, Mitroshina DP. Development of a national quality infrastructure in the sugar industry. Sahar. 2021;(5):20–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2021-5-20-23>.
6. Orlova AYU, Slavyanskij AA, Gribkova VA, Lebedeva NN. Method for production of granulated sugar-containing product. Russia patent RU 2749907C1. 2021.
7. Slavyanskij AA, Antishina SA, Yakubenko VP. Method for production of granulated sugar-containing product. Russia patent RU 2652128C1. 2018.
8. Krylova EhN. Netraditsionnye vidy syr'ya dlya konditerskikh izdeliy lechebno-profilakticheskogo naznacheniya [Non-traditional types of raw materials for confectionery products with therapeutic and prophylactic purposes]. Food Industry. 2000;(4):61. (In Russ.).

9. Karomatov IDzh, Ashurova NG, Amonov KU. Laminaria, sea cabbage. *Biology and Integrative Medicine*. 2017;(2):194–213. (In Russ.).
10. Sharma YK, Patil PP, Mangla SK. Analyzing risks in safety and security of food using grey relational an analysis. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(12):9–19.
11. Mao Y, Tian S, Qin Y, Han J. A new sensory sweetness definition and sweetness conversion method of five natural sugars, based on the Weber-Fechner Law. *Food Chemistry*. 2019;281:78–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.049>.
12. Maidannyk VA, Nurhadi B, Roos YH. Structural strength analysis of amorphous trehalose-maltodextrin systems. *Food Research International*. 2017;96:121–131. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.029>.
13. Bērziņš K, Suryanarayanan R. Compression-induced crystallization in sucrose-polyvinylpyrrolidone amorphous solid dispersions. *Crystal Growth and Design*. 2018;18(2):839–848. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.7b01305>.
14. Frenzel S. Crystallization schemes in the sugar industry. *ChemBioEng Reviews*. 2020;7(5):159–166. <https://doi.org/10.1002/cben.202000010>.
15. Andreev NR, Hvorova LS, Ananskikh VV, Lukin DN. Innovative technologies for import substitution of glucose. *Storage and Processing of Farm Products*. 2015;(11):55–59. (In Russ.).
16. de Castro BJC, Marciniuk M, Giulietti M, Bernardo A. Sucrose crystallization: Modeling and evaluation of production responses to typical process fluctuations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2019;36(3):1237–1253. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190363s20180240>.
17. Thakral S, Sonje J, Suryanarayanan R. Anomalous behavior of mannitol hemihydrate: Implications on sucrose crystallization in colyophilized systems. *International Journal of Pharmaceutics*. 2020;587. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119629>.
18. Naumenko Yu. Modeling a flow pattern of the granular fill in the cross section of a rotating chamber. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;5(1–89):59–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110444>.
19. Zhele, mussy, sambuki. Tekhnologiya prigotovleniya. Pravila podachi. Assortiment [Jelly, mousse, and sambuca. Cooking technology. Serving rules. Assortment] [Internet]. [cited 2021 Jun 01]. Available from: <https://www.foodtours.ru/toiks-299-2.html>.
20. Semenova AV, Slavyansky AA, Voskanyan OS, Nikolaeva NV, Lebedeva NN. Development of technology for the production of flour eastern sweets chak-chak on the basis of multifunctional components of plant origin. *Agroprodovol'stvennaya ehkonomika [Agri-food economics]*. 2019;(10):69–75. (In Russ.).
21. Gartel RU, fon Ehl'be YG, Khofberger R. Sakharistye konditerskie izdeliya [Sugar confectionery]. St. Petersburg: Professiya; 2019. 784 p. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-869-882>Обзорная статья
<http://fptt.ru>

Современные биологические методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса



Н. В. Фотина*^{ORCID}, В. П. Емельяненко^{ORCID},
Е. Е. Воробьева^{ORCID}, Н. В. Бурова^{ORCID}, Е. В. Остапова^{ORCID}

Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 08.09.2021

Принята после рецензирования: 05.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: fotina.natashenka@mail.ru

© Н. В. Фотина, В. П. Емельяненко, Е. Е. Воробьева, Н. В. Бурова, Е. В. Остапова, 2021

Аннотация.

Введение. Основным источником антропогенного воздействия на ландшафты Кемеровской области – Кузбасса является добыча угля. Темпы рекультивации нарушенных земель незначительны по сравнению с их ежегодным приростом. Для решения проблемы предлагается сформировать фонд рекультивации. Цель работы – анализ и систематизация имеющихся данных антропогенного воздействия угледобычи на территории Кемеровской области; анализ новых методов рекультивации, позволяющих с высокой эффективностью восстанавливать плодородный слой почвы, а также повышать процесс ее очищения от вредных ингредиентов.

Объекты и методы исследования. Общедоступная научная информация баз данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США) и Elsevier (Scopus, ScienceDirect), платформы Web of Science и отечественной электронной библиотеки eLibrary.ru с глубиной поиска 10 лет.

Результаты и их обсуждение. На основании литературных источников выявлены территории Кемеровской области – Кузбасса, подвергшиеся наибольшему антропогенному воздействию в ходе угледобычи (Новокузнецкий, Прокопьевский Кемеровский, Беловский, Ленинск-Кузнецкий округа/районы). Описаны распространенные поллютанты, присутствующие на территории угледобычи и в местах захоронения ее отходов. Показано, что наибольшую опасность представляют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Это связано с тем, что в процессе горения отвалов они способны распространяться в газовой среде на значительные расстояния. Так как большинство отвалов находится вблизи населенных пунктов, а ПАУ обладают канцерогенными свойствами, то были подробно рассмотрены варианты их биодеструкции. Также рассмотрена законодательная база рекультивации нарушенных земель. Приведен перечень рекомендованных растений для биологического этапа рекультивации, в том числе культур растений, обладающих высокой поглотительной способностью в отношении поллютантов. Приведены примеры микроорганизмов и их комплексов, применяемых для целей биоремедиации.

Выводы. В ходе обзора литературы выявлены перспективные методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса. К ним относят процессы биоремедиации с использованием перспективных микробных консорциумов и культур растений, характеризующихся способностью к связыванию поллютантов.

Ключевые слова. Угольные отвалы, угледобыча, рекультивация, фиторемедиация, биоремедиация, поллютанты, полициклические ароматические углеводороды, загрязнение окружающей среды, горнодобывающая промышленность

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания для выполнения научно-исследовательских работ по теме «Разработка подходов к фиторемедиации посттехногенных ландшафтов с использованием стимулирующих рост растений ризобактерий (PGPB) и «омиксных» технологий», дополнительное соглашение № 075-03-2021-189/4 от 30.09.2021 (внутренний номер 075-ГЗ/Х4140/679/4). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием КемГУ.

Для цитирования: Современные биологические методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса / Н. В. Фотина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 869–882. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-869-882>.

Review article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Contemporary Biological Methods of Mine Reclamation in the Kemerovo Region – Kuzbass

Natalya V. Fotina*, **Vladislav P. Emelianenko**,
Ekaterina E. Vorob'eva, **Nadezhda V. Burova**, **Elena V. Ostapova**

Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: September 08, 2021

Accepted in revised form: November 05, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: fotina.natashenka@mail.ru

© N.V. Fotina, V.P. Emelianenko, E.E. Vorob'eva, N.V. Burova, E.V. Ostapova, 2021

Abstract.

Introduction. Coal mining is the main source of anthropogenic impact on the landscapes of the Kemerovo Region – Kuzbass. The current mine reclamation rate lags far behind the annual increase in disturbed lands. A reclamation fund can be a perfect solution to this relevant issue. The present research objective was to analyze and structure the available data on the anthropogenic impact of coal mining in Kuzbass. The article reviews new efficient methods of reclamation and re-soiling.

Study objects and methods. The study featured ten years of research publications that were registered in the PubMed database of the National Center for Biotechnology Information (USA), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), the Web of Science, and the Russian Electronic Library (eLibrary.ru).

Results and discussion. The research revealed the following Kuzbass districts that experience the greatest mining impact: Novokuznetsk, Prokopyevsk, Kemerovo, Belovo, and Leninsk-Kuznetskiy. The authors also identified the most common pollutants associated with coal mining. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) appeared to be the most dangerous pollutants: as waste coal burns, these substances cover considerable distances with the wind. Biodegradation seems to be the optimal solution because PAHs are known to be carcinogenic, and most mine tips are located near settlements. The article also features mine reclamation laws and introduces a list of plants with a high absorption capacity recommended for biological reclamation, as well as microorganisms and their consortia used for bioremediation.

Conclusion. The authors identified the most promising methods of mine reclamation in the Kemerovo region, i.e. bioremediation with pollutant-binding microbial consortia and plants.

Keywords. Coal dumps, coal mining, reclamation, phytoremediation, bioremediation, pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons, environmental pollution, mining industry

Funding. The research is part of state assignment “Development of approaches to phytoremediation of post-technogenic landscapes using the “omics” technologies that stimulate the growth of rhizobacteria (PGPB)”, supplementary agreement No. 075-03-2021-189/4 from 30.09.2021 (internal number 075-Г3/X4140/679/4). The research was conducted on the premises of the Research Equipment Sharing Center of Kemerovo State University.

For citation: Fotina NV, Emelianenko VP, Vorob'eva EE, Burova NV, Ostapova EV. Contemporary Biological Methods of Mine Reclamation in the Kemerovo Region – Kuzbass. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):869–882. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-869-882>.

Введение

Площадь нарушенных земель Кузбасса в результате различных видов деятельности растёт. По данным Управления Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Кемеровской области – Кузбассу, площадь нарушенных земель оценивается в 174,8 тыс. га, что в 12,5 раза (0,75 % площади) превышает среднероссийские показатели (0,06 %). В некоторых муниципальных районах техногенные изменения затрагивают до 20 % пахотных земель.

Только за 2019 г. нарушено 5,443 тыс. га земель (при разработке месторождений полезных ископаемых – 4,863 тыс. га, при строительных работах – 0,414 тыс. га). В «Стратегии социально-экономического развития Кемеровской области – Кузбасса до 2035 года» отмечено, что прирост площади нарушенных земель по годам будеткратно

(от 3 до 5) увеличиваться. Удельный показатель нарушения земель (рассчитываемый исходя из одного гектара земли на 1 млн т добытого угля) увеличился для шахт на 10 %, для разрезов – в 2,7 раз. Доля добычи угля открытым способом увеличилась с 65 до 82 % [1]. Площадь рекультивированных земель в 2019 г. составила 0,012 тыс. га, т. е. 0,01 %. При таких темпах рекультивации «даже если больше не добывать уголь в разрезах, восстановление земель займет несколько веков» [2, 3].

Для решения проблемы восстановления нарушенных земель было предложено сформировать фонд рекультивации – экономический инструмент, который гарантирует восстановление нарушенных земель за счет средств угледобывающих компаний. Этот инструмент позволит избежать ситуаций, при которых компания к моменту своего закрытия не имеет необходимых средств для возмещения экологического

ущерба [4]. Зарубежный опыт показывает эффективность формирования таких экономических гарантий. Их обеспечение осуществляется при помощи различных инструментов – отчисления в целевые фонды, страхование, облигации и т. д. [5, 6]. Выбор экономического инструмента зависит от того, будет ли предусмотрено снижение суммы гарантий для компаний, показывающих ответственное выполнение рекультивации.

Низкие темпы рекультивации и отсутствие применения современных методов восстановления и очистки земель говорят об актуальности темы исследования.

Цель работы – систематизация и анализ данных об антропогенном воздействии угледобычи на территорию Кемеровской области; анализ данных о видовом составе растений, применяемых на биологическом этапе рекультивации, методах фито- и биоремедиации земель, нарушенных в процессе угледобычи.

Задачи исследования: выявить наиболее подвергнутые антропогенному воздействию угледобычи муниципальные округа/районы Кемеровской области; описать особенности посттехногенных ландшафтов угледобычи; составить перечень перспективных методов рекультивации и ремедиации нарушенных территорий.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является общедоступная научная информация, поиск которой осуществлялся в базах данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США) и Elsevier (Scopus, ScienceDirect), платформе Web of Science и отечественной электронной библиотеке eLibrary.Ru. Также была проанализирована нормативная документация. Глубина поиска составила 10 лет, язык поиска – английский и русский.

Результаты и их обсуждение

Причиной формирования посттехногенных ландшафтов на территории Кемеровской области является угледобыча, но существуют и другие причины. Например, добыча полезных ископаемых.

Антропогенные причины возникновения посттехногенных ландшафтов можно классифицировать по режимам: постоянные, периодические и катастрофические.

В геохимическом плане различают техногенные и природно-техногенные процессы (рис. 1).

Техногенные загрязнения, возникающие при добыче угля, связаны с высоким содержанием в нем следующих элементов:

- тяжелые металлы (Zn, Pb, Hg, Fe, Cd, W);
- переходные металлы (Mo, Au, Ag);
- легкие металлы (Bi);
- актиноиды (U);
- полуметаллы (As, Sb);
- неметаллы (Ge, Se);
- галогены (Cl, Br, J);
- редкоземельные элементы (Sm).

Уголь Кемеровской области содержит примеси токсичных элементов, таких как марганец, кобальт, мышьяк, ванадий, цинк, свинец, никель, хром и медь. Такие тяжелые металлы, как цинк, железо, медь и марганец, необходимы растениям и микрофлоре в небольших количествах. Однако высокая концентрация любых микроэлементов отрицательно влияет на физиологические процессы растений – дыхание, фотосинтез и деление клеток [7].

Степень экологической опасности токсичных элементов, содержащихся в угле, определяется не столько их концентрацией, сколько долей содержания в составе угля токсичных элементов, способных при его сжигании (например, на ТЭЦ и металлургических заводах) переходить в аэрозольную или газовую фазы [8].



Рисунок 1. Техногенные и природно-техногенные процессы

Figure 1. Man-induced and natural-technogenic processes

Таблица 1. Угольные компании РФ
Table 1. Coal companies of the Russian Federation

Субъект РФ	Количество угледобы- вающих предприятий	Субъект РФ	Количество угледобы- вающих предприятий
Тульская область	1	Иркутская область	12
Мурманская область	1	Республика Тыва	3
Республика Коми	7	Республика Бурятия	4
Ростовская область	4	Забайкальский край	11
Оренбургская область	1	Амурская область	3
Челябинская область	1	Хабаровский край	3
Новосибирская область	3	Приморский край	8
Ростовская область	4	Республика Саха (Якутия)	18
Оренбургская область	1	Сахалинская область	10
Челябинская область	1	Магаданская область	2
Новосибирская область	3	Камчатский край	1
Республика Хакасия	8	Чукотский АО	2
Красноярский край	13	Кемеровская область	97

В процессе угледобычи в атмосферу попадает значительное количество оксидов углерода, диоксида серы и оксидов азота, что связано с работой двигателей внутреннего сгорания тяжелой карьерной техники (оксиды являются продуктами сгорания дизельного топлива). Вышеперечисленные оксиды при попадании в водную среду растворяются, в результате чего происходит реакция образования кислот. Это снижает pH водоемов и ведет к нарушениям в сформированном биоценозе [9, 10].

Важную роль в загрязнении территории отвалов играет процесс окисления сульфидов железа и других металлов. В процессе окисления сульфидов металлов образуются сульфатные и водорастворимые формы химических элементов, что приводит к изменению условий миграции элементов. Резко увеличивается минерализация, pH почв снижается до значения 2–3. Образуются сернокислые ожелезненные солончаки. Достигается содержание сульфатной серы 60–70 %, а свободной до 10–20 %. Для автоморфных таежных почв характерно снижение pH почвы, увеличение содержания сернистых соединений и тяжелых металлов. Находящиеся в гидроморфных почвах сульфаты и поливалентные тяжелые металлы подвергаются восстановлению, что приводит к образованию аномалий на латеральных сульфидных барьерах. Такие аномалии существуют длительное время и являются вторичными источниками загрязнения.

Также с угледобычей связано загрязнение окружающей среды полициклическими углеводородами, особенно во время горения отвалов или при сжигании угля [11].

По данным Минэнерго России, по состоянию на 1 января 2016 г. добычу угля осуществляли 192 угольных предприятия, в том числе 71 угольная шахта

и 121 разрез. Однако данные угольных компаний и ФГУП «ЦДУ ТЭК» отличаются от официальных: 214 угледобывающих предприятия (63 шахты и 151 разрез), действующих по состоянию на 1 июня 2017 г. (ИТС 37-2017).

Распределение по субъектам РФ представлено в таблице 1.

Как следует из приведенных данных, наибольшее количество угледобывающих компаний сосредоточено в Кемеровской области – Кузбассе. Интерес представляет анализ данных по количеству отвалов, разрезов, шахт и их местоположению. Распределение шахт и разрезов по муниципальным округам представлено в таблице 2.

Согласно таблице 2 наибольшее количество угледобывающих компаний сосредоточено в Новокузнецком муниципальном районе (добывается уголь марки Т, ГЖ, Ж и ГЖО), Прокопьевском (добывается Д, ДГ, К, КС и СС), Беловском (добывается Д), Кемеровском (добывается К и КС) и Ленинск-Кузнецком (добывается Г) округах.

Расшифровка аббревиатур марок угля представлена в таблице 3 [12].

По данным государственного реестра объектов размещения отходов (ГРОО), на территории Кемеровской области располагается 395 объектов захоронения отходов горнодобывающих предприятий [13]. Их распределение по муниципальным округам и районам представлено в таблице 4.

Из таблицы 4 следует, что наиболее подверженными негативному влиянию угледобычи являются следующие муниципальные округа/районы: Новокузнецкий (31,6 %), Прокопьевский (20,76 %), Кемеровский (16,71 %) и Беловский (16,2 %).

Стоит отметить, что в Ленинск-Кузнецком муниципальном округе находится всего 2 зарегистри-

Таблица 2. Шахты и разрезы Кемеровской области

Table 2. Mines and open pits of the Kemerovo region

Муниципальный район/округ	Количество шахт и разрезов	Количество предприятий, добывающих марки угля*	
		Марка угля	Количество предприятий
Новокузнецкий	30	Т	10
		ГЖ	7
		Ж	7
		ГЖО	6
		КС	4
		К	3
		ОС	3
		ДГ	3
		КО	3
		Д	2
		Г	2
		ТС	2
		СС	1
		ГЖОС	1
Прокопьевский	25	Д	10
		ДГ	6
		К	5
		КС	4
		СС	4
		Г	3
		ОС	3
		ТС	2
		ГЖО	2
		КСН	1
		Т	1
		КЖ	1
		КО	1
Беловский	16	Д	11
		Т	3
		КС	2
		СС	2
		Ж	1
		КО	1
		ДГ	1
Кемеровский	14	К	6
		КС	5
		КЖ	2
		СС	2
		ОС	2
		Д	1
		Т	1
		КО	1
Ленинск-Кузнецкий	9	Ж	1
		ГЖ	1
		ГЖ	1
Тисульский	1	Б	1
Таштагольский	1	Т	1
Гурьевский	1	КО	1
		КСН	1
		ГЖО	1
		СС	1

* указано количество предприятий, добывающих определенные марки угля (например, в Ленинск-Кузнецком муниципальном районе 6 предприятий осуществляют добычу угля марки Г, 1 предприятие вырабатывает уголь марки Д, по 1 предприятию добывают уголь марки Ж и ГЖ.

* the number of enterprises mining certain grades of coal, e.g. in the Leninsk-Kuznetskiy municipal district, six enterprises are mining grade G coal, one enterprise produces coal grade D, and one enterprise produces coal of grade Zh and GZh.

Таблица 3. Марки угля Кемеровской области

Table 3. Grades of coal in the Kemerovo region

Обозначение марки	Наименование марки	Вид угля
Д	Длиннопламенный	Каменный
ДГ	Длиннопламенный газовый	
Г	Газовый	
ГЖ	Газовый жирный	
ГЖО	Газовый жирный отощенный	
Ж	Жирный	
КЖ	Коксовый жирный	
К	Коксовый	
КО	Коксовый отощенный	
КС	Коксовый слабоспекающийся	
КСН	Коксовый слабоспекающийся низкотемпературный	
ОС	Отощенный спекающийся	
СС	Слабоспекающийся	
Т	Тощий	
ТС	Тощий спекающийся	
А	Антрацит	Антрацит

рованных отвала, но присутствует 9 разрезов и шахт. Это может быть связано как с наличием несанкционированных отвалов, так и с захоронением отходов угледобычи на территории других муниципальных округов/районов. Данный факт требует дальнейшего детального рассмотрения.

Уголь является многокомпонентной породой органического происхождения. Его состав зависит от месторождения и включает простые химические элементы, сложные органические соединения (в том числе ПАУ) и минеральные примеси [7, 14, 15]. Одним из наиболее опасных поллютантов являются ПАУ. Они состоят из ароматических структур, которые связаны эфирными или метиленовыми мостиками, и алифатических боковых цепей, состоящих из метильных групп (также могут присутствовать этильные, пропиловые или бутильные функциональные группы). Среднее количество ароматических колец на структурную единицу в большинстве видов угля составляет 3–5. В зависимости от количества колец ПАУ делятся на 2 группы. Первая – ароматические соединения с 2 либо 3 кольцами, вторая – ароматические соединения с 4 либо 5 кольцами. Наиболее распространенными ПАУ в угле являются фенантрен, флуорантен, пурен и хризен [15–17]. Существует несколько механизмов попадания ПАУ в окружающую среду [15, 18, 19]:

- добыча угля;
- сжигание угля;
- выбросы в атмосферу несгоревшего угля;
- обогащение и промывка угля;
- транспортировка угля;

Таблица 4. Распределение отвалов по муниципальным округам/районам

Table 4. Distribution of dumps by municipal districts/areas

Муниципальный округ/район	Количество отвалов
Новокузнецкий	125
Прокопьевский	82
Кемеровский	66
Беловский	64
Таштагольский	29
Гурьевский	15
Промышленновский	5
Яшкинский	4
Ленинск-Кузнецкий	2
Крапивинский	2
Чебулинский	1

- хранение «пустой» породы в отвалах и хвостохранилищах;
- самовозгорание «пустой» породы на отвалах и хвостохранилищах.

Попадая в окружающую среду, ПАУ образуют соединения с органическими и неорганическими взвешенными частицами, которые могут легко проникать в растительные и животные клетки за счет своей липофобности [20–23].

Наиболее опасными источниками загрязнения окружающей среды ПАУ являются обогатительные фабрики, отвалы, терриконы, ТЭЦ и различные металлургические заводы. Это связано с тем, что продуктами горения угля также являются ПАУ. Попадая в газовую фазу, они способны распространяться на значительные расстояния от источника загрязнения. Большая часть таких предприятий или отвалов находится в непосредственной близости от населенных пунктов. Из-за этого возникает риск развития у жителей различных заболеваний, связанных с мутациями [16, 24–26].

ПАУ подвергаются биодegradации с низкой скоростью (являются стойкими органическими загрязнителями). Большинство из них относятся к первому классу опасности. При попадании в организм человека они способны вызывать респираторные, сердечно-сосудистые и онкологические заболевания, аллергию, астму и т. д. Также негативно влияют на развитие плода [27–29].

Качественный и количественный состав ПАУ в угле зависит от нескольких факторов [30, 31]:

- растительного сырья, участвовавшего в процессе образования угля;
- термодинамических условий процесса образования угля;
- года образования угольного пласта.

В работе Z. R. Ismagilo и др. исследован состав ПАУ нескольких марок каменного угля Кузбасса.

Таблица 5. Содержание ПАУ

Table 5. PAH content

Марка угля	Наибольшее содержание ПАУ
Д	Фенантрен, пирен, бенз(а)антрацен
ДГ	Фенантрен, бенз(а)антрацен, бенз(б)флуорантен
ГЖО	Фенантрен, бенз(а)антрацен
ГЖО	Фенантрен, бенз(б)флуорантен
Ж	Фенантрен, пирен, бенз(б)флуорантен
К	Фенантрен, пирен, бенз(б)флуорантен, бенз(а)пирен
КС	Фенантрен, пирен, бенз(б)флуорантен, бенз(а)пирен
КС	Фенантрен, хризен, бенз(а)пирен
ОС	Фенантрен, пирен, бенз(б)флуорантен, хризен

Авторами установлено, что во всех пробах среди ПАУ концентрация фенантрена является наибольшей. В пробах также найдены пирен, бенз(а)антрацент, хризен и бенз(б)флуорент. Наибольшее общее содержание ПАУ обнаружено у коксующихся марок угля. Содержание ПАУ в исследованных марках угля представлено в таблице 5 [32].

Найденные вещества имеют следующий класс опасности:

- 1 класс опасности: бенз(а)пирена, бенз(а)антрацент и бенз(б)флуорент;
- 2 класс опасности: фенантрен, пирен и хризен.

Одним из наиболее опасных источников антропогенного загрязнения угледобычи являются отвалы вскрышных пород. Это связано с продуктами их горения. Из данных таблиц 2 и 4 видно, что общее количество отвалов превышает количество шахт и разрезов более чем в 4 раза. Угольные отвалы являются термически активными участками с трещинами на поверхности. Их характеризуют высокие внешние и внутренние температуры. Выбрасываемые токсичные и дымовые газы создают зоны, аналогичные вулканическим сульфатарам. В состав токсичных газов могут входить различные ПАУ. В исследовании Р. Kuna-Gwoździejcz определено содержание ПАУ в этих газах. Были обнаружены такие соединения, как нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен и антрацен. Не были найдены флуорантен, пирен и бенз(а)пирен. Среднее содержание ПАУ составило 10,251 мг/м³ [33].

Стоит отметить, что концентрация и распределение микроэлементов, ПАУ и органических соединений в угольных отходах различаются. На это влияют исходный состав, процессы обработки (нагревание, окисление и коксование), уровень кислорода, влажность, температура и др.

К одним из видов отходов углепереработки относится технический битум. В работе Т. Mukasa-

Mugerwa и др. исследовались происходящие изменения на угольных отвалах, содержащих технический битум [34].

На свалках угольных отходов уровень pH варьируется от кислого до щелочного (pH = 5,4–7,5), что характеризует только термически неактивные отходы. Отвалы с присутствием пиролитического битума характеризуются низкими уровнями pH (3,4–3,9), что отражает окисление присутствующих в них сульфидов. Также в процессе горения угольных отвалов Pb и Hg испаряются из более горячих и глубоких частей отвалов в виде HgS, PbS, PbCl₂ и осаждаются в верхних частях отвалов или в непосредственной близости от них.

Органическая фаза угольных отходов различается и зависит от условий саморазогрева. Нафталина больше в отходах, содержащих пирогенный битум, который препятствует испарению некоторых отходов, подвергшихся термическому изменению. Высокое количество нафталина соответствует начальной стадии саморазогрева. Высокое содержание антрацена, фторарантена, пирена и фенантрена в отходах может отражать интенсивное окисление органических веществ или выгорание почвенного покрова во время самонагревания. Высокие (~ 300–1078 мг/кг) концентрации Hg на изученных свалках представляют серьезную опасность для окружающей среды и для тех, кто живет в непосредственной близости от мест хранения отходов угледобычи [34, 35].

Стоит отметить, что на законодательном уровне установлено, что все нарушенные земли в процессе угледобычи должны быть подвергнуты обязательной процедуре рекультивации. У каждой угледобывающей компании обязательно должен присутствовать план рекультивации территории угледобычи. Рекультивацией может заниматься как угледобывающая компания, так и подрядная организация, которая на этом специализируется.

Согласно постановлению Правительства РФ от 10.07.2018 г. «О проведении рекультивации и консервации земель» рекультивацией называют «мероприятия по предотвращению деградации земель и (или) восстановлению их плодородия посредством приведения земель в состояние, пригодное для их использования в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием, в том числе путем устранения последствий загрязнения почвы, восстановления плодородного слоя почвы и создания защитных лесных насаждений» [36].

Согласно ГОСТ Р 57446-2017 рекультивация нарушенных земель проходит в 2 этапа:

1. Технический этап проводится с целью формирования структуры почвы, необходимой для произрастания культур, используемых в биологическом этапе рекультивации (включает в себя планировку и землевание);

Таблица 6. Культуры, используемые для рекультивации нарушенных земель на территории Кемеровской области

Table 6. Plants used for mine reclamation in the Kemerovo region

Виды деревьев и кустарников	Наименование культуры
Хвойные породы	Лиственница сибирская, ель сибирская, кедр сибирский, пихта сибирская
Лиственные породы	Береза повислая, тополь лавролиственный, тополь бальзамический, вяз перистоветвистый, ясень пенсильванский, лох узколистный
Кустарники	Облепиха крушиновая, лох серебристый, карагана древовидная, бузина сибирская, рябина сибирская, черемуха обыкновенная, жимолость татарская, смородина золотистая, вишня песчанная, кизиль черноплодный, рябинник рябинолистный, спирея средняя, роза коричная, пузыреплодник калинолистный, ольховник кустарниковый, ивы (козья, прутиновидная, шелюга, сибирская, трехтычинковая)

2. Биологический этап необходим для возобновления процесса почвообразования, повышения самоочищающей способности почвы и воспроизводства биоценозов. Методы, применяемые на этом этапе, можно разделить на 2 группы: физико-химические и биологические с использованием растений. В последние годы на биологическом этапе рекультивации начинают применять методы, позволяющие с высокой эффективностью восстанавливать плодородный слой почвы, а также повышать процесс ее очищения от вредных ингредиентов. К таким методам относят применение микробных комплексов, гуматов, торфа и др. для ускорения почвообразовательного процесса, а также фиторемедиацию и биоремедиацию (например, с использованием микроорганизмов), которые позволяют связывать и разлагать вредные ингредиенты. Биологическим этапом заканчивается формирование культурного ландшафта на нарушенных землях.

Перечень культур, рекомендованных к применению для рекультивации нарушенных земель на территории Кемеровской области, представлен в таблице 6 [37].

Культуры, применяемые для фиторемедиации, и поллютанты, накапливающиеся в их биомассе, представлены в таблице 7 [38–43].

Ориентировочная стоимость рекультивации, включая технический и биологический этапы, одного гектара земли на территории региона составляет 200 тыс. руб. Оценочная стоимость всех этапов рекультивации – 20–24 млрд. руб. Из них 1,8–6,4 млрд руб. может стоить биологический этап рекультивации [44]:

- прямой посев семян (около 1900 млн руб.);
- широкоягодная посадка хвойных пород с подсевом многолетних трав (около 1950 млн руб.);
- смешанная посадка сосны обыкновенной и кедра сибирского (около 1800 млн руб.);
- смешанная посадка хвойных и лиственных кустарников (около 1800 млн руб.);

– плантационно-обсеменительная посадка сосны обыкновенной (около 5500 млн руб.).

Засев территории нарушенных земель только выбранными культурами (без использования удобрений) является наименее эффективным методом, поскольку показывает низкие показатели выживаемости используемых культур, а биомасса погибших растений незначительно изменяет состав почвы/грунта.

Посадка культур с использованием удобрений снижает количество погибших культур на территории угледобычи. Исследованиями Н. Н. Терещенко с соавторами, проводимыми на территории восточного разреза «Краснобродский» Кемеровской области, показано, что применение торфяного мелиоранта повышало выживаемость посевных трав [45].

Авторами в ходе эксперимента проводилось исследование по нижепредставленной схеме:

- применение полного минерального удобрения;
- применение торфяного мелиоранта (25 т/га);
- применение торфяного мелиоранта (50 т/га);
- применение полного минерального удобрения + подсев семян, предварительно обработанных оксигуматом.

Торфяной мелиорант является органическим удобрением, которое производят на основе оксигумата. Он содержит твердые остатки гидролиза торфа и обогащен азотом и минеральными солями. Оксигумат является продуктом гидролиза торфа в присутствии CoSO_4 при высоких температурах.

Эксперимент проводили поэтапно. В первый год засеивали донник (*Melilotus albus*), затем подсеивали люцерну посевную (*Medicago sativa*) и смесь многолетних трав.

Результаты эксперимента показали, что устойчивый травостой формируется только в случае использования торфяного мелиоранта. В контрольном варианте наблюдалась низкая выживаемость многолетних трав.

Применение торфяного мелиоранта увеличило содержание легко- и среднеокисляемых органических

Таблица 7. Культуры, применяемые для фиторемедиации

Table 7. Crops used for phytoremediation

Название культуры	Содержание поллютантов, мг/кг биомассы
<i>Populus alba</i>	Zn (2500), Cu (580)
<i>Salix viminalis</i> L.	Cd (8,9), Zn (6000)
<i>Salix viminalis</i> <i>Salix fragilis</i> <i>Populus deltoides</i> <i>Populus nigra</i> <i>Populus trichocarpa</i>	Cd (34,5), Zn (760), Pb (45), Cu (10,4)
<i>Salix Klara</i> <i>Salix Inger</i>	Zn (900), Pb (1,9), Cu (9,5)
<i>Deschampsia cespitosa</i>	Cd (1258,2), Zn (5246,0), Pb (4504,7)

веществ, а количество трудноокисляемых уменьшилось. Это связано с активным разложением растительных остатков. Торфяной мелиорант также увеличивал количество аммонификаторов и азотоусваивающих микроорганизмов в почве [45].

М. Desai и др. провели исследование на территории бывшего угольного разреза по очищению почвы от тяжелых металлов с использованием лесных массивов. Почва была загрязнена такими металлами, как Zn, Cb, Mn, Pb и Cu. Посадки саженцев ольхи обыкновенной и березы сибирской через 14 лет позволили уменьшить содержание тяжелых металлов на 52 %. Исследование листьев деревьев показало, что береза поглощала больше Zn, Cb, Mn, Cu, а ольха Pb. Разные породы деревьев поглощают тяжелые металлы с различной скоростью, поэтому для эффективной фиторемедиации почв рекомендуется использовать смешанные посадки древесных пород [46].

А. А. Juwarkar и Н. Р. Jambhulkar провели исследование эффективности использования осадка очистных сооружений и биоудобрения для биоремедиации почв угольных отвалов. Анализ почвы после внесения осадка очистных сооружений и биоудобрения показал, что содержание таких тяжелых металлов, как Zn, Cu, Ni, Fe, Cr, Mn, Pb и Cb, снизилось на 40 %. Результаты исследований показали эффективность использования биоудобрения для восстановления биоразнообразия почвы и снижения содержания поллютантов [47].

Помимо растений, для ремедиации земель также применяются и микроорганизмы. Основной технологией создания микробных препаратов для рекультивации земель является анализ микробного состава почвы/грунта отвалов (для поиска микроорганизмов-деструкторов – основных загрязняющих компонентов почвы) или корней растений, произрастающих на исследуемой территории, для поиска перспективных штаммов

ризобактерий (ризоремедиация).

Рассмотрели некоторые исследования, посвященные разработке микробных препаратов.

Актуальным является исследование Т. Т. Mukasa-Mugerwa и др., в котором выделили микроорганизмы-деструкторы частиц угля. Целью этого исследования было изучение роли арбускулярно микоризных грибов (АМГ), засеваемых вместе с *Cynodon dactylon*, для разложения каменного угля. Были проведены эксперименты в лабораторных контролируемых условиях, моделирующих условия угольного отвала. Результаты показывают, что сочетание АМГ с *C. dactylon* привело к эффективному разложению угля. Основным продуктом метаболизма микроорганизмов-деструкторов является гуминовая кислота [48].

В исследовании Т. М. Palanivel и др. показано, что выделенные из почвы микроорганизмы способны усваивать ион Cu(II). Результаты исследования биологической очистки показали, что эффективность удаления из раствора Cu изолятом *Pseudomonas stutzeri* LA3 составила 50, 41, 32, 25 и 9 % через 96 ч (начальная концентрация Cu 50, 100, 150, 200 и 400 мг/л соответственно). Процент удаления Cu(II) из жидкой среды, его внутриклеточное накопление и производство внеклеточных полимерных веществ доказали эффективность использования изолята *P. stutzeri* LA3 в биоремедиации земель с высокой концентрацией меди. Исследуемый штамм *P. stutzeri* LA3 является аборигенным, адаптированным к засушливым условиям среды, поэтому его можно легко выращивать в полевых условиях [49, 50].

Р. Miao и др. использовали в своей работе культуры растений *Lolium multiflorum* L. и *Glycine max* L., а также культуры экзогенных штаммов *Pseudomonas* sp. Они исследовали их способность к разложению ПАУ в загрязненных почвах. Проверяли наличие ПАУ в почве на 0, 10, 20 и 30 сутки. Выяснилось, что уже на 30 день содержание полициклических ароматических углеводородов снизилось на 47 % по сравнению с их начальным содержанием. При внесении этих компонентов изменилась структура и биоразнообразие естественной микрофлоры почвы [51].

Выводы

В ходе исследований были выявлены основные территории Кемеровской области, подвергшиеся антропогенному загрязнению в ходе угледобычи (Новокузнецкий, Прокопьевский Кемеровский, Беловский, Ленинск-Кузнецкий округа/районы). Подробно изучены особенности посттехногенных ландшафтов угледобычи (дана характеристика поллютантам, выявлены наиболее опасные поллютанты – ПАУ). Проанализирована законодательная база РФ по рекультивации земель,

представлен перечень рекомендованных культур растений для фиторемедиации. Приведен расчет необходимых денежных средств для проведения рекультивации нарушенных земель Кемеровской области. Рассмотрено влияние угольных отвалов на экологическую ситуацию в регионе.

Описаны перспективные методы рекультивации земель, в том числе методы, позволяющие с высокой эффективностью восстанавливать плодородный слой почвы, а также повышать процесс ее очищения от вредных ингредиентов. К таким методам относят применение микробных комплексов, гуматов, торфа и др. для ускорения почвообразовательного процесса, а также биоремедиации (с использованием растений и микроорганизмов), позволяющей связывать и разлагать вредные ингредиенты.

Критерии авторства

Авторы были в равной степени вовлечены в написание рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The authors were equally involved in the writing of the manuscript and are equally responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Цивилев С. Е. Кузбасс 2035: национальные интересы и стратегические приоритеты развития региона. // Экономика промышленности. 2020. Т. 13. № 3. С. 281–289. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2020-3-281-289>.
2. Зеленый Кузбасс: как увеличить темпы рекультивации. URL: <https://gazeta.a42.ru/lenta/projects/62513-zelyonyi-kuzbass-kak-uvlechit-tempy-rekultivacii> (дата обращения: 21.08.2021).
3. Наумов И. В. Исследование пространственных диспропорций в процессах нарушения и рекультивации земельных ресурсов в России // Известия Уральского государственного горного университета. 2019. Т. 56. № 4. С. 143–152.
4. Борзенкова А. В., Синьков Л. С. Механизм финансовых гарантий рекультивации земель при открытых горных работах // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2013. Т. 58. № 10.
5. Петрова Т. В., Корабель Л. А. Анализ возможностей использования механизмов финансовых гарантий для финансирования работ по рекультивации // Горный информационно-научный бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 250–254.
6. Яковлева А. В. Концепция формирования проектного фонда рекультивации земель при открытых горных работах // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 1. <https://doi.org/10.15862/33EVN115>.
7. Li W., Chen B., Ding X. Environment and reproductive health in China: challenges and opportunities Environ // Environmental Health Perspectives. 2012. Vol. 120. № 5. P. 184–185. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205117>.
8. Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the rhizosphere of sudangrass (*Sorghum × drummondii*) / J. J. A. Dominguez [et al.] // Chemosphere. 2019. Vol. 234. P. 789–795. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.290>.
9. Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany / K. Wolf [et al.] // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 579. P. 1531–1540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.160>.
10. Borah P., Kumar M., Devi P. Types of inorganic pollutants: metals/metalloids, acids, and organic forms // Inorganic pollutants in water / editors P. Devi, P. Singh, S. K. Kansal. Elsevier, 2020. P. 17–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00002-0>.
11. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes / R. Dixit [et al.] // Sustainability. 2015. Vol. 7. № 2. P. 2189–2212. <https://doi.org/10.3390/su7022189>.
12. Марки угля. URL: [https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemye-voprosy/vidyi-uglya/marki-uglya/#:~:text=Какие%20марки%20угля%20существуют.%20Согласно,\(КС\).%20Коксовый%20слабоспекающийся%20низкометаморфизованный%20\(КСН](https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemye-voprosy/vidyi-uglya/marki-uglya/#:~:text=Какие%20марки%20угля%20существуют.%20Согласно,(КС).%20Коксовый%20слабоспекающийся%20низкометаморфизованный%20(КСН) (дата обращения: 22.08.2021).
13. Государственный реестр объектов размещения отходов. URL: <https://www.fcao.ru/groro?page=332> (дата обращения: 21.08.2021).
14. Авгушевич И. В., Сидорук Е. И., Броневец Т. М. Стандартные методы испытания углей. Классификация углей. М.: Реклама мастер, 2018. 574 с.
15. Полициклические ароматические углеводороды из углей в объектах окружающей среды / Е. В. Журавлева [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. № 3. С. 328–336. <https://doi.org/10.15372/KhUR2020237>.

16. Polar polycyclic aromatic compounds from different coal types show varying mutagenic potential, EROD induction and bioavailability depending on coal rank / W. Meyer [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 494–495. P. 320–328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.140>.
17. Chemical fingerprinting of hydrocarbons / S. A. Stout [et al.] // *Introduction to environmental forensics* / editors B. L. Murphy, R. D. Morrison. San Diego: Academic Press, 2002. P. 137–260.
18. Determination of PAH in coal of different metamorphism degrees from the Kuznetsk coal basin / E. R. Khabibulina [et al.] // *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2015. Vol. 2. P. 268–271.
19. Ahrens M. J., Morrissey D. J. Biological effects of unburnt coal in the marine environment // *Oceanography and Marine Biology*. 2005. Vol. 43. P. 69–122.
20. Yahiya M., Miranda M. T. P. Distribution, sources and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the south west coast of Kerala, India // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 41. P. 736–743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.440>.
21. Effects of benzo [a] pyrene (BaP) on the composting and microbial community of sewage sludge / H. Liu [et al.] // *Chemosphere*. 2019. Vol. 222. P. 517–526. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.180>.
22. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and plants of the tundra zone under the impact of coal-mining industry / E. V. Yakovleva [et al.] // *Eurasian Soil Science*. 2016. Vol. 49. № 11. P. 1319–1328. <https://doi.org/10.1134/S1064229316090143>.
23. Effect of naphthalene on photosystem 2 photochemical activity of pea plants / A. V. Lankin [et al.] // *Biochemistry*. 2014. Vol. 79. № 11. P. 1216–1225. <https://doi.org/10.1134/S0006297914110091>.
24. Hindersmann B., Achten C. Urban soils impacted by tailings from coal mining: PAH source identification by 59 PAHs, BPCA and alkylated PAHs // *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 242. P. 1217–1225. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.014>.
25. Leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from coal dumps reclaimed with apple trees: a mechanistic insight / M. J. Garcia-Martinez [et al.] // *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. Vol. 40. № 6. P. 2695–2706. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0133-9>.
26. Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils / C. Pies [et al.] // *Chemosphere*. 2008. Vol. 72. № 10. P. 1594–1601. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.021>.
27. Dynamics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of Cochin estuary, India / A. Ramzi [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 144. № 2. P. 1081–1087. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.015>.
28. Drwal E., Rak A., Gregoraszczuk E. L. Review: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) – action on placental function and health risks in future life of newborns // *Toxicology*. 2019. Vol. 411. P. 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2018.10.003>.
29. Comparative mechanisms of PAH toxicity by benzo[a]pyrene and dibenzo[def,p]chrysene in primary human bronchial epithelial cells cultured at air-liquid interface / Y. Chang [et al.] // *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2019. Vol. 379. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.114644>.
30. Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin / S. Laumann [et al.] // *Environmental Pollution*. 2011. Vol. 159. № 10. P. 2690–2697. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.032>.
31. Achten C., Hofmann T. Native polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in coals – A hardly recognized source of environmental contamination // *Science of the Total Environment*. 2009. Vol. 407. № 8. P. 2461–2473. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.008>.
32. Экологические проблемы кузнецкого угольного бассейна. Научные подходы и технологии для снижения загрязнений окружающей среды / З. Р. Исмаилов [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2018. Т. 26. № 3. С. 241–260. <https://doi.org/10.15372/KhUR20180302>.
33. Kuna-Gwozdziwicz P. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from the exhalation zones of thermally active mine waste dumps // *Journal of Sustainable Mining*. 2013. Vol. 12. № 1. P. 7–12. <https://doi.org/10.7424/jsm130103>.
34. Mukasa-Mugerwa T. T., Dames J. F., Rose P. D. The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal // *Biodegradation*. 2011. Vol. 22. № 1. P. 129–141. <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9382-8>.
35. Heavy metal- and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland) / A. Nadudvari [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 412. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125244>.
36. Правила проведения рекультивации и консервации земель. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_302235/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5/ (дата обращения: 22.08.2021).
37. Уфимцев В. И., Манаков Ю. А., Куприянов А. Н. Методические рекомендации по лесной рекультивации нарушенных земель на предприятиях угольной промышленности в Кузбассе. Кемерово: Ирбис, 2017. 44 с.
38. Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils / P. Kidd [et al.] // *International Journal of Phytoremediation*. 2015. Vol. 17. № 11. P. 1005–1037. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.1003788>.

39. Effect of chemophytostabilization practices on arbuscular mycorrhiza colonization of *Deschampsia cespitosa* ecotype Waryński at different soil depths / E. Gucwa-Przepiora [et al.] // Environmental Pollution. 2007. Vol. 150. № 3. P. 338–346. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.024>.
40. Clonal differences in survival capacity, copper and zinc accumulation, and correlation with leaf polyamine levels in poplar: A large-scale field trial on heavily polluted soil / S. Castiglione [et al.] // Environmental Pollution. 2009. Vol. 157. № 7. P. 2108–2117. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.011>.
41. Assessing phytotoxicity of trace element-contaminated soils phytomanaged with gentle remediation options at ten European field trials / C. Quintela-Sabaris [et al.] // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 599–600. P. 1388–1398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.187>.
42. Short rotation coppice culture of willows and poplars as energy crops on metal contaminated agricultural soils / A. Ruttens [et al.] // International Journal of Phytoremediation. 2011. Vol. 13. P. 194–207. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.568543>.
43. Risk management and regeneration of brownfields using bioenergy crops / A. Enell [et al.] // Journal of Soils and Sediments. 2016. Vol. 16. № 3. P. 987–1000. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1264-6>.
44. Власюк Л. И. Стратегический приоритет экологизации экономики Кузбасса: фонд рекультивации земель // Управленческое консультирование. 2021. Т. 146. № 2. С. 69–78. <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2021-2-69-78>.
45. Биоремедиация угольных отвалов Кузбасса при помощи продуктов комплексной переработки торфа / Н. Н. Терещенко [и др.] // Фундаментальные исследования. 2013. № 11–9. С. 1866–1872.
46. Desai M., Haigh M., Walkington H. Phytoremediation: Metal decontamination of soils after the sequential forestation of former opencast coal land // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 656. P. 670–680. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.327>.
47. Juwarkar A. A., Jambhulkar H. P. Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach // Bioresource Technology. 2008. Vol. 99. № 11. P. 4732–4741. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.060>.
48. Mukasa-Mugerwa T. T., Dames J. F., Rose P. D. The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal // Biodegradation. 2011. Vol. 22. № 1. P. 129–141. <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9382-8>.
49. Bioremediation of copper by active cells of *Pseudomonas stutzeri* LA3 isolated from an abandoned copper mine soil / T. M. Palanivel [et al.] // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 253. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109706>.
50. Ayangbenro A. S., Babalola O. O. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 14. № 1. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
51. Response of soil bacterial communities to polycyclic aromatic hydrocarbons during the phyto-microbial remediation of a contaminated soil / R. Miao [et al.] // Chemosphere. 2020. Vol. 261. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127779>.

References

1. Tsivilev SE. Kuzbass 2035: National interests and strategic priorities of the regional development. Russian Journal of Industrial Economics. 2020;13(3):281–289. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2020-3-281-289>.
2. Zelenyy Kuzbass: kak uvelichit' tempy rekul'tivatsii [Green Kuzbass: how to increase the rate of reclamation] [Internet]. [cited 2021 Aug 21]. Available from: URL: <https://gazeta.a42.ru/lenta/projects/62513-zelyonyi-kuzbass-kak-uvelichit-tempy-rekul'tivatsii>.
3. Naumov IV. The study of spatial imbalances in the processes of disruption and land reclamation in Russia. News of the Ural State Mining University. 2019;56(4):143–152. (In Russ.).
4. Borzenkova AV, Sin'kov LS. The financial assurance to guarantee remediation of the open-cast mining areas. Upravlenie ehkonomicheskimi sistemami: ehlektronnyy nauchnyy zhurnal [Management of economic systems: electronic scientific journal]. 2013;58(10). (In Russ.).
5. Petrova TV, Korabel LYa. The analysis of possibility of using mechanisms of financial assurance for financing operations on recultivation. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2015;(7):250–254. (In Russ.).
6. Yakovleva AV. The concept of remediation fund formation at open-pit mining. Internet-zhurnal Naukovedenie [Science Studies Online Journal]. 2015;7(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/33EVN115>.
7. Li W, Chen B, Ding X. Environment and reproductive health in China: challenges and opportunities Environ. Environmental Health Perspectives. 2012;120(5):184–185. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205117>.
8. Dominguez JJA, Bacosa HP, Chien M-F, Inoue C. Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the rhizosphere of sudangrass (*Sorghum × drummondii*). Chemosphere. 2019;234:789–795. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.290>.
9. Wolf K, Cyrus J, Harciníková T, Gu J, Kusch T, Hampel R, et al. Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany. Science of the Total Environment. 2017;579:1531–1540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.160>.

10. Borah P, Kumar M, Devi P. Types of inorganic pollutants: metals/metalloids, acids, and organic forms. In: Devi P, Singh P, Kansal SK, editors. *Inorganic pollutants in water*. Elsevier; 2020. pp. 17–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00002-0>.
11. Dixit R, Wasiullaha, Malaviya D, Pandiyan K, Singh UB, Sahu A, et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*. 2015;7(2):2189–2212. <https://doi.org/10.3390/su7022189>.
12. Marki uglya [Coal grades] [Internet]. [cited 2021 Aug 22]. Available from: [https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/vidyi-uglya/marki-uglya/#:~:text=Какие%20марки%20угля%20существуют.%20Согласно,\(КК\).%20Коксовый%20слабоспекающийся%20низкометаморфизованный%20\(КЧН](https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/vidyi-uglya/marki-uglya/#:~:text=Какие%20марки%20угля%20существуют.%20Согласно,(КК).%20Коксовый%20слабоспекающийся%20низкометаморфизованный%20(КЧН).
13. Gosudarstvennyy reestr ob'ektov razmeshcheniya otkhodov [State register of waste disposal facilities] [Internet]. [cited 2021 Aug 21]. Available from: <https://www.fcao.ru/groro?page=332>.
14. Avgushevich IV, Sidoruk EI, Bronovets TM. Standartnye metody ispytaniya ugley. Klassifikatsiya ugley [Standard test methods for coals. Coal classification]. Moscow: Reklama master; 2018. 574 p. (In Russ.).
15. Zhuravleva EV, Mikhailova ES, Zhuravleva NV, Ismagilov ZR. Polycyclic aromatic hydrocarbons from coal in the objects of the environment. *Chemistry for Sustainable Development*. 2020;28(3):328–336. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KhUR2020237>.
16. Meyer W, Seiler T-B, Schwarzbauer J, Püttmann W, Hollert H, Achten C. Polar polycyclic aromatic compounds from different coal types show varying mutagenic potential, EROD induction and bioavailability depending on coal rank. *Science of the Total Environment*. 2014;494–495:320–328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.140>.
17. Stout SA, Uhler AD, McCarthy KJ, Emsbo-Mattingly S. Chemical fingerprinting of hydrocarbons. In: Murphy BL, Morrison RD, editors. *Introduction to environmental forensics*. San Diego: Academic Press; 2002. pp. 137–260.
18. Khabibulina ER, Ismagilov ZR, Zhuravleva NV, Sozinov SA. Determination of PAH in coal of different metamorphism degrees from the Kuznetsk coal basin. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2015;2:268–271.
19. Ahrens MJ, Morrissey DJ. Biological effects of unburnt coal in the marine environment. *Oceanography and Marine Biology*. 2005;43:69–122.
20. Yahya M, Miranda MTP. Distribution, sources and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the south west coast of Kerala, India. *Materials Today: Proceedings*. 2021;41:736–743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.440>.
21. Liu H, Yin H, Tang S, Wei K, Peng H, Lu G, et al. Effects of benzo [a] pyrene (BaP) on the composting and microbial community of sewage sludge. *Chemosphere*. 2019;222:517–526. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.180>.
22. Yakovleva EV, Gabov DN, Beznosikov VA, Kondratenok BM. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and plants of the tundra zone under the impact of coal-mining industry. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(11):1319–1328. <https://doi.org/10.1134/S1064229316090143>.
23. Lankin AV, Kreslavski VD, Khudyakova AY, Zharmukhamedov SK, Allakhverdiev SI. Effect of naphthalene on photosystem 2 photochemical activity of pea plants. *Biochemistry*. 2014;79(11):1216–1225. <https://doi.org/10.1134/S0006297914110091>.
24. Hindersmann B, Achten C. Urban soils impacted by tailings from coal mining: PAH source identification by 59 PAHs, BPCA and alkylated PAHs. *Environmental Pollution*. 2018;242:1217–1225. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.014>.
25. Garcia-Martinez MJ, Ortega MF, Bolonio D, Llamas JF, Canoira L. Leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from coal dumps reclaimed with apple trees: a mechanistic insight. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018;40(6):2695–2706. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0133-9>.
26. Pies C, Hoffmann B, Petrowsky J, Yang Y, Ternes TA, Hofmann T. Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils. *Chemosphere*. 2008;72(10):1594–1601. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.021>.
27. Ramzi A, Habeeb Rahman K, Gireeshkumar TR, Balachandran KK, Jacob C, Chandramohanakumar N. Dynamics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of Cochin estuary, India. *Marine Pollution Bulletin*. 2017;144(2):1081–1087. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.015>.
28. Drwal E, Rak A, Gregoraszczuk EL. Review: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) – action on placental function and health risks in future life of newborns. *Toxicology*. 2019;411:133–142. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2018.10.003>.
29. Chang Y, Siddens LK, Heine LK, Sampson DA, Yu Z, Fischer KA. Comparative mechanisms of PAH toxicity by benzo[a]pyrene and dibenzo[def,p]chrysene in primary human bronchial epithelial cells cultured at air-liquid interface. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2019;379. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.114644>.
30. Laumann S, Micić V, Krüge MA, Achten C, Sachsenhofer RF, Schwarzbauer J, et al. Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin. *Environmental Pollution*. 2011;159(10):2690–2697. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.032>.
31. Achten C, Hofmann T. Native polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in coals – A hardly recognized source of environmental contamination. *Science of the Total Environment*. 2009;407(8):2461–2473. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.008>.

32. Ismagilov ZR, Zhuravleva NV, Kerzhentsev MA, Yashnik SA, Matus EV, Podyacheva OYu, et al. Environmental issues in Kuznetsk coal basin. Scientific approaches and technologies to reduce environmental pollution. Chemistry for Sustainable Development. 2018;26(3):241–260. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KhUR20180302>.
33. Kuna-Gwozdiewicz P. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from the exhalation zones of thermally active mine waste dumps. Journal of Sustainable Mining. 2013;12(1):7–12. <https://doi.org/10.7424/jsm130103>.
34. Mukasa-Mugerwa TT, Dames JF, Rose PD. The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal. Biodegradation. 2011;22(1):129–141. <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9382-8>.
35. Nadudvari A, Kozielska B, Abramowicz A, Fabiańska M, Ciesielczuk J, Cabała J, et al. Heavy metal- and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). Journal of Hazardous Materials. 2021;412. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125244>.
36. Pravila provedeniya rekul'tivatsii i konservatsii zemel' [Rules for land reclamation and conservation] [Internet]. [cited 2021 Aug 22]. Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_302235/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5.
37. Ufimtsev VI, Manakov YuA, Kupriyanov AN. Metodicheskie rekomendatsii po lesnoy rekul'tivatsii narushennykh zemel' na predpriyatiyakh ugoľ'noy promyshlennosti v Kuzbasse [Methodical recommendations for forest reclamation of disturbed lands at coal industry enterprises in Kuzbass]. Kemerovo: Irbis; 2017. 44 p. (In Russ.).
38. Kidd P, Mench M, Álvarez-López V, Bert V, Dimitriou I, Friesl-Hanl W, et al. Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils. International Journal of Phytoremediation. 2015;17(11):1005–1037. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.1003788>.
39. Gucwa-Przepiora E, Małkowski E, Sas-Nowosielska A, Kucharski R, Krzyzak J, Kita A, et al. Effect of chemophytostabilization practices on arbuscular mycorrhiza colonization of *Deschampsia cespitosa* ecotype Waryński at different soil depths. Environmental Pollution. 2007;150(3):338–346. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.024>.
40. Castiglione S, Todeschini V, Franchin C, Torrigiani P, Gastaldi D, Ciatelli A, et al. Clonal differences in survival capacity, copper and zinc accumulation, and correlation with leaf polyamine levels in poplar: A large-scale field trial on heavily polluted soil. Environmental Pollution. 2009;157(7):2108–2117. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.011>.
41. Quintela-Sabaris C, Marchand L, Kidd PS, Friesl-Hanl W, Puschenreiter M, Kumpiene J, et al. Assessing phytotoxicity of trace element-contaminated soils phytomanaged with gentle remediation options at ten European field trials. Science of the Total Environment. 2017;599–600:1388–1398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.187>.
42. Ruttens A, Boulet J, Weyens N, Smeets K, Adriaensen K, Meers E, et al. Short rotation coppice culture of willows and poplars as energy crops on metal contaminated agricultural soils. International Journal of Phytoremediation. 2011;13:194–207. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.568543>.
43. Enell A, Andersson-Sköld Y, Vestin J, Wagelmans M. Risk management and regeneration of brownfields using bioenergy crops. Journal of Soils and Sediments. 2016;16(3):987–1000. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1264-6>.
44. Vlasjuk LI. Strategic priority for greening the Kuzbass economy: land rehabilitation fund. Administrative Consulting. 2021;146(2):69–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2021-2-69-78>.
45. Tereshchenko NN, Pisarchuk AD, Alekseeva TP, Burmistrova TI. Bioremediation of coal dumps in Kuzbass region with using the products of deep peat processing. Fundamental research. 2013;(11–9):1866–1872. (In Russ.).
46. Desai M, Haigh M, Walkington H. Phytoremediation: Metal decontamination of soils after the sequential forestation of former opencast coal land. Science of the Total Environment. 2019;656:670–680. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.327>.
47. Juwarkar AA, Jambhulkar HP. Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach. Bioresource Technology. 2008;99(11):4732–4741. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.060>.
48. Mukasa-Mugerwa TT, Dames JF, Rose PD. The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal. Biodegradation. 2011;22(1):129–141. <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9382-8>.
49. Palanivel TM, Sivakumar N, Al-Ansari A, Victor R. Bioremediation of copper by active cells of *Pseudomonas stutzeri* LA3 isolated from an abandoned copper mine soil. Journal of Environmental Management. 2020;253. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109706>.
50. Ayangbenro AS, Babalola OO. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017;14(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
51. Miao R, Guo M, Zhao X, Gong Z, Jia C, Li X, et al. Response of soil bacterial communities to polycyclic aromatic hydrocarbons during the phyto-microbial remediation of a contaminated soil. Chemosphere. 2020;261. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127779>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-883-904>Обзорная статья
<http://fptt.ru>

Перспективы использования микробиома почв угольных отвалов с целью ремедиации антропогенно нарушенных экосистем

Е. Р. Фасхутдинова*, М. А. Осинцева, О. А. Неверова



Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 09.09.2021

Принята после рецензирования: 15.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: faskhutdinovae.98@mail.ru

© Е. Р. Фасхутдинова, М. А. Осинцева, О. А. Неверова, 2021

Аннотация.

Введение. Угольная промышленность способствует накоплению загрязняющих веществ в почве, таких как тяжелые металлы и полициклические ароматические углеводороды. Поэтому восстановление почвы является актуальной задачей. Цель исследования – обоснование использования микроорганизмов угольных отвалов в борьбе с загрязнением почвы тяжелыми металлами и нефтяными загрязнителями.

Объекты и методы исследования. Научные статьи, изданные за последние пять лет, а также источники, цитируемые в Scopus, Web of Science и Elibrary. В работе использовали методы анализа, систематизации и обобщения тематических публикаций современных баз данных.

Результаты и их обсуждение. Одним из результатов воздействия угольной промышленности является изменение ландшафта, животного и растительного мира, а также почвенного микробиома. Биоремедиация с использованием различных микроорганизмов является эффективным методом, позволяющим восстановить поврежденные участки почвы. Доказано, что микроорганизмы, выделенные из угольных отвалов, обладают устойчивостью к тяжелым металлам и полициклическим ароматическим углеводородам, а также способностью к их утилизации. Бактерии рода *Bacillus*, а также штамм *Pseudomonas aeruginosa* способны деградировать нефтяные загрязнители. Микроорганизмы видов *Enterobacter* и *Klebsiella* оказались устойчивы к меди, железу, свинцу и марганцу. Бактерии родов *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Pseudoarthrobacter* и *Sinomonas* показали устойчивость к никелю, мышьяку и хрому. Арбускулярные микоризные грибы увеличивают активность почвенных ферментов, повышая плодородность почв и разлагая различные органические соединения.

Выводы. Методы секвенирования позволяют определить видовой состав почв угольных отвалов с целью поиска новых штаммов, способных восстанавливать поврежденные участки.

Ключевые слова. Угольная промышленность, биоремедиация, тяжелые металлы, полициклические углеводороды, микробиом

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания для выполнения научно-исследовательских работ по теме «Разработка подходов к фиторемедиации посттехногенных ландшафтов с использованием стимулирующих рост растений ризобактерий (PGPB) «омиксных» технологий», дополнительное соглашение № 075-03-2021-189/4 от 30.09.2021 (внутренний номер 075-ГЗ/Х4140/679/4). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием КемГУ.

Для цитирования: Фасхутдинова Е. Р., Осинцева М. А., Неверова О. А. Перспективы использования микробиома почв угольных отвалов с целью ремедиации антропогенно нарушенных экосистем // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 883–904. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-883-904>.

Review article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Prospects of Using Soil Microbiome of Mine Tips for Remediation of Anthropogenically Disturbed Ecosystems

Elizaveta R. Faskhutdinova*, Maria A. Osintseva, Olga A. Neverova

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: September 09, 2021

Accepted in revised form: November 15, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



Abstract.

Introduction. Coal industry increases soil pollution with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. Therefore, resoiling is an urgent problem that requires an immediate solution. The present research objective was to substantiate the use of microorganisms from mine tips in order to decrease soil pollution with heavy metals and oil compounds.

Study objects and methods. The review featured five years of publications in Scopus, Web of Science, and Elibrary, which were subjected to analysis, systematization, and generalization.

Results and discussion. Coal industry changes landscapes, flora, fauna, and soil microbiome. Bioremediation uses various microorganisms as means of resoiling. Some microorganisms isolated from coal mining waste are resistant to heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons and are able to utilize them. For instance, such bacteria as *Bacillus* and *Pseudomonas aeruginosa* are capable of degrading oil pollutants. Microorganisms of *Enterobacter* and *Klebsiella* species were found to be resistant to copper, iron, lead, and manganese. Bacteria of the genera *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Pseudoarthrobacter*, and *Sinomonas* are now to be resistant to nickel, arsenic, and chromium. Arbuscular mycorrhizal fungi increase the activity of soil enzymes, improve soil fertility, and decompose various organic compounds.

Conclusion. Sequencing methods make it possible to determine the species composition of soils in mine tips in order to search for new strains capable of restoring former mining areas.

Keywords. Coal industry, bioremediation, heavy metals, polycyclic hydrocarbons, microbiome

Funding. The research is part of state assignment “Development of approaches to phytoremediation of post-technogenic landscapes using the “omics” technologies that stimulate the growth of rhizobacteria (PGPB)”, supplementary agreement No. 075-03-2021-189/4 from 30.09.2021 (internal number 075-Г3/Х4140/679/4). The research was conducted on the premises of the Research Equipment Sharing Center of Kemerovo State University.

For citation: Faskhutdinova ER, Osintseva MA, Neverova OA. Prospects of Using Soil Microbiome of Mine Tips for Remediation of Anthropogenically Disturbed Ecosystems. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):883–904. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-883-904>.

Введение

Последние 20 лет охарактеризовались активной антропогенной деятельностью. В результате неправильного и неоправданного использования земельных ресурсов и ненадлежащего удаления отходов увеличилось загрязнение поверхности Земли, спровоцированное удобрениями, пестицидами, газовыми выбросами и выбросами сточных вод [1]. К сожалению, степень деградации земель увеличивается с каждым годом. По всему миру насчитывается около 5 млн участков почвы, загрязненной токсичными элементами [1–3]. Ситуация с загрязнением почвы Китая является наиболее критичной.

Сжигание накапливаемого топлива, добыча металлов и полезных ископаемых, сельскохозяйственное производство пестицидов и удобрений, а также сброс сточных вод приводит к повреждению почвы и экологическому дисбалансу земель [4].

По данным Росприроднадзора за 2019 г., добыча и разведка угля осуществляется в 25 субъектах Российской Федерации на 22 угольных бассейнах и 129 отдельных месторождениях. Крупнейшим и основным источником угля на территории России является Кузнецкий угольный бассейн.

Из-за эмиссии загрязняющих веществ в результате метеорологических процессов и явлений угольные отвалы являются источниками загрязнения подземных водоносных горизонтов и поверхностных водных

объектов. Нарушение земель происходит во время разработки и хранения отходов, которые изымаются из землепользования. Выработанная при разработке месторождений вскрышная порода, содержащая уголь, размещается в отвалах на протяжении всего периода эксплуатации месторождений.

Согласно статистике происходит увеличение площадей поврежденных земель. При этом площадь рекультивируемых земель, наоборот, уменьшается. Растут и накопленные вследствие добычи угля отходы. Выбросы вредных веществ увеличились на 12,5 %. Количество уловленных и обезвреженных вредных веществ сократилось на 55,4 %. Площадь нарушенных земель увеличилась на 154 %, а площадь рекультивированных сократилась на 42,0 % (рис. 1 и 2). Объем накопленных отходов от добычи угля вырос на 30,0 % [5]. Загрязнения окружающей среды локального уровня со временем превращаются в региональные.

Необходимо отметить, что на территории Российской Федерации зафиксировано 450 потенциально опасных субъектов (рис. 3).

В 2019 г. проведен аудит, включающий 104 проверки. В результате выявлено 493 нарушения Закона РФ «О недрах» и природоохранного законодательства РФ. Подсчитано, что около 120 горнодобывающих объектов находятся в бесхозном состоянии. На них не проводятся

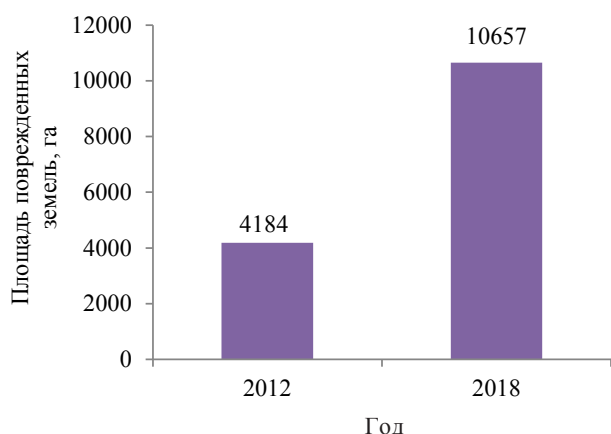


Рисунок 1. Площадь земель, поврежденных добычей угля

Figure 1. Area of land damaged by coal mining

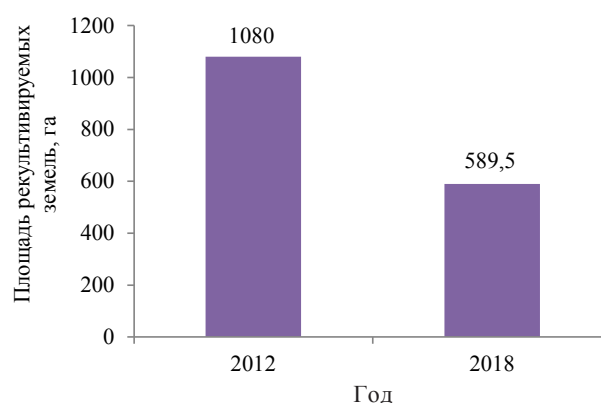


Рисунок 2. Площадь рекультивируемых земель

Figure 2. Area of reclaimed land

мероприятия по рекультивации поврежденных земель, а отработанные горные породы не ликвидированы, что создает серьезную угрозу окружающей среде.

Загрязнение почвы различными токсичными элементами представляет серьезную угрозу для человечества, влияя не только на продовольственную безопасность, но и на здоровье человека, попадая в организм разными путями [6–10].

Наиболее распространенными токсичными элементами почвы являются тяжелые металлы, среди которых Hg (ртуть), Pb (свинец), Cd (кадмий), As (мышьяк) и Zn (цинк). Ртуть представляет наибольшую опасность для организма человека, оказывая влияние на почки, иммунную, нервную и пищеварительную системы. При длительном воздействии на человека мышьяк способен

аккумулироваться на кожных покровах. Соли цинка обладают повышенной токсичностью для человека. Особую угрозу представляют сульфаты и хлориды [11].

Попадание в почву полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) является следствием антропогенного воздействия. Их опасность заключается в канцерогенных, мутагенных и токсичных свойствах [12]. Доказано, что ПАУ оказывают негативное влияние на репродуктивную, сердечно-сосудистую, иммунную и эндокринную системы человека [13]. Кроме того, ПАУ способны вызывать рак молочной железы и рак желудка [14, 15].

Таким образом, восстановление почвы и удаление из нее токсичных веществ является важной и актуальной проблемой.

Человечество изобрело множество способов борьбы с загрязнением почвы. Одним из самых



Рисунок 3. Регионы РФ с наибольшим количеством потенциально опасных субъектов

Figure 3. Regions of the Russian Federation with potentially dangerous industries

распространенных методов является биоремедиация [16]. Применение этого метода позволяет сделать почву свободной от воздействия токсичных элементов [17]. Микробиом почвы использует тяжелые металлы как источник питания в процессе биоремедиации. Существует два пути ее применения: на загрязненном участке (*in situ*) и в биореакторах, в которых происходит обработка извлеченного загрязненного участка почвы, возвращенного потом на прежнее место (*ex situ*). Подобные методики обладают рядом преимуществ, что позволило им найти широкое применение.

Целью данного обзора стало обоснование использования микробиома угольных отвалов для ремедиации почв, загрязненных в результате антропогенного воздействия.

Данный обзор сосредоточен на изучении влияния тяжелых металлов и полициклических ароматических углеводородов на свойства почвы и почвенный микробиом. Рассмотрены методы биоремедиации загрязненных почв, проанализированы группы микроорганизмов, использующиеся в процессе биоремедиации, отмечена роль метагеномного секвенирования в идентификации некультивируемых микроорганизмов почвы, проанализирован состав почвы угольных отвалов, а также отмечена роль почвенной микробиоты в очистке загрязненных участков.

Объекты и методы исследования

Выполнен аналитический обзор 111 научных литературных источников на русском и английском языках. Проведены систематизация и обобщение данных по состоянию поврежденных почв угольных отвалов, а также групп микроорганизмов, способных восстанавливать почву, зараженную тяжелыми металлами и нефтепродуктами.

Поиск был ограничен рецензируемыми статьями в академических журналах и включал исследовательские и обзорные статьи, которые соответствовали тематике исследования.

Поиск в базах данных Web of Science и Scopus осуществлялся на английском языке, поиск в базе данных Elibrary – на русском. Глубина запроса составляла 36 лет: с 1985 по 2021 гг. При этом предпочтение отдавалось публикациям за последние 5 лет. Были отобраны публикации, которые подробно рассмотрели и изучили, а также ссылки в них на более ранние работы.

Результаты и их обсуждение

Антропогенное загрязнение почвы. Одними из наиболее часто встречающихся загрязнителей почв являются нефтяные углеводороды. Следствием попадания нефтепродуктов в почву является снижение ее функциональности.

Нефтегенные загрязнители попадают в почву в виде смеси алканов и полиароматических углеводородов (ПАУ). При попадании они снижают разнообразие микробиоценоза по нескольким причинам: прямая токсичность; ограничение доступа микроорганизмов к питательным веществам и воде, в результате чего становится невозможным создать строительные блоки для размножения; разрыв микробных клеток путем растворения липидов цитоплазматической мембраны [17].

В исследовании S. Mukherjee и др. было установлено, что при попадании в почву креозотов снижается разнообразие микробиоценоза. Необходимо отметить, что общее число микроорганизмов почвы увеличилось, что связано с размножением углеводородоразлагающих микроорганизмов [18]. В исследовании L. S. Khudur и др. было установлено, что дизельное топливо в концентрации 40 мл/кг изменило почвенный микробиоценоз через 2 недели воздействия. В результате был нарушен микробный баланс [19].

Токсичность нефтяных загрязнителей зависит от нескольких факторов:

- от длины углеводородной цепи (вещества с короткой углеводородной цепью более токсичны из-за их высокой биодоступности, но вещества с длинной цепью обладают повышенным мутагенным потенциалом) [20];
- от концентрации питательных веществ (повышенное содержание элементов азота и фосфора способствует увеличению численности и активности углеводородоразлагающих бактерий [19];
- от одновременного присутствия в почве как нефтяных загрязнителей, так и тяжелых металлов. Результаты исследования L. S. Khudur и др. показали, что загрязненные углеводородами почвы более восприимчивы к микробной биоремедиации при совместном загрязнении свинцом (Pb). Свинец ингибирует многие метаболические пути, такие как ферментативные и дыхательные процессы многих бактерий, и создает дополнительный стресс для углеводородоразлагающих видов [21].

Различные грибы и бактерии, находясь в почве, образуют консорциумы, которые продуцируют различные биоактивные молекулы (первичные и вторичные метаболиты). К ним относятся и окислительные и гидролитические ферменты, благодаря которым возможна минерализация углеводородных фракций. Основными ферментами, участвующими в данном процессе, являются оксигеназы. Они образуют цис-дигидродиол гидроксирования на ароматическом кольце, который превращается в промежуточный продукт с помощью дегидрогеназы. Затем происходит образование катехолов – промежуточных продуктов цикла лимонной кислоты.

Альтернативное разложение нефтепродуктов возможно за счет использования нелигнинолитических грибов через Р450 – опосредованный путь [22].

Загрязнение почвы тяжелыми металлами, которое возможно в результате природного или антропогенного воздействия, является важной проблемой [23]. Опасность тяжелых металлов заключается в том, что они являются стойкими элементами. Оптимальная концентрация тяжелых металлов не представляет угрозы для растений и животных. Однако увеличение их содержания приводит к нарушению метаболических процессов в растительных и животных организмах [24]. К тяжелым металлам, которые представляют серьезную угрозу для живых организмов, относят свинец (Pb), кадмий (Cd), ртуть (Hg), хром (Cr), цинк (Zn), уран (U), селен (Se), серебро (Ag), золото (Au), никель (Ni) и мышьяк (As).

Исследователи, в том числе Y. M. Yang и др., пришли к заключению, что на токсичность тяжелых металлов влияет не только их концентрация, но и химический вид: обменная фракция (удерживающихся электростатическими силами на поверхности минералов) обладает биодоступностью, карбонатная фракция, а также фракция Fe-Mn потенциально обладает биодоступностью, остаточная фракция не биодоступна [25]. На биодоступность тяжелых металлов оказывают влияние такие показатели, как размер частиц почвы и pH.

Китайские ученые L. Zheng и др. изучали влияние кадмия и ртути на почвенный микробиом. Авторами выяснено, что под воздействием этих загрязнителей ингибируется действие ферментов [26]. Согласно полученным данным ртуть в концентрации 30 мг/кг снижала активность почвенной уреазы на 76,50 % и 85,60 % почвенной дегидрогеназы, кадмий снижал активность кислой фосфатазы на 15,18 %. Совместное действие ртути и кадмия угнетало действие кислотной фосфатазы на 17,09 %. Также установлено, что присутствие в почве ртути снижало численность бактерий, одновременно с этим увеличивая численность грибов.

Биоремедиация. Биоремедиация – это процесс, при котором микроорганизмы разлагают различные источники загрязнений окружающей среды. Микробиом почвы является ключевым компонентом данного процесса, поскольку является стабильными и эффективными, чем чистые культуры. Поэтому почвенные микроорганизмы становятся перспективным и многообещающим способом восстановления почвы [27].

Микробиом представляет собой взаимосвязь между микробным консорциумом и средой их обитания. Микробный консорциум – сообщество микроорганизмов различного вида, основанное на принципе экологического отбора. Установлено, что на 1 га почвы приходится более 1 т углерода микробной биомассы. Микроорганизмы оказывают как прямое,

так и косвенное воздействие на жизнедеятельность растений и животных путем разложения, круговорота питательных веществ почвы, поддержания плодородия и связывания углерода в почве. При загрязнении почвы происходит адаптация микробиома, в результате чего становится возможным метаболизм внешних загрязнителей.

Химические способы утилизации отходов, сжигание, а также их захоронение оказались неэффективны. Поэтому учеными был разработан новый метод борьбы с вредными отходами – микробная биоремедиация. Данный способ является рентабельной и экологически чистой альтернативой, позволяющей эффективно разлагать загрязнители почвы [28].

Факторы, влияющие на процесс биоремедиации. На процесс биоремедиации оказывают влияния различные факторы. pH, температура, присутствие низкомолекулярных органических и гуминовых кислот влияют на валентное состояние тяжелых металлов и биодоступность ПАУ.

Главным фактором, влияющим на эффективность биоремедиации, является pH. Так как оптимальное значение pH различно для каждой группы микроорганизмов, то они будут подвержены его влиянию. pH почвы способно влиять на окислительно-восстановительные и растворимые тяжелые металлы, а также на изоэлектрическую точку в растворе [29]. При этом эффективность восстановления тяжелых форм металлов зависит от соответствия их валентных состояний и форм. Некоторые микроорганизмы не способны трансформировать тяжелые металлы и разлагать ПАУ в кислых или щелочных условиях, но способны на это в экстремальных условиях. При увеличении показателя pH происходит электрохимические притяжение и адсорбция ионов металлов за счет подъема отрицательного заряда на поверхность биомассы [30]. Установлено, что оптимальные значения pH, при которых происходит наибольшая сорбция металла, находятся в интервале от 4 до 8 [31, 32]. Однако эти значения могут варьироваться в зависимости от природы как биомассы, так и ионов металлов. В исследовании M. Agyal и M. Liakoroulou-Kyriakides установлено, что эффективность биосорбции Cr(III) штаммом *Mycobacterium* sp. Spy1 повышалась при увеличении значения pH с 1 до 5. При этом дальнейшее повышение значения pH до 7 ингибировало процесс биоремедиации Cr(VI) [33]. Низкое значение pH негативно влияет на процесс биоремедиации из-за появления конкуренции за места связывания между ионами H и ионами металлов. Высокое значение pH способствует осаждению ионов металлов, что также замедляет биоремедиацию. Таким образом, регулировка и оценка pH почвы является важным элементом процесса биоремедиации.

Температура важна в процессе биоремедиации. При увеличении температуры повышается растворимость ПАУ и тяжелых металлов. Следовательно, увеличивается их биодоступность. [34] Кроме того, повышение температуры в оптимальном диапазоне может увеличивать микробный метаболизм и активность ферментов, повышая эффективность процесса биоремедиации. Также температура влияет на адсорбцию и десорбцию ПАУ и тяжелых металлов микроорганизмами [35]. Интенсивность адсорбции увеличивается с повышением температуры [36]. Однако ученые отмечают, что результаты долгосрочных полевых исследований и лабораторных экспериментов часто противоречивы [37]. При этом значение температуры, превышающее оптимальное, может стать причиной разрушения участков связывания ионов металлов [33]. Увеличение температуры способно привести к деформации функциональных сайтов связывания на биосорбенте и к снижению скорости удаления ионов металлов. Таким образом, эффект влияния температуры непредсказуем, сложен и требует дополнительных исследований.

Широко встречающиеся в почвах гуминовые и низкомолекулярные органические кислоты оказывают влияние на процесс биоремедиации ПАУ и тяжелых металлов. Фенольные, карбоновые и хининовые группы способны связываться с ионами тяжелых металлов, образуя гетерогенные лиганды [38]. Доказано, что увеличение скорости деградации ПАУ микроорганизмами зависит от присутствия в почве низкомолекулярных органических кислот из-за уменьшения адсорбции [39].

Следует отметить, что свойства и признаки самих бактерий также важны для проведения процесса биоремедиации. Фактором, влияющим на микробные свойства почвы, является активность почвенных ферментов. Различные ферменты, продуцируемые почвенной микробиотой, принимают участие во множестве биохимических реакций, влияя на плодородие и рост растительности, разлагая органические соединения [40]. Например, к источникам активности почвенных ферментов для биохимических реакций относят арбускулярные микоризные грибы (АМГ), т. к. они увеличивают активность таких почвенных ферментов, как фосфатаза, уреазы, протеазы и др. [41]. Доказано, что почвенные микроорганизмы, включая АМГ, способны стимулировать рост растений путем взаимодействия с их корнями [42]. Опубликованы исследования, доказывающие, что различный почвенный микробиом может как положительно, так и отрицательно влиять на развитие АМГ в почве. Некоторые АМГ из семейства *Glomeraceae* увеличивают обилие микроорганизмов, принадлежащих к типу *Firmicutes* и *Streptomyces* [43].

Исследование N. B. Svenningsen и др., посвященное мониторингу состава бактериальных сообществ в

почвах с различным pH и их взаимодействия с АМГ, выявило, что кислотный pH и подавление АМГ в почве могут быть связаны с обилием специфических бактериальных групп, таких как семейства *Chitinophagaceae* и *Xanthomonadaceae* и роды *Nocardioideae*, *Acidothermus*, *Arthrobacter*, *Lactobacillus*, *Pullanibacillus*, *Weissella*, *Dyella*, *Rhizomicrobium* и *Rhodanobacter* [44]. Подавление активности АМГ продолжительностью внешнего транспорта мицелия и фосфора к растению было выявлено в почвах с высоким содержанием *Acidobacteria*.

Биоремедиация обладает рядом преимуществ, что позволяет рассматривать ее как эффективный метод борьбы с различными загрязнениями, а также восстановления микробиоценоза почвы. По сравнению с традиционными методами ремедиации биоремедиация является экономичным аналогом. Согласно экспертным оценкам средняя стоимость биоремедиации составляет не более 20 % от стоимости химических методов очистки.

На сегодняшний день существует три основных метода биоремедиации *in situ*: естественное затухание, биостимуляция и биоаугментация [45].

Метод естественного затухания основан на детоксикации загрязняющих веществ местными микроорганизмами. Преимуществом данного метода является его безопасность для среды обитания. Однако его реализация может занимать длительное время, т. к. микроорганизмы, способные разлагать токсичные вещества, составляют не более 10 % от общей массы почвенной микробиоты. Поэтому ученые разработали такие методы, как биостимуляция и биоаугментация, повышающие эффективность естественного затухания [46]. Микроорганизмы, используемые в данном методе, вводятся в виде свободного или иммобилизованного инокулята. Чтобы процесс биоремедиации прошел эффективно и успешно, микроорганизмы должны быть устойчивыми к тем условиям среды, в которую они вводятся, а также разрушать токсичные элементы [47]. Эти микроорганизмы могут быть изолированы из поврежденной почвы и размножены. Также их природные ценные функции могут быть улучшены лабораторными методами. После ряда процедур такие генетически модифицированные микроорганизмы вводятся в загрязненную почву [48]. Результат биоаугментации зависит от взаимодействий между экзогенными и аборигенными микроорганизмами, которые вступают в борьбу за питательные вещества.

Выбор метода биоремедиации и организмов-биоремедиаторов зависит от видов загрязнителей, попадающих в окружающую среду [49]. Микроорганизмы, используемые в биоремедиации, способны очищать окружающую среду тремя путями: преобразованием загрязнителей в менее токсичные или вовсе не токсичные вещества;

извлечением загрязнителей из окружающей среды и их детоксикацией; ингибированием жизнедеятельности микроорганизмов, способных выделять токсичные вещества. Первый способ детоксикации загрязнителей основан на способности микроорганизмов продуцировать ферменты (гидролитические ферменты и оксидоредуктазы), второй обусловлен метаболическими процессами, инактивирующими различные токсины, а третий – антагонистической репрессией.

Различают следующие группы микроорганизмов, использующихся в биоремедиации:

- аборигенная микрофлора, разрушающая загрязняющие вещества;
- консорциумы микроорганизмов, способные влиять на оздоровительные функции друг друга.

Наиболее часто используется аборигенная микрофлора. Для стимулирования очистки почвы от токсинов используются различные вещества, такие как меласса, навоз, навозные стоки, а также источники азота, фосфора и эмульгаторы. При активации аборигенной микрофлоры необходимо учитывать такие показатели почвы, как возраст и характер загрязнения, механический состав почвы и направление ее хозяйственного использования [50].

Биоремедиация доказала свою эффективность при борьбе с загрязнением почвы тяжелыми металлами. Согласно М. J. Blaylock и др. применение метода ремедиации позволяет сэкономить до 65 % затрат при обработке 1 акра почвы, загрязненной свинцом, по сравнению с физическими методами, такими как свалка и раскопки [51].

Микроорганизмы, участвующие в процессе биоремедиации. Бактерии обладают способностью жить при практически любых условиях окружающей среды. Они широко используются в биоремедиации из-за их небольшого размера, быстрой скорости роста и простоты культивирования. Методы восстановления тяжелых металлов основаны на применении бактерий родов *Escherichia*, *Pseudomonas*, *Bacillus* и *Micrococcus*. Ионы металлов адсорбируются на поверхностях полисахаридной стенки с помощью карбоксильных аминогрупп, фосфатных и сульфатных групп [52, 53]. Способности бактерий к поглощению ионов тяжелых металлов варьируются от 1 до 500 мг/г [54].

Необходимо отметить, что грамположительные и грамотрицательные бактерии имеют разные механизмы поведения при взаимодействии с загрязняющими веществами. Грамположительные бактерии размножаются в почвах, загрязненных токсичными металлами и ароматическими углеводородами [55]. Например, *Rhodococcus*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, *Gordonia*, *Streptomyces* и *Nocardia* обладают способностью разлагать бифенилы, бензол и нафталин. Грамположительные и грамотрицательные бактерии проявляли различный уровень устойчивости по отношению к одному и

тому же загрязняющему веществу. Исследование С. О. Nweke и др., направленное на изучение токсичности цинка на штаммах *Bacillus* sp., *Arthrobacter* sp. и *Salmonella* sp., показало, что грамотрицательные бактерии оказались менее чувствительны к данному загрязняющему веществу, чем грамположительные бактерии [56]. Исследования М. Lăzăroaie подтвердили предположение о том, что грамотрицательные бактерии проявляют большую толерантность к предельным, моноароматическим и полиароматическим углеводородам, чем грамположительные бактерии [57]. Однако ряд исследований указывает на то, что грамположительные бактерии оказались толерантны к таким видам загрязняющих веществ, как углеводороды и ПАУ [58, 59].

Грибы также являются одним из объектов, использующихся при биоремедиации загрязненных почв. Клетки этих микроорганизмов состоят из хитин-хитозанового комплекса глюкуроновой кислоты, фосфата и полисахаридов, что обуславливает их способность адсорбировать тяжелые металлы. *Aspergillus niger* применяется в качестве биосорбента для удаления Pb(II) [60]. Установлено, что грибковый изолят *Aspergillus fumigatus* удалял Cr(VI), показывая максимальное поглощение данного металла 48,2 мг/г в оптимальных условиях [61]. Биомасса *Termitomyces chypeatus* при помощи различных функциональных групп способна поглощать Cr(VI) [62].

Учеными установлено, что наибольшую эффективность при борьбе с тяжелыми металлами показали не отдельные виды микроорганизмов, а их консорциумы. С. Н. Kang и др. исследовали влияние биоремедиации смеси тяжелых металлов свинца, кадмия и меди бактериальным консорциумом [63]. Консорциум состоял из 4 штаммов микроорганизмов: *Viridibacillus arenosi* B-21, *Sporosarcina soli* B-22, *Enterobacter cloacae* KJ-46 и KJ-47. Полученные результаты свидетельствуют о том, что через 48 ч использования консорциума микроорганизмов восстановление свинца показало 98 % эффективности, 85,4 % эффективности восстановления кадмия и 5,6 % эффективности восстановления меди по сравнению с отдельным штаммом.

Биоремедиация тяжелых металлов обусловлена следующими механизмами:

- взаимодействием тяжелых металлов с компонентами клеточных стенок микроорганизмов, а также с внутриклеточными белками или пептидами;
- изменением путей биохимического блокирования поглощения металлов;
- образованием безвредных форм металлов под воздействием ферментов;
- уменьшением содержания металлов под воздействием эффлюксных систем [64].

Связывание тяжелых металлов с компонентами клеточных стенок бактерий происходит за счет присутствия гидроксильных, карбонильных и

фосфатных групп, которые обладают способностью связываться с ионами металлов [65, 66]. В состав клеточной стенки грамположительных бактерий входят такие вещества, как пептидогликаны, состоящие из аланина и глутаминовой, мезодиаминовой и тейхоновой кислот. Состав клеточной стенки грамотрицательных бактерий включает в себя наличие ферментов, гликопротеинов, липополисахаридов и фосфолипидов [67]. Вышеперечисленные вещества являются сайтами для процессов связывания с тяжелыми металлами [68].

Ученые сталкиваются с тем, что большинство микроорганизмов, обитающих в окружающей среде, не поддается культивированию. Поэтому многие результаты исследований почвенного микробиома сосредоточены на культивируемых видах микроорганизмов. Следовательно, огромная часть микробиома остается неизученной и неисследованной из-за отсутствия возможности подбора оптимальных параметров культивирования. D. J. Lane и др. был описан метод, благодаря которому стал возможен филогенетический анализ микробных сообществ [69]. Данный метод основан на анализе универсальных маркеров таксономии, включая ген 5S и 16S рРНК, что позволяет получить информацию о физиологических потребностях некультивируемых микроорганизмов. Это произвело революцию в микробиологии и дало возможность выделять микроорганизмы, которые до сегодняшнего дня невозможно было получить в лабораторных условиях [70]. Секвенирование позволяет получать результаты анализа с высокой точностью – до 99,9 % [71]. Понимание механизма, с помощью которого микроорганизмы осуществляют процесс биоремедиации окружающей среды, позволит ученым разработать новые подходы по восстановлению загрязненных участков. Физиологические потребности микроорганизмов, изученные с помощью метагеномного анализа поврежденных участков, могут использоваться для биостимуляции местного микробиома. Такие исследования способны предоставить необходимую информацию биоремедиации в условиях *in situ*.

Метагеномные подходы применяются двумя способами: целевым методом и методом дробовика [72]. Первый подход регулярно используется для исследования разнообразия последовательностей малых субъединиц рРНК (16S/18S рРНК) в образце. Микробные экологи используют секвенирование малых субъединиц рРНК, чтобы понять таксономическое разнообразие окружающей среды. Его также можно применять в качестве инструмента для исследования влияния загрязнителей окружающей среды на изменение структуры микробного сообщества. Метагеномика дробовика охватывает лишь доминирующие в сообществе микроорганизмы и редко описывает геномное содержание малочисленных членов [73].

Метагеномика – многообещающая область, которая позволила микробиологам получить доступ к скрытым микробным ресурсам, актуальным для различных биотехнологических отраслей. Изучение состава и функций местного микробного сообщества позволяет найти новые микроорганизмы. Раньше микробиологические процессы выделения микроорганизмов из окружающей среды были трудозатратными и дорогостоящими, но использование метагеномики экономит время и денежные ресурсы на разработку технологий. Поэтому метагеномика имеет потенциальное применение в области биоремедиации окружающей среды. Метагеномическая, метаболическая и физиологическая оценка местного микробного сообщества поддерживает разработку эффективных технологий биоремедиации.

Тяжелые металлы выступают в роли акцепторов – электронов для микроорганизмов. За счет этого они получают энергию для процессов детоксикации загрязнителей с помощью ферментативных и неферментативных систем [74]. Бактерии также обладают способностью поглощать металлы в твердых частицах, а также в нерастворимых формах и их побочных продуктах. Такой процесс называется биоаккумуляцией. Она обусловлена наличием экзополисахаридов, которые позволяют бактериальным клеткам связываться с тяжелыми металлами. Полезные свойства полисахаридов заключаются в том, что они защищают клеточные стенки от таких факторов окружающей среды, как токсичность, засуха, соленость и пр. F. Donot и др. выяснили, что такие микроорганизмы, как *Agrobacterium* spp., *Alcaligenes faecalis*, *Xanthomonas campestris*, *Bacillus* spp., *Zygomonas mobilis*, *Leuconostoc*, *Pseudomonas* spp. и *Acetobacter xylinum* обладают способностью продуцировать полисахарид [75].

Влияние угледобывающей промышленности на окружающую среду. Угольная промышленность является одной из базовых отраслей экономики не только Российской Федерации, но и всего мира. В настоящее время добыча угля в России осуществляется открытым способом, что обусловлено низкой стоимостью и высокой производительностью [76]. Несмотря на глобальную модернизацию горного хозяйства, механизацию производства и повышение безопасности работ по добыче полезных ископаемых, вопрос о негативном влиянии угледобывающей промышленности на окружающую среду остается открытым. Это связано с выбросами твердых веществ в атмосферу и большим объемом загрязненных сточных вод, попадающих в водоемы [77]. Не меньший вред угольная промышленность наносит почве, оказывая влияние на подземные воды, а также на растительный и животный мир. В результате угледобывающих работ изменяется

ландшафтный профиль, уничтожаются животные и среды их обитания, погибает растительность, разрушается генетический профиль почвы. Это делает угольную промышленность одной из самых экологически опасных отраслей. Поэтому многие угледобывающие регионы Российской Федерации столкнулись с серьезной экологической проблемой. Некоторые территории подверглись такому серьезному влиянию и разрушению почвы, что в скором времени их можно будет отнести к «зонам экологического бедствия».

После проведения горнодобывающих работ остаются поврежденные территории, которые больше не могут быть использованы [78]. Ремедиация способна восстановить эти территории. Результатом проведения восстанавливающих мероприятий станет то, что поврежденные и загрязненные участки почв будут представлять собой плодородный ландшафт с возрожденной флорой и фауной и очищенный от различных загрязняющих факторов.

Важнейшим этапом восстановления почвы является разработка и внедрение эффективных методов и технологий по рекультивации и ремедиации. Проведение этих мероприятий является необходимым, поскольку имеет большое хозяйственное, природоохранное и экологическое значение для регионов и страны в целом. На участках, занятых большим количеством промышленных предприятий, которые негативно влияют на окружающую среду, имеет место нехватка плодородных земельных ресурсов. При внедрении ремедиационных мероприятий в горнодобывающую систему возможно снижение затрат на ремедиацию, а также совершенствование этого процесса. В результате на промышленных территориях становится возможным создание лесов, парков и водоемов.

Одним из преимуществ горнодобывающей промышленности является обеспечение экономического и социального развития региона [80].

Добыча полезных ископаемых осуществляется двумя способами: открытым и закрытым. В результате открытых работ происходит эксгумация руды на поверхности или вблизи поверхности земли. Данный способ нашел свое применение в развивающихся странах.

Открытый способ добычи угля представляет собой проблему в виде карьеров и разрезов [79]. После переработки углесодержащих пород на поверхности месторождений образуются угольные отвалы (терриконы). Они опасны тем, что могут стать причиной пожаров и источником выбросов в атмосферу, водные ресурсы и почву таких загрязнителей, как окись углерода, окись азота, ртуть, кобальт и др.

В результате добычи полезных ископаемых происходит существенное изменение землепользования, которое влияет на мировую экономику.

Согласно исследованиям L. Zhou и др. добыча полезных ископаемых привела к эрозии около 40 тыс. км² земли на территории Китая [80]. Около 700 млн га Африки подверглись деградации в результате горнодобывающей промышленности.

Согласно исследованию A. Mahar и др. в результате добычи полезных ископаемых происходит изменение pH почвы [81]. Значение этого показателя варьируется в зависимости от материнской породы, химических веществ, используемых при добыче, а также количественного состава присутствующих в почве тяжелых металлов [82]. При установлении сильно кислого или сильно щелочного значения pH нарушается рост растений [83]. Также нарушается продуктивность почвы, т. к. большинство почвенных бактерий не приспособлено к подобным условиям. Почвенная микробиота представлена бактериями и грибами, которые осуществляют разложение и инициируют симбиотическое взаимодействие с растениями [84]. Они облегчают процесс поглощения веществ, необходимых для питания. Например, азота и фосфора в обмен на углерод [85]. Они также продуцируют полисахариды, способствующие улучшению общего роста и производительности растений.

Микробиом почв угольных отвалов и их влияние на загрязнители. Добыча угля способна изменять физические, химические и биологические свойства почвы [86].

Уголь существует в виде коричневой или черной породы и превращается в нее из сложной смеси растительных остатков посредством микробной активности и других диагенетических процессов [87]. В процессе укладки угля химические компоненты в нем могут проникать в почву, изменять ее свойства и влиять на микроорганизмы. Например, органическое вещество почвы (SOM) увеличивается из-за поступления в нее сложного полимерного органического состава угля. Кроме того, почва может подвергаться подкислению или быть токсичной для микробов из-за высвобождения серы и элементов тяжелых металлов [88].

В результате эксплуатации угля возникают экологические проблемы. Например, разрушение земель, сокращение растительности и биоразнообразия [89]. Исследования, проведенные G. Donggan и др., P. D. de Quadros и др., X. Liu и др., показали, что добыча угля способствовала деградации экосистемы и сократила разнообразие растений и микроорганизмов, а также изменила структуру и свойства почвы [90–92].

Углубленное изучение микробной экологии почвенных сред добычи угля поможет разгадать видовое разнообразие мелиорационных почв для целей биоразведки и для выявления потенциальных видов биомаркеров для мониторинга восстановления и здоровья почвенных экосистем в течение нескольких лет с момента рекультивации. Однако в настоящее

время такие углубленные исследования микробных сообществ на участках рекультивации после добычи угля являются редкими [93].

Почвенные микробы управляют биогеохимическим циклом углерода, азота, серы и других элементов [91, 94–97]. Поскольку уголь содержит много S-элемента, то в исследовании С. Shen и др. выдвинуто предположение об обнаружении вариации функциональных групп, связанных с циклом серы. В результате исследования обнаружено, что относительное содержание функциональных групп связано с дыханием железа, а серное дыхание увеличено в угольных почвах. Другое исследование, проведенное Р. Dorr de Quadros и др., показало, что в районе добычи угля содержание серы и сероредуцирующих бактерий больше, чем в лесной почве [91]. Цикл серы был продемонстрирован как доминирующая сила в круговороте железа. Железистый элемент играет важную роль для роста анаэробных бактерий и незаменим в ферментативной реакции. Например, пируват-ферредоксиноксидоредуктаза, участвующая в ацидогенезе [98, 99]. Исследование С. М. Hansel и др. показало, что активность дыхания микробного железа положительно коррелирует с процессом анаэробного разложения органических соединений [100].

Благодаря изучению микробного состава почвенных сред добычи угля становится возможным определение видового состава для выявления биомаркеров с целью мониторинга восстановления здоровья почвы.

О. Т. Ezeokoli и др. провели исследование, направленное на изучение видового состава почвы в районах добычи угля в Южной Африке [93]. Наиболее распространенными видами микроорганизмов, населяющих исследуемые образцы почвы, были *Acidibacter*, *Acidotherrmus*, *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia*, *Caballeronia*, *Paraburkholderia*, *Candidatus Udaeobacter*, *Candidatus Xiphinematobacter*, *Conexibacter* и *Sphingomonas*. Наличие данных видов микроорганизмов обусловлено тем, что они способны обеспечить круговорот питательных веществ почвы, биоконтроль болезней растений, а также их рост и реакцию на абиотический стресс [98]. Например, виды *Microvirga* и *Bradyrhizobium* относятся к ризобактериям. Их полезная функция заключается в фиксации азота в ризосфере, обеспечивая рост растений [99]. Бактерии вида *Bacillus* характеризуются способностью к модуляции экспрессии растительных гормонов и адаптации к абиотическому стрессу [101]. Деградацию полициклических соединений обеспечивают микроорганизмы вида *Sphingomonas* [102]. Микроорганизм *C. Udaeobacter* принадлежит к олиготрофам и способен находиться в почвах с низким содержанием питательных веществ. Следовательно, его можно использовать в качестве биоиндикатора плохого состояния почвы.

L. W. Marzan и др. утверждают, что микробные изоляты, выделенные из загрязненных тяжелыми металлами и другими токсичными соединениями участков, могут стать перспективным инструментом для процесса их биоремедиации [103]. О. В. Ojuederie и О. О. Babalola утверждают, что традиционные химические методы борьбы с загрязнением почвы низкими концентрациями тяжелых металлов доказывают свою неэффективность. Они являются дорогостоящими, требуют большого количества реагентов, а также образуют токсичные осадки [24]. Именно поэтому поиск штаммов микроорганизмов, способных бороться с тяжелыми металлами в поврежденных почвах, является перспективным и представляет особый интерес для науки.

Способность микроорганизмов к устойчивости к тяжелым металлам индивидуальна. Бактерии, находясь в загрязненной почве, со временем развивают механизмы резистентности, к которым можно отнести барьер проницаемости клеточной мембраны, внутриклеточную и внеклеточную секвестрацию, удаление тяжелых металлов изнутри клетки путем активного транспорта, а также преобразование токсичных форм в нетоксичные в рамках метаболической деятельности [104].

K. N. Singh и D. Narzary изучали резистентность к тяжелым металлам микроорганизмов, выделенных из зоны добычи угля в Ассаме, Индия [105]. Согласно их исследованию наиболее распространенным типом микроорганизмов угольных пластов были *Firmicutes*, относительная численность которых достигла 50,6 %. Актинобактерии были вторым по распространенности, их относительная численность составила 40,5 %. Относительная численность протеобактерий составила 8,9 %. На уровне семейства и рода численность семейства *Bacillaceae* оказалась наиболее распространена (45,6 %), а численность его рода *Bacillus* составила 35,4 %. Затем следовало семейство *Micrococcaceae* (34,2 %). Численность двух его родов (*Arthrobacter* и *Pseudarthrobacte*) в сумме составила 26,6 % (13,9 и 12,7 % соответственно). Распространенным изолятом, который удалось идентифицировать до уровня вида, являлся *Bacillus cereus* (7,6 %). За ним следовал *Arthrobacter pokkali* (5,1 %).

Исследование бактериального разнообразия слоев показало, что наибольшее разнообразие наблюдалось в слоях серого и известкового сланцев, наименьшее – в слоях песчаника на глубине 17,7–18,3 м и двух слоях углеродистого сланца (глубина 8,1–11,7 и 4,2–6,6 м). Бактерии родов *Paenarthrobacter*, *Leclercia*, *Paenibacillus*, *Ramlibacter*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus*, *Chryseomicrobium*, *Microbactrerium*, *Fictibacillus*, *Curtobacterium* и *Streptomyces* обнаружены только в одном слое, тогда как *Exiguobacterium*, *Massilia*, *Lysinibacillus*, *Sinomonas*, *Arthrobacter*, *Pseudarthrobacter* и *Bacillus* распространены в нескольких пластах.

Важным фактором, влияющим на микробную активность, является pH [106].

Проведено исследование по влиянию значения pH на видовое разнообразие микроорганизмов почвы. Согласно полученным результатам слабощелочная среда угольных отвалов оказалась наиболее обогащенной бактериями различных родов, среди которых *Chryseomicrobium*, *Curtobacterium*, *Microbacterium*, *Ramlibacter* и *Staphylococcus*. На втором месте оказались сильно-кислые среды (pH 3,5–4,4), в которых обнаружены *Acinetobacter*, *Exiguobacterium*, *Paenarthrobacter* и *Pseudomonas*. Бактериями, обнаруженными как в кислых, так и в щелочных средах, оказались *Arthrobacter*, *Pseudarthrobacter*, *Massilia*, *Bacillus* и *Lysinibacillus*.

Проведено исследование по изучению устойчивости микроорганизмов к ионам тяжелых металлов. *Pseudarthrobacter* sp., выделенный из слоя известкового сланца, показал наибольшую толерантность к Ni^{2+} в концентрации 5 Мм, тогда как *Arthrobacter*, *Pseudoarthrobacter* и *Sinomonas* проявляли толерантность к 4 Мм Ni^{2+} . Изоляты, толерантные к 5 Мм Cu^{2+} , принадлежали к роду *Bacillus*, за исключением *Exiguobacterium* и *Lysinibacillus*. Изолятами, которые показали толерантность к 10 Мм концентрации Cr^{6+} , были *Bacillus albus*, *B. cereus*, *Exiguobacterium sibiricum* и *Pseudomonas stutzeri*. Также изоляты продемонстрировали широкий диапазон толерантности к As^{3+} в концентрации от 1 до 12 Мм. Микроорганизмы *Microbacterium* sp. и *Microbacterium esteraromaticum*, выделенные из слоя известкового сланца, показали толерантность к As^{3+} при концентрациях 8 Мм и 12 Мм соответственно. Другие бактерии, а именно *A. pokkali*, *Lysinibacillus fusiformis* и *Lysinibacillus* sp., продемонстрировали устойчивость к As^{3+} в концентрации 5 Мм.

Аналогичное исследование было проведено V. Gandhi и др. [107]. Был изучен район угольной шахты в Бокаро, Индия, из образца почвы которой выделено 8 бактериальных изолятов (НК-1–НК-8). Секвенирование гена 16S рРНК помогло идентифицировать выделенные микроорганизмы. В результате изолят НК-1 идентифицирован как *Enterobacter ludwigii*, НК-2 – как *Klebsiella pneumonia*, НК-3 и НК-4 – как *E. ludwigii*, НК-5 – как *Klebsiella oxytoca*, НК-6 и НК-8 – как *E. cloacae*, НК-7 – как *Acinetobacter gyllenbergii*. Изучение устойчивости идентифицированных штаммов к ионам тяжелых металлов показало, что они проявляли резистентность к 3 Мм Cd^{2+} , 4 Мм Pb^{2+} , 5 Мм Fe^{2+} , 80 МММ Mn^{2+} и 2 Мм Cu^{2+} .

Исследование N. Upadhyay и др. направлено на изучение качества почвы вблизи шахты Какари в Сонбхадре [108]. 2 изолята NU25 и NU37 были идентифицированы как *Acinetobacter* sp. и *Pseudomonas* sp. соответственно и определены

как перспективные штаммы для биоремедиации. Основанием этому послужили исследования, в результате которых было установлено, что изолят NU25 показал наибольшее продуцирование регулятора роста (77 мкг/мл), а изолят NU36 показал наибольший индекс солубилизации фосфатов (13 мм прозрачной зоны вокруг роста бактериальной культуры). Также установлено, что изоляты NU36, NU25 и NU27 продуцируют сидерофор, выработка которого увеличивалась в течение 4–5 дней инкубационного периода. Эти результаты свидетельствуют о том, что изоляты NU25 и NU36 способны стимулировать рост растений в загрязненных участках почвы.

Проводилось изучение устойчивости выделенных изолятов к тяжелым металлам, а именно Cd^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} . Выяснено, что штаммы NU25, NU27, NU36 и NU44 проявляют устойчивость к 10 Мм Cd^{2+} , 5 Мм Pb^{2+} и 8 Мм Zn^{2+} . На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что изоляты NU25 и NU36, идентифицированные как *Acinetobacter* sp. и *Pseudomonas* sp. соответственно, являются наиболее перспективными объектами биоремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами.

Известны исследования, в которых изучалось влияние почвенного микробиома на ПАУ. Согласно исследованию Р. Mandree и др. консорциум штаммов *B. cereus* и *Bacillus subtilis* доказал свою эффективность в биодеградации ПАУ и промежуточных продуктов. Кроме того, данный консорциум показал улучшенное удаление афталина, фенантрена и пирена, по сравнению с не усиленной природной системой, на 10,71, 53,04 и 41,19 % соответственно [109].

Исследование А. Medić и др., направленное на изучение биодеградации ПАУ штаммом *Pseudomonas aeruginosa*, показало, что данный микроорганизм эффективен при деградации n-алканов, ПАУ и их сложной смеси в углеводородных фракциях сырой нефти в течение семи дней [110].

В результате исследования I. Jerin и др. выяснено, что *Enterobacter* sp. имеет потенциал в деградации дизельного топлива и других нефтяных масел [111].

Выводы

В результате антропогенного воздействия наносится большой урон окружающей среде, в частности почве. Установлено, что угольная промышленность, являющаяся одной из базовых отраслей экономики всего мира, является основным источником загрязнения почвы тяжелыми металлами. Это негативно влияет как на здоровье самой почвы, так и на организм человека, вызывая множество заболеваний.

Наиболее распространенным способом борьбы с загрязнением почвы является ремедиация. Однако физические и химические методы не обладают достаточной эффективностью. Поэтому

был разработан метод биоремедиации, который заключается в использовании микроорганизмов, разлагающих различные источники загрязнения почвы. Наибольший интерес представляют микроорганизмы, выделенные из загрязненных источников.

Микробиом почвы угольных отвалов доказал свою эффективность в биоремедиации участков, загрязненных тяжелыми металлами и полициклическими углеводородами. Консорциум штаммов *Bacillus cereus* и *Bacillus subtilis* доказал свою эффективность в биodeградации ПАУ и промежуточных продуктов. Штамм *Pseudomonas aeruginosa* эффективен при деградации n-алканов. Микроорганизмы *Enterobacter ludwigii*, *Klebsiella pneumoniae*, *Klebsiella oxytoca*, *Enterobacter cloacae* и *Acinetobacter gyllenbergii* проявляли устойчивость к таким загрязнителям, как медь, железо, марганец, свинец и медь. *Arthrobacter*, *Pseudoarthrobacter* и *Sinomonas* проявляли толерантность к никелю. Микроорганизмы *Arthrobacter pokkali*, *Lysinibacillus fusiformis* и *Microbacterium esteraromaticum* показали

толерантность к мышьяку. Бактерии рода *Bacillus* показали устойчивость к меди. *Bacillus albus*, *B. cereus*, *Exiguobacterium sibiricum* и *Pseudomonas stutzeri* обладали толерантностью к хрому.

Критерии авторства

Авторы были в равной степени вовлечены в написание рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The authors were equally involved in the writing of the manuscript and are equally responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Teng Y., Chen W. Soil microbiomes – a promising strategy for contaminated soil remediation: a review // *Pedosphere*. 2019. Vol. 29. № 3. P. 283–297. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60061-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60061-X).
2. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review / K. N. Palansooriya [et al.] // *Environment International*. 2020. Vol. 134. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105046>.
3. Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the Central Elbe River, Germany / J. Rinklebe [et al.] // *Environment International*. 2019. Vol. 126. P. 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.011>.
4. Environmental consequences and the role of illegal waste dumps and their impact on land degradation / M. D. Vaverková [et al.] // *Land Use Policy*. 2019. Vol. 89. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104234>.
5. Анализ экологических проблем в угледобывающих регионах / О. М. Зиновьева [и др.] // *Уголь*. 2020. Т. 1135. № 10. С. 62–67. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-10-62-67>.
6. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment? – A review / V. Antoniadis [et al.] // *Environment International*. 2019. Vol. 127. P. 819–847. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.039>.
7. Human health risk visualization of potentially toxic elements in farmland soil: A combined method of source and probability / F. Kong [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111922>.
8. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology / G. Qin [et al.] // *Chemosphere*. 2020. Vol. 267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205>.
9. Soil and maize contamination by trace elements and associated health risk assessment in the industrial area of Volos, Greece / V. Antoniadis [et al.] // *Environment International*. 2019. Vol. 124. P. 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.053>.
10. Biogeochemistry of trace elements in the environment – Editorial to the special issue / J. Rinklebe [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 186. P. 127–130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.046>.
11. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health / R. Khanam [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134330>.
12. Characteristic and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils: a review / C. Wang [et al.] // *Pedosphere*. 2017. Vol. 27. № 1. P. 17–26. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60293-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60293-5).
13. Human health assessment of sixteen priority polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soils of northwestern Algeria / A. Halfadji [et al.] // *Journal of Health Pollution*. 2021. Vol. 11. № 31. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-11.31.210914>.

14. Estimation of toxicity equivalency and probabilistic health risk on lifetime daily intake of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban residential soils / B. Kumar [et al.] // Human and Ecological Risk Assessment. 2015. Vol. 21. № 2. P. 434–444. <https://doi.org/10.1080/10807039.2014.921530>.
15. Comparison of polyaromatic hydrocarbon residue concentrations in *Clarias gariepinus* smoked with traditional and mechanical kilns / O. Osineye [et al.] // Journal of Health and Pollution. 2020. Vol. 10. № 28. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.28.201215>.
16. Production of gellan gum, an exopolysaccharide, from biodiesel-derived waste glycerol by *Sphingomonas* spp. / K. Raghunandan [et al.] // 3Biotech. 2018. Vol. 8. № 1. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1096-3>.
17. Singh S., Gupta V. K. Biodegradation and bioremediation of pollutants: perspectives strategies and applications // International Journal of Pharmacology and Biological Sciences. 2016. Vol. 10. № 1. P. 53–65.
18. Spatial patterns of microbial diversity and activity in an aged creosote-contaminated site / S. Mukherjee [et al.] // ISME Journal. 2014. Vol. 8. № 10. P. 2131–2142. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.151>.
19. Evaluating the efficacy of bioremediating a diesel-contaminated soil using ecotoxicological and bacterial community indices / L. S. Khudur [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22. № 19. P. 14809–14819. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4624-2>.
20. Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions / J. Tang [et al.] // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2012. Vol. 149. P. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.020>.
21. The impact of lead co-contamination on ecotoxicity and the bacterial community during the bioremediation of total petroleum hydrocarbon-contaminated soils / L. S. Khudur [et al.] // Environmental Pollution. 2019. Vol. 253. P. 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.107>.
22. Microbial biodegradation of polyaromatic hydrocarbons / R.-H. Peng [et al.] // FEMS Microbiology Reviews. 2008. Vol. 32. № 6. P. 927–955. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00127.x>.
23. A review on remediation technologies for nickel-contaminated soil / X. Chen [et al.] // Human and Ecological Risk Assessment. 2019. Vol. 26. № 3. P. 571–585. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1539639>.
24. Ojuederie O. B., Babalola O. O. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 14. № 12. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121504>.
25. Yang Y., Li Y., Zhang J. Chemical speciation of cadmium and lead and their bioavailability to cole (*Brassica campestris* L.) from multi-metals contaminated soil in northwestern China // Chemical Speciation and Bioavailability. 2016. Vol. 28. № 1–4. P. 33–41. <https://doi.org/10.1080/09542299.2016.1157005>.
26. The inhibitory effect of cadmium and/or mercury on soil enzyme activity, basal respiration, and microbial community structure in coal mine-affected agricultural soil / L. Zheng [et al.] // Annals of Microbiology. 2019. Vol. 69. № 8. P. 849–859. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01478-3>.
27. The role of microorganisms in bioremediation – A review / E. Abatenh [et al.] // Open Journal of Environmental Biology. 2017. Vol. 2. № 1. P. 038–046. <https://doi.org/10.17352/OJEB.000007>.
28. Petroleum hydrocarbon contamination in terrestrial ecosystems – fate and microbial responses / A. Truskewycz [et al.] // Molecules. 2019. Vol. 24. № 18. <https://doi.org/10.3390/molecules24183400>.
29. Advances in microbial bioremediation and the factors influencing the process / J. Srivastava [et al.] // International Journal of Environmental Science and Technology. 2014. Vol. 11. № 6. P. 1787–1800. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0412-z>.
30. Biosorption of Cd(II) by live and dead cells of *Bacillus cereus* RC-1 isolated from cadmium-contaminated soil / F. Huang [et al.] // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2013. Vol. 107. P. 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.01.062>.
31. Abdel-Monem M. O., Al-Zubeiry A. H. S., Al-Gheethi A. A. S. Biosorption of nickel by *Pseudomonas cepacia* 120S and *Bacillus subtilis* 117S // Water Science and Technology. 2010. Vol. 61. № 12. P. 2994–3007. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.198>.
32. Bioaccumulation characterization of zinc and cadmium by *Streptomyces zinciresistens*, a novel actinomycete / Y. Lin [et al.] // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2012. Vol. 77. P. 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.09.016>.
33. Aryal M., Liakopoulou-Kyriakides M. Characterization of *Mycobacterium* sp. strain Spyr1 biomass and its biosorption behavior towards Cr(III) and Cr(VI) in single, binary and multi-ion aqueous systems // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2014. Vol. 89. № 4. P. 559–568. <https://doi.org/10.1002/jctb.4158>.
34. Polycyclic aromatic compounds (PAHs and oxygenated PAHs) and trace metals in fish species from Ghana (West Africa): Bioaccumulation and health risk assessment / B. A. M. Bandowe [et al.] // Environment International. 2014. Vol. 65. P. 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.12.018>.
35. Alkorta I., Epelde L., Garbisu C. Environmental parameters altered by climate change affect the activity of soil microorganisms involved in bioremediation // FEMS Microbiology Letters. 2017. Vol. 364. № 19. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx200>.

36. Removal of aqueous phenanthrene by brown seaweed *Sargassum hemiphyllum*: Sorption-kinetic and equilibrium studies / M. K. Chung [et al.] // Separation and Purification Technology. 2007. Vol. 54. № 3. P. 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.10.008>.
37. Sistla S. A., Schimel J. P. Seasonal patterns of microbial extracellular enzyme activities in an arctic tundra soil: Identifying direct and indirect effects of long-term summer warming // Soil Biology and Biochemistry. 2013. Vol. 66. P. 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.003>.
38. Effects of low-molecular-weight organic acids on Cu(II) adsorption onto hydroxyapatite nanoparticles / Y.-J. Wang [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 162. № 2–3. P. 1135–1140. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.001>.
39. Low-molecular-weight organic acids enhance the release of bound PAH residues in soils / Y. Gao [et al.] // Soil and Tillage Research. 2015. Vol. 145. P. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.008>.
40. Effects of re-vegetation type and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on soil enzyme activities and microbial biomass in coal mining subsidence areas of Northern China / L. Xiao [et al.] // Catena. 2019. Vol. 177. P. 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.019>.
41. Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliate orange grown under different P levels / Q.-S. Wu [et al.] // Mycorrhiza. 2014. Vol. 25. № 2. P. 121–130. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0594-3>.
42. Turan V. Arbuscular mycorrhizal fungi and pistachio husk biochar combination reduces Ni distribution in mungbean plant and improves plant antioxidants and soil enzymes // Physiologia Plantarum. 2021. Vol. 173. № 1. P. 418–429. <https://doi.org/10.1111/ppl.13490>.
43. Bacteria associated with a commercial mycorrhizal inoculum: Community composition and multifunctional activity as assessed by Illumina sequencing and culture-dependent tools / M. Agnolucci [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01956>.
44. Suppression of the activity of arbuscular mycorrhizal fungi by the soil microbiota / N. B. Svenningsen [et al.] // ISME Journal. 2018. Vol. 12. № 5. P. 1296–1307. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0059-3>.
45. Dzionek A., Wojcieszynska D., Guzik U. Natural carriers in bioremediation: A review // Electronic Journal of Biotechnology. 2016. Vol. 23. P. 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.07.003>.
46. Pimmata P., Reungsang A., Plangklang P. Comparative bioremediation of carbofuran contaminated soil by natural attenuation, bioaugmentation and biostimulation // International Biodeterioration and Biodegradation. 2013. Vol. 85. P. 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.07.009>.
47. Assessment of the efficiency of *in situ* bioremediation techniques in a creosote polluted soil: Change in bacterial community / R. Simarro [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2013. Vol. 262. P. 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.08.025>.
48. Plasmid-mediated bioaugmentation for the bioremediation of contaminated soils / C. Garbisu [et al.] // Frontiers in Microbiology. 2017. Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01966>.
49. Домрачева Л. И., Широких И. Г. Использование организмов и биосистем в ремедиации территорий // Биологический мониторинг природно-техногенных систем / под ред. Т. Я. Ашихминой, Н. М. Алапыкиной. Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2011. С. 160–176.
50. Ножевникова А. Н. Биоремедиация загрязненных почв и грунтов // Экология микроорганизмов / под ред. А. И. Нетрусова. М.: Академия, 2004. С. 196–199.
51. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents / M. J. Blaylock [et al.] // Environmental Science and Technology. 1997. Vol. 31. № 3. P. 860–865. <https://doi.org/10.1021/es960552a>.
52. Component analysis and heavy metal adsorption ability of extracellular polymeric substances (EPS) from sulfate reducing bacteria / Z.-B. Yue [et al.] // Bioresource Technology. 2015. Vol. 194. P. 399–402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.042>.
53. Anirudhan T. S., Jalajamony S., Sreekumari S. S. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by amine and carboxylate functionalised bentonites // Applied Clay Science. 2012. Vol. 65–66. P. 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.06.005>.
54. Microorganism remediation strategies towards heavy metals / K. Yin [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2019. Vol. 360. P. 1553–1563. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.226>.
55. Metabolic versatility of gram positive microbial isolates from contaminated river sediments / T. Narancic [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2012. Vol. 215–216. P. 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.059>.
56. Toxicity of zinc heterotrophic bacteria from a tropical river sediment / C. O. Nweke [et al.] // Applied Ecology and Environmental Research. 2007. Vol. 5. № 1. P. 123–132. https://doi.org/10.15666/aer/0501_123132.
57. Lăzăroaie M. M. Multiple response of gram positive and gram negative bacteria to mixture of hydrocarbons // Brazilian Journal of Microbiology. 2010. Vol. 41. № 3. P. 649–667. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000300016>.
58. Zahir Z., Seed K. D., Dennis T. J. Isolation and characterization of novel organic solvent tolerant bacteria // Extremophiles. 2006. Vol. 10. № 2. P. 129–138. <https://doi.org/10.1007/s00792-005-0483-y>.

59. Isolation of new toluene-tolerant marine strains of bacteria and characterization of their solvent-tolerance properties / A. Segura [et al.] // Journal of Applied Microbiology. 2008. Vol. 104. № 5. P. 1408–1416. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03666.x>.
60. Biosorption and bioaccumulation of copper and lead by heavy metal-resistant fungal isolates / S. Iram [et al.] // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015. Vol. 40. № 7. P. 1867–1873. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1702-1>.
61. Dhal B., Abhilash, Pandey B. D. Mechanism elucidation and adsorbent characterization for removal of Cr(VI) by native fungal adsorbent // Sustainable Environment Research. 2018. Vol. 28. № 6. P. 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.05.002>.
62. Ramrakhiani L., Majumder R., Khowala S. Removal of hexavalent chromium by heat inactivated fungal biomass of *Termitomyces clypeatus*: Surface characterization and mechanism of biosorption // Chemical Engineering Journal. 2011. Vol. 171. № 3. P. 1060–1068. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.002>.
63. Kang C.-H., Kwon Y.-J., So J.-S. Bioremediation of heavy metals by using bacterial mixtures // Ecological Engineering. 2016. Vol. 89. P. 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.023>.
64. Microbes as potential tool for remediation of heavy metals: A review / A. Gupta [et al.] // Journal of Microbial and Biochemical Technology. 2016. Vol. 8. № 4. P. 364–372. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000310>.
65. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes / R. Dixit [et al.] // Sustainability. 2015. Vol. 7. № 2. P. 2189–2212. <https://doi.org/10.3390/su7022189>.
66. Bioremediation of polluted waters using microorganisms / L. M. Coelho [et al.] // Advances in bioremediation of wastewater and polluted soil / editor N. Shiomi. IntechOpen, 2015. P. 1–22. <https://doi.org/10.5772/60770>.
67. Ayangbenro A. S., Babalola O. O. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 14. № 1. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
68. Fomina M., Gadd G. M. Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application // Bioresource Technology. 2014. Vol. 160. P. 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>.
69. Rapid determination of 16S ribosomal RNA sequences for phylogenetic analyses / D. L. Lane [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1985. Vol. 82. № 20. P. 6955–6959. <https://doi.org/10.1073/pnas.82.20.6955>.
70. Metagenome analysis reveals yet unexplored reductive dechlorinating potential of *Dehalobacter* sp. E1 growing in co-culture with *Sedimentibacter* sp. / F. Maphosa [et al.] // Environmental Microbiology Reports. 2012. Vol. 4. № 6. P. 604–616. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2012.00376.x>.
71. Glenn T. C. Field guide to next-generation DNA sequencers // Molecular Ecology Resources. 2011. Vol. 11. № 5. P. 759–769. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2011.03024.x>.
72. Techtmann S. M., Hazen T. C. Metagenomic applications in environmental monitoring and bioremediation // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2016. Vol. 43. № 10. P. 1345–1354. <https://doi.org/10.1007/s10295-016-1809-8>.
73. Delmont T. O., Simonet P., Vogel T. M. Describing microbial communities and performing global comparisons in the 'omic era // ISME Journal. 2012. Vol. 6. № 9. P. 1625–1628. <https://doi.org/10.1038/ismej.2012.55>.
74. Microbial exopolysaccharides: Main examples of synthesis, excretion, genetics and extraction / F. Donot [et al.] // Carbohydrate Polymers. 2012. Vol. 87. № 2. P. 951–962. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.083>.
75. Экологические ущербы территорий образования и накопления горнопромышленных отходов / В. Б. Болтыров [и др.] // Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Пермь, 2019. С. 151–156.
76. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City / S. Liu [et al.] // Huanjing Kexue/Environmental Science. 2016. Vol. 37. № 1. P. 270–279. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.2016.01.035>.
77. Акулова А. С. Рекультивация как условие восстановления земель, нарушенных угольной промышленностью // Наука в современном информационном обществе: Материалы XII международной научно-практической конференции. Норт-Чарлстон, 2017. С. 29–34.
78. Трегубов Е. А. Анализ воздействия на окружающую среду предприятий по добыче угля // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции молодых исследователей (с международным участием). Волгоград, 2018. С. 238–240.
79. Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social-ecological systems in Arctic and boreal regions: A systematic map protocol / N. R. Haddaway [et al.] // Environmental Evidence. 2019. Vol. 8. № 1. <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0152-8>.
80. Restoration of rare earth mine areas: organic amendments and phytoremediation / L. Zhou [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22. № 21. P. 17151–17160. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4875-y>.
81. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review / A. Mahar [et al.] // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016. Vol. 126. P. 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>.

82. Mitchell C. J. A., O'Neill K. The Sherriff Creek Wildlife Sanctuary: Further evidence of mine-site repurposing and economic transition in northern Ontario // *Extractive Industries and Society*. 2017. Vol. 4. № 1. P. 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2016.11.007>.
83. Effects of underground mining on vegetation and environmental patterns in a semi-arid watershed with implications for resilience management / Y. Yang [et al.] // *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77. № 17. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7796-5>.
84. Human health risk assessment of mercury vapor around the artisanal small-scale gold mining area, Palu city, Central Sulawesi, Indonesia / K. Nakazawa [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Vol. 124. P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.042>.
85. Progresses in restoration of post-mining landscape in Africa / S. E. Festin [et al.] // *Journal of Forestry Research*. 2018. Vol. 30. № 2. P. 381–396. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0621-x>.
86. The effects of tree species and substrate on carbon sequestration and chemical and biological properties in reforested post-mining soils / A. Jozefowska [et al.] // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.008>.
87. Hatcher P. G., Clifford D. J. The organic geochemistry of coal: from plant material to coal // *Organic Geochemistry*. 1997. Vol. 27. № 5–6. P. 251–274. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00051-X).
88. Distribution of trace elements in feed coal and combustion residues from two coal-fired power plants at Huainan, Anhui, China / Q. Tang [et al.] // *Fuel*. 2013. Vol. 107. P. 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.009>.
89. Long-term stacking coal promoted soil bacterial richness associated with increased soil organic matter in coal yards of power plants / C. Shen [et al.] // *Journal of Soils and Sediments*. 2019. Vol. 19. № 10. P. 3442–3452. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02307-5>.
90. Impacts of coal mining on the aboveground vegetation and soil quality: a case study of Qinxin coal mine in Shanxi province, China / G. Donggan [et al.] // *Clean – Soil, Air, Water*. 2011. Vol. 39. № 3. P. 219–225. <https://doi.org/10.1002/clen.201000236>.
91. Coal mining practices reduce the microbial biomass, richness and diversity of soil / P. D. de Quadros [et al.] // *Applied Soil Ecology*. 2018. Vol. 98. P. 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.016>.
92. Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China / X. Liu [et al.] // *Ecological Engineering*. 2017. Vol. 98. P. 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.078>.
93. Structural and functional differentiation of bacterial communities in post-coal mining reclamation soils of South Africa: bioindicators of soil ecosystem restoration / O. T. Ezeokoli [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58576-5>.
94. Stability and dynamics of enzyme activity patterns in the rice rhizosphere: Effects of plant growth and temperature / T. Ge [et al.] // *Soil Biology and Biochemistry*. 2017. Vol. 113. P. 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.005>.
95. Nitrous oxide flux, ammonia oxidizer and denitrifier abundance and activity across three different landfill cover soils in Ningbo, China / X.-E. Long [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 170. P. 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.173>.
96. Nitrification and nitrifiers in acidic soils / Y. Li [et al.] // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 116. P. 290–301. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.023>.
97. Enhancement of anaerobic acidogenesis by integrating an electrochemical system into an acidogenic reactor: Effect of hydraulic retention times (HRT) and role of bacteria and acidophilic methanogenic *Archaea* / J. Zhang [et al.] // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 179. P. 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.102>.
98. Bioaugmentation of anaerobic sludge digestion with iron-reducing bacteria: process and microbial responses to variations in hydraulic retention time / G. Baek [et al.] // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 100. № 2. P. 927–937. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7018-y>.
99. *Bacillus amyloliquefaciens* confers tolerance to various abiotic stresses and modulates plant response to phytohormones through osmoprotection and gene expression regulation in rice / S. Tiwari [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01510>.
100. Dominance of sulfur-fueled iron oxide reduction in low-sulfate freshwater sediments / C. M. Hansel [et al.] // *ISME Journal*. 2015. Vol. 9. № 11. P. 2400–2412. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.50>.
101. Members of *Microvirga* and *Bradyrhizobium* genera are native endosymbiotic bacteria nodulating *Lupinus luteus* in Northern Tunisian soils / A. Msaddak [et al.] // *FEMS Microbiology Ecology*. 2017. Vol. 93. № 6. <https://doi.org/10.1093/femsec/fix068>.
102. Sphingomonas: from diversity and genomics to functional role in environmental remediation and plant growth / S. Asaf [et al.] // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2020. Vol. 40. № 2. P. 138–152. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1709793>.
103. Isolation and biochemical characterization of heavy-metal resistant bacteria from tannery effluent in Chittagong city, Bangladesh: Bioremediation viewpoint / L. W. Marzan [et al.] // *Egyptian Journal of Aquatic Research*. 2017. Vol. 43. № 1. P. 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2016.11.002>.

104. Toxicity and bioremediation of heavy metals contaminated ecosystem from tannery wastewater: A review / B. E. Igiri [et al.] // Journal of Toxicology. 2018. Vol. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2568038>.
105. Singh K. N., Narzary D. Heavy metal tolerance of bacterial isolates associated with overburden strata of an opencast coal mine of Assam (India) // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. № 44. P. 63111–63126. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15153-1>.
106. Weil R. R., Brady N. C. The soils around us // The nature and properties of soils / editors R. R. Weil, N. C. Brady. Boston: Pearson, 2017. P. 19–50.
107. Isolation and molecular characterization of bacteria to heavy metals isolated from soil samples in Bokaro Coal Mines, India / V. Gandhi [et al.] // Pollution. 2015. Vol. 1. № 3. P. 287–295.
108. Soil ecophysiological and microbiological indices of soil health: a study of coal mining site in Sonbhadra, Uttar Pradesh / N. Upadhyay [et al.] // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2016. Vol. 16. № 3. P. 778–800. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000056>.
109. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons from industry contaminated soil using indigenous *Bacillus* spp. / P. Mandree [et al.] // Processes. 2021. Vol. 9. № 9. <https://doi.org/10.3390/pr9091606>.
110. Efficient biodegradation of petroleum *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons by polyextremophilic *Pseudomonas aeruginosa* strain with multidegradative capacity / A. Medic [et al.] // RSC Advances. 2020. Vol. 10. № 24. P. 14060–14070. <https://doi.org/10.1039/C9RA10371F>.
111. Diesel degradation efficiency of *Enterobacter* sp., *Acinetobacter* sp., and *Cedecea* sp. isolated from petroleum waste dumping site: a bioremediation view point / I. Jerin [et al.] // Archives of Microbiology. 2021. Vol. 203. № 8. P. 5075–5084. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02469-2>.

References

1. Teng Y, Chen W. Soil microbiomes – a promising strategy for contaminated soil remediation: a review. *Pedosphere*. 2019;29(3):283–297. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60061-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60061-X).
2. Palansooriya KN, Shaheen SM, Chen SS, Tsang DCW, Hashimoto Y, Hou D, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environment International*. 2020;134. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105046>.
3. Rinklebe J, Antoniadis V, Shaheen SM, Rosche O, Altermann M. Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the Central Elbe River, Germany. *Environment International*. 2019;126:76–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.011>.
4. Vavrková MD, Maxianová A, Winkler J, Adamcová D, Podlasek A. Environmental consequences and the role of illegal waste dumps and their impact on land degradation. *Land Use Policy*. 2019;89. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104234>.
5. Zinovieva OM, Kolesnikova LA, Merkulova AM, Smirnova NA. Environmental analysis in coal mining regions. *Ugol*. 2020;1135(10):62–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-10-62-67>.
6. Antoniadis V, Shaheen SM, Levizou E, Shahid M, Niazi NK, Vithanage M, et al. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment? – A review. *Environment International*. 2019;127:819–847. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.039>.
7. Kong F, Chen Y, Huang L, Yang Z, Zhu K. Human health risk visualization of potentially toxic elements in farmland soil: A combined method of source and probability. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111922>.
8. Qin G, Niu Z, Yu J, Li Z, Ma J, Xiang P. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. *Chemosphere*. 2020;267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205>.
9. Antoniadis V, Golia EE, Liu Y-T, Wang S-L, Shaheen SM, Rinklebe J. Soil and maize contamination by trace elements and associated health risk assessment in the industrial area of Volos, Greece. *Environment International*. 2019;124:79–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.053>.
10. Rinklebe J, Kumpiene J, Du Laing G, Ok Y-S. Biogeochemistry of trace elements in the environment – Editorial to the special issue. *Journal of Environmental Management*. 2017;186:127–130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.046>.
11. Khanam R, Kumar A, Nayak AK, Shahid M, Tripathi R, Vijayakumar S, et al. Metal(loid)s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health. *Science of the Total Environment*. 2020;699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134330>.
12. Wang C, Wu S, Zhou S, Shi Y, Song J. Characteristic and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils: a review. *Pedosphere*. 2017;27(1):17–26. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60293-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60293-5).
13. Halfadji A, Naous M, Bettiche F, Touabet A. Human health assessment of sixteen priority polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soils of northwestern Algeria. *Journal of Health Pollution*. 2021;11(31). <https://doi.org/10.5696/2156-9614-11.31.210914>.

14. Kumar B, Verma VK, Sharma CS, Akolkar AB. Estimation of toxicity equivalency and probabilistic health risk on lifetime daily intake of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban residential soils. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2015;21(2):434–444. <https://doi.org/10.1080/10807039.2014.921530>.
15. Osineye O, Abiodun-Solanke AJ, Mangai E, Okeke E, Jahnezim B. Comparison of polyaromatic hydrocarbon residue concentrations in *Clarias gariepinus* smoked with traditional and mechanical kilns. *Journal of Health and Pollution*. 2020;10(28). <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.28.201215>.
16. Raghunandan K, Kumar A, Kumar S, Permaul K, Singh S. Production of gellan gum, an exopolysaccharide, from biodiesel-derived waste glycerol by *Sphingomonas* spp. *3Biotech*. 2018;8(1). <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1096-3>.
17. Singh S, Gupta VK. Biodegradation and bioremediation of pollutants: perspectives strategies and applications. *International Journal of Pharmacology and Biological Sciences*. 2016;10(1):53–65.
18. Mukherjee S, Juottonen H, Siivonen P, Lloret Quesada C, Tuomi P, Pulkkinen P, et al. Spatial patterns of microbial diversity and activity in an aged creosote-contaminated site. *ISME Journal*. 2014;8(10):2131–2142. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.151>.
19. Khudur LS, Shahsavari E, Miranda AF, Morrison PD, Nugagoda D, Ball AS. Evaluating the efficacy of bioremediating a diesel-contaminated soil using ecotoxicological and bacterial community indices. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015;22(19):14809–14819. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4624-2>.
20. Tang J, Lu X, Sun Q, Zhu W. Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2012;149:109–117. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.020>.
21. Khudur LS, Shahsavari E, Webster GT, Nugagoda D, Ball AS. The impact of lead co-contamination on ecotoxicity and the bacterial community during the bioremediation of total petroleum hydrocarbon-contaminated soils. *Environmental Pollution*. 2019;253:939–948. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.107>.
22. Peng R-H, Xiong A-S, Xue Y, Fu X-Y, Gao F, Zhao W, et al. Microbial biodegradation of polyaromatic hydrocarbons. *FEMS Microbiology Reviews*. 2008;32(6):927–955. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00127.x>.
23. Chen X, Kumari D, Cao CJ, Plaza G, Achal V. A review on remediation technologies for nickel-contaminated soil. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2019;26(3):571–585. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1539639>.
24. Ojuederie OB, Babalola OO. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph14121504>.
25. Yang Y, Li Y, Zhang J. Chemical speciation of cadmium and lead and their bioavailability to cole (*Brassica campestris* L.) from multi-metals contaminated soil in northwestern China. *Chemical Speciation and Bioavailability*. 2016;28(1–4):33–41. <https://doi.org/10.1080/09542299.2016.1157005>.
26. Zheng L, Li Y, Shang W, Dong X, Tang Q, Cheng H. The inhibitory effect of cadmium and/or mercury on soil enzyme activity, basal respiration, and microbial community structure in coal mine-affected agricultural soil. *Annals of Microbiology*. 2019;69(8):849–859. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-01478-3>.
27. Abatenh E, Gizaw B, Tsegaye Z, Wassie M. The role of microorganisms in bioremediation – A review. *Open Journal of Environmental Biology*. 2017;2(1):038–046. <https://doi.org/10.17352/OJEB.000007>.
28. Truskewycz A, Gundry TD, Khudur LS, Kolobaric A, Taha M, Aburto-Medina A, et al. Petroleum hydrocarbon contamination in terrestrial ecosystems – fate and microbial responses. *Molecules*. 2019;24(18). <https://doi.org/10.3390/molecules24183400>.
29. Srivastava J, Naraian R, Kalra SJS, Chandra H. Advances in microbial bioremediation and the factors influencing the process. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014;11(6):1787–1800. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0412-z>.
30. Huang F, Dang Z, Guo C-L, Lu G-N, Gu RR, Liu H-J, et al. Biosorption of Cd(II) by live and dead cells of *Bacillus cereus* RC-1 isolated from cadmium-contaminated soil. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2013;107:11–18. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.01.062>.
31. Abdel-Monem MO, Al-Zubeiry AHS, Al-Gheethi AAS. Biosorption of nickel by *Pseudomonas cepacia* 120S and *Bacillus subtilis* 117S. *Water Science and Technology*. 2010;61(12):2994–3007 <https://doi.org/10.2166/wst.2010.198>.
32. Lin Y, Wang X, Wang B, Mohamad O, Wei G. Bioaccumulation characterization of zinc and cadmium by *Streptomyces zinciresistens*, a novel actinomycete. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012;77:7–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.09.016>.
33. Aryal M, Liakopoulou-Kyriakides M. Characterization of *Mycobacterium* sp. strain Spyr1 biomass and its biosorption behavior towards Cr(III) and Cr(VI) in single, binary and multi-ion aqueous systems. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2014;89(4):559–568. <https://doi.org/10.1002/jctb.4158>.
34. Bandowe BAM, Bigalke M, Boamah L, Nyarko E, Saalia FK, Wilcke W. Polycyclic aromatic compounds (PAHs and oxygenated PAHs) and trace metals in fish species from Ghana (West Africa): Bioaccumulation and health risk assessment. *Environment International*. 2014;65:135–146. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.12.018>.
35. Alkorta I, Epelde L, Garbisu C. Environmental parameters altered by climate change affect the activity of soil microorganisms involved in bioremediation. *FEMS Microbiology Letters*. 2017;364(19). <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx200>.

36. Chung MK, Tsui MTK, Cheung KC, Tam NFY, Wong MH. Removal of aqueous phenanthrene by brown seaweed *Sargassum hemiphyllum*: Sorption-kinetic and equilibrium studies. Separation and Purification Technology. 2007;54(3):355–362. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.10.008>.
37. Sistla SA, Schimel JP. Seasonal patterns of microbial extracellular enzyme activities in an arctic tundra soil: Identifying direct and indirect effects of long-term summer warming. Soil Biology and Biochemistry. 2013;66:119–129. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.003>.
38. Wang Y-J, Chen J-H, Cui Y-X, Wang S-Q, Zhou D-M. Effects of low-molecular-weight organic acids on Cu(II) adsorption onto hydroxyapatite nanoparticles. Journal of Hazardous Materials. 2009;162(2–3):1135–1140. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.001>.
39. Gao Y, Yuan X, Lin X, Sun B, Zhao Z. Low-molecular-weight organic acids enhance the release of bound PAH residues in soils. Soil and Tillage Research. 2015;145:103–110. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.008>.
40. Xiao L, Bi Y, Du S, Wang Y, Guo C. Effects of re-vegetation type and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on soil enzyme activities and microbial biomass in coal mining subsidence areas of Northern China. Catena. 2019;177:202–209. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.019>.
41. Wu Q-S, Li Y, Zou Y-N, He X-H. Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliate orange grown under different P levels. Mycorrhiza. 2014;25(2):121–130. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0594-3>.
42. Turan V. Arbuscular mycorrhizal fungi and pistachio husk biochar combination reduces Ni distribution in mungbean plant and improves plant antioxidants and soil enzymes. Physiologia Plantarum. 2021;173(1):418–429. <https://doi.org/10.1111/ppl.13490>.
43. Agnolucci M, Avio L, Pepe A, Turrini A, Cristani C, Bonini P, et al. Bacteria associated with a commercial mycorrhizal inoculum: Community composition and multifunctional activity as assessed by Illumina sequencing and culture-dependent tools. Frontiers in Plant Science. 2019;9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01956>.
44. Svenningsen NB, Watts-Williams SJ, Joner EJ, Battini F, Efthymiou A, Cruz-Paredes C, et al. Suppression of the activity of arbuscular mycorrhizal fungi by the soil microbiota. ISME Journal. 2018;12(5):1296–1307. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0059-3>.
45. Dzionek A, Wojcieszynska D, Guzik U. Natural carriers in bioremediation: A review. Electronic Journal of Biotechnology. 2016;23:28–36. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.07.003>.
46. Pimmata P, Reungsang A, Plangklang P. Comparative bioremediation of carbofuran contaminated soil by natural attenuation, bioaugmentation and biostimulation. International Biodeterioration and Biodegradation. 2013;85:196–204. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.07.009>.
47. Simarro R, González N, Bautista LF, Molina MC. Assessment of the efficiency of *in situ* bioremediation techniques in a creosote polluted soil: Change in bacterial community. Journal of Hazardous Materials. 2013;262:158–167. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.08.025>.
48. Garbisu C, Garaiurrebaso O, Epelde L, Grohmann E, Alkorta I. Plasmid-mediated bioaugmentation for the bioremediation of contaminated soils. Frontiers in Microbiology. 2017;8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01966>.
49. Domracheva LI, Shirokikh IG. Ispol'zovanie organizmov i biosistem v remediatsii territorii [Organisms and biosystems in land reclamation]. In: Ashikhmina TYa, Alalykina NM, editors. Biologicheskii monitoring prirodno-tekhnogennykh sistem [Biological monitoring of natural-technogenic systems]. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the RAS; 2011. pp. 160–176. (In Russ.).
50. Nozhevnikova AN. Bioremediatsiya zagryaznennykh pochv i gruntov [Bioremediation of contaminated soils and grounds]. In: Netrusov AI, editor. Ehkologiya mikroorganizmov [Ecology of microorganisms]. Moscow: Akademiya; 2004. pp. 196–199. (In Russ.).
51. Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, et al. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. Environmental Science and Technology. 1997;31(3):860–865. <https://doi.org/10.1021/es960552a>.
52. Yue Z-B, Li Q, Li C-C, Chen T-H, Wang J. Component analysis and heavy metal adsorption ability of extracellular polymeric substances (EPS) from sulfate reducing bacteria. Bioresource Technology. 2015;194:399–402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.042>.
53. Anirudhan TS, Jalajamony S, Sreekumari SS. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by amine and carboxylate functionalised bentonites. Applied Clay Science. 2012;65–66:67–71. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.06.005>.
54. Yin K, Wang Q, Lv M, Chen L. Microorganism remediation strategies towards heavy metals. Chemical Engineering Journal. 2019;360:1553–1563. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.226>.
55. Narancic T, Djokic L, Kenny ST, O'Connor KE, Radulovic V, Nikodinovic-Runic J, et al. Metabolic versatility of gram positive microbial isolates from contaminated river sediments. Journal of Hazardous Materials. 2012;215–216:243–251. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.059>.
56. Nweke CO, Alisi CS, Okolo JC, Nwanyanwu CE. Toxicity of zinc heterotrophic bacteria from a tropical river sediment. Applied Ecology and Environmental Research. 2007;5(1):123–132. https://doi.org/10.15666/aer/0501_123132.

57. Lăzăroaie MM. Multiple response of gram positive and gram negative bacteria to mixture of hydrocarbons. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2010;41(3):649–667. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000300016>.
58. Zahir Z, Seed KD, Dennis TJ. Isolation and characterization of novel organic solvent tolerant bacteria. *Extremophiles*. 2006;10(2):129–138. <https://doi.org/10.1007/s00792-005-0483-y>.
59. Segura A, Hurtado A, Rivera B, Lazaroaie MM. Isolation of new toluene-tolerant marine strains of bacteria and characterization of their solvent-tolerance properties. *Journal of Applied Microbiology*. 2008;104(5):1408–1416. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03666.x>.
60. Iram S, Shabbir R, Zafar H, Javaid M. Biosorption and bioaccumulation of copper and lead by heavy metal-resistant fungal isolates. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015;40(7):1867–1873. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1702-1>.
61. Dhal B, Abhilash, Pandey BD. Mechanism elucidation and adsorbent characterization for removal of Cr(VI) by native fungal adsorbent. *Sustainable Environment Research*. 2018;28(6):289–297. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.05.002>.
62. Ramrakhiani L, Majumder R, Khowala S. Removal of hexavalent chromium by heat inactivated fungal biomass of *Termitomyces clypeatus*: Surface characterization and mechanism of biosorption. *Chemical Engineering Journal*. 2011;171(3):1060–1068. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.002>.
63. Kang C-H, Kwon Y-J, So J-S. Bioremediation of heavy metals by using bacterial mixtures. *Ecological Engineering*. 2016;89:64–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.023>.
64. Gupta A, Joia J, Sood A, Sood R, Sidhu C, Kaur G. Microbes as potential tool for remediation of heavy metals: A review. *Journal of Microbial and Biochemical Technology*. 2016;8(4):364–372. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000310>.
65. Dixit R, Wasiullah, Malaviya D, Pandiyan K, Singh UB, Sahu A, et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*. 2015;7(2):2189–2212. <https://doi.org/10.3390/su7022189>.
66. Coelho LM, Rezende HC, Coelho LM, de Sousa PAR, Melo DFO, Coelho NMM. Bioremediation of polluted waters using microorganisms. In: Shiomi N, editor. *Advances in bioremediation of wastewater and polluted soil*. IntechOpen; 2015. pp. 1–22. <https://doi.org/10.5772/60770>.
67. Ayangbenro AS, Babalola OO. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
68. Fomina M, Gadd GM. Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*. 2014;160:3–14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102>.
69. Lane DL, Pace B, Olsen GJ, Stahl DA, Sogin ML, Pace NR. Rapid determination of 16S ribosomal RNA sequences for phylogenetic analyses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1985;82(20):6955–6959. <https://doi.org/10.1073/pnas.82.20.6955>.
70. Maphosa F, Van Passel MWJ, De Vos WM, Smidt H. Metagenome analysis reveals yet unexplored reductive dechlorinating potential of *Dehalobacter* sp. E1 growing in co-culture with *Sedimentibacter* sp. *Environmental Microbiology Reports*. 2012;4(6):604–616. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2012.00376.x>.
71. Glenn TC. Field guide to next-generation DNA sequencers. *Molecular Ecology Resources*. 2011;11(5):759–769. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2011.03024.x>.
72. Techtmann SM, Hazen TC. Metagenomic applications in environmental monitoring and bioremediation. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2016;43(10):1345–1354. <https://doi.org/10.1007/s10295-016-1809-8>.
73. Delmont TO, Simonet P, Vogel TM. Describing microbial communities and performing global comparisons in the ‘omic era. *ISME Journal*. 2012;6(9):1625–1628. <https://doi.org/10.1038/ismej.2012.55>.
74. Donot F, Fontana A, Baccou JC, Schorr-Galindo S. Microbial exopolysaccharides: Main examples of synthesis, excretion, genetics and extraction. *Carbohydrate Polymers*. 2012;87(2):951–962. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.083>.
75. Boltyrov VB, Degtyarev SA, Seleznev SG, Storozhenko LA. *Ehkologicheskie ushcherby territoriy obrazovaniya i nakopleniya gornopromyshlennykh otkhodov* [Ecological damage to the territories subjected to mining waste]. *Sergeevskie chteniya: Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii* [Sergeev Readings: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the RAS on the problems of geoecology, engineering geology, and hydrogeology]; 2019; Perm'. Perm': Perm State University; 2019. p. 151–156. (In Russ.).
76. Liu S, Wu Q-Y, Cao X-J, Wang J-N, Zhang L-L, Cai D-Q, et al. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City. *Huanjing Kexue/Environmental Science*. 2016;37(1):270–279. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.2016.01.035>.
77. Akulova S. *Rekul'tivatsiya kak uslovie vosstanovleniya zemel', narushennykh ugol'noy promyshlennost'yu* [Reclamation as a condition for reclamation of mining lands]. *Nauka v sovremennom informatsionnom obshchestve: Materialy XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science in the Modern Information Society: Proceedings of the XII international scientific and practical conference]; 2017; North Charleston. North Charleston: CreateSpace; 2017. p. 29–34. (In Russ.).
78. Tregubov EA. *Analiz vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu predpriyatiy po dobyche uglya* [Analysis of the environmental impact of coal mining enterprises]. *Aktual'nye problemy stroitel'stva, ZHKKH i tekhnosfernoy bezopasnosti*:

Materialy V Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh issledovateley (s mezhdunarodnym uchastiem) [Relevant Issues of Construction, Housing, Communal Services, and Technosphere Safety: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Researchers (with international participation)]; 2018; Volgograd. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2018. p. 238–240. (In Russ.).

79. Haddaway NR, Cooke SJ, Lesser P, Macura B, Nilsson AE, Taylor JJ, et al. Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social-ecological systems in Arctic and boreal regions: A systematic map protocol. *Environmental Evidence*. 2019;8(1). <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0152-8>.

80. Zhou L, Li Z, Liu W, Liu S, Zhang L, Zhong L, et al. Restoration of rare earth mine areas: organic amendments and phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015;22(21):17151–17160. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4875-y>.

81. Mahar A, Wang P, Ali A, Awasthi MK, Lahori AH, Wang Q, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016;126:111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>.

82. Mitchell CJA, O'Neill K. The Sherriff Creek Wildlife Sanctuary: Further evidence of mine-site repurposing and economic transition in northern Ontario. *Extractive Industries and Society*. 2017;4(1):24–35. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2016.11.007>.

83. Yang Y, Erskine PD, Zhang S, Wang Y, Bian Z, Lei S. Effects of underground mining on vegetation and environmental patterns in a semi-arid watershed with implications for resilience management. *Environmental Earth Sciences*. 2018;77(17). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7796-5>.

84. Nakazawa K, Nagafuchi O, Kawakami T, Inoue T, Yokota K, Serikawa Y, et al. Human health risk assessment of mercury vapor around the artisanal small-scale gold mining area, Palu city, Central Sulawesi, Indonesia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016;124:155–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.042>.

85. Festin SE, Tigabu M, Chileshe MN, Syampungani S, Odén PC. Progresses in restoration of post-mining landscape in Africa. *Journal of Forestry Research*. 2018;30(2):381–396. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0621-x>.

86. Jozefowska A, Pietrzykowski M, Woś B, Cajthaml T, Frouz J. The effects of tree species and substrate on carbon sequestration and chemical and biological properties in reforested post-mining soils. *Geoderma*. 2017;292:9–16. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.008>.

87. Hatcher PG, Clifford DJ. The organic geochemistry of coal: from plant material to coal. *Organic Geochemistry*. 1997;27(5–6):251–274. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00051-X).

88. Tang Q, Liu G, Zhou C, Sun R. Distribution of trace elements in feed coal and combustion residues from two coal-fired power plants at Huainan, Anhui, China. *Fuel*. 2013;107:315–322. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.009>.

89. Shen C, Ma D, Sun R, Zhang B, Li D, Ge Y. Long-term stacking coal promoted soil bacterial richness associated with increased soil organic matter in coal yards of power plants. *Journal of Soils and Sediments*. 2019;19(10):3442–3452. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02307-5>.

90. Donggan G, Zhongke B, Tieliang S, Hongbo S, Wen Q. Impacts of coal mining on the aboveground vegetation and soil quality: a case study of Qinxin coal mine in Shanxi province, China. *Clean – Soil, Air, Water*. 2011;39(3):219–225. <https://doi.org/10.1002/clen.201000236>.

91. de Quadros PD, Zhalnina K, Davis-Richardson AG, Drew JC, Menezes FB, Camargo FAO, et al. Coal mining practices reduce the microbial biomass, richness and diversity of soil. *Applied Soil Ecology*. 2018;98:195–203. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.016>.

92. Liu X, Bai Z, Zhou W, Cao Y, Zhang G. Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*. 2017;98:228–239. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.078>.

93. Ezeokoli OT, Bezuidenhout CC, Maboeta MS, Khasa DP, Adeleke RA. Structural and functional differentiation of bacterial communities in post-coal mining reclamation soils of South Africa: bioindicators of soil ecosystem restoration. *Scientific Reports*. 2020;10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58576-5>.

94. Ge T, Wei X, Razavi BS, Zhu Z, Hu Y, Kuzyakov Y. Stability and dynamics of enzyme activity patterns in the rice rhizosphere: Effects of plant growth and temperature. *Soil Biology and Biochemistry*. 2017;113:108–115. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.005>.

95. Long X-E, Huang Y, Chi H, Li Y, Ahmad N, Yao H. Nitrous oxide flux, ammonia oxidizer and denitrifier abundance and activity across three different landfill cover soils in Ningbo, China. *Journal of Cleaner Production*. 2018;170:288–297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.173>.

96. Li Y, Chapman SJ, Nicol GW, Yao H. Nitrification and nitrifiers in acidic soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2018;116:290–301. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.023>.

97. Zhang J, Zhang Y, Quan X, Chen S. Enhancement of anaerobic acidogenesis by integrating an electrochemical system into an acidogenic reactor: Effect of hydraulic retention times (HRT) and role of bacteria and acidophilic methanogenic *Archaea*. *Bioresource Technology*. 2015;179:43–49. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.102>.

98. Baek G, Kim J, Shin SG, Lee C. Bioaugmentation of anaerobic sludge digestion with iron-reducing bacteria: process and microbial responses to variations in hydraulic retention time. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016;100(2):927–937. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7018-y>.
99. Tiwari S, Prasad V, Chauhan PS, Lata C. *Bacillus amyloliquefaciens* confers tolerance to various abiotic stresses and modulates plant response to phytohormones through osmoprotection and gene expression regulation in rice. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01510>.
100. Hansel CM, Lentini CJ, Tang Y, Johnston DT, Wankel SD, Jardine PM. Dominance of sulfur-fueled iron oxide reduction in low-sulfate freshwater sediments. *ISME Journal*. 2015;9(11):2400–2412. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.50>.
101. Msaddak A, Rejili M, Durán D, Rey L, Imperial J, Palacios JM, et al. Members of *Microvirga* and *Bradyrhizobium* genera are native endosymbiotic bacteria nodulating *Lupinus luteus* in Northern Tunisian soils. *FEMS Microbiology Ecology*. 2017;93(6). <https://doi.org/10.1093/femsec/fix068>.
102. Asaf S, Numan M, Khan AL, Al-Harrasi A. Sphingomonas: from diversity and genomics to functional role in environmental remediation and plant growth. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2020;40(2):138–152. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1709793>.
103. Marzan LW, Hossain M, Mina SA, Akter Y, Chowdhury AMMA. Isolation and biochemical characterization of heavy-metal resistant bacteria from tannery effluent in Chittagong city, Bangladesh: Bioremediation viewpoint. *Egyptian Journal of Aquatic Research*. 2017;43(1):65–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2016.11.002>.
104. Igiri BE, Okoduwa SIR, Idoko GO, Akabuogu EP, Adeyi AO, Ejiogu IK. Toxicity and bioremediation of heavy metals contaminated ecosystem from tannery wastewater: A review. *Journal of Toxicology*. 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2568038>.
105. Singh KN, Narzary D. Heavy metal tolerance of bacterial isolates associated with overburden strata of an opencast coal mine of Assam (India). *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(44):63111–63126. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15153-1>.
106. Weil RR, Brady NC. The soils around us. In: Weil RR, Brady NC, editors. *The nature and properties of soils*. Boston: Pearson; 2017. pp. 19–50.
107. Gandhi V, Priya A, Priya S, Daiya V, Kesari J, Prakash K, et al. Isolation and molecular characterization of bacteria to heavy metals isolated from soil samples in Bokaro Coal Mines, India. *Pollution*. 2015;1(3):287–295.
108. Upadhyay N, Verma S, Singh AP, Devi S, Vishwakarma K, Kumar N, et al. Soil ecophysiological and microbiological indices of soil health: a study of coal mining site in Sonbhadra, Uttar Pradesh. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2016;16(3):778–800. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000056>.
109. Mandree P, Masika W, Naicker J, Moonsamy G, Ramchuran S, Lalloo R. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons from industry contaminated soil using indigenous *Bacillus* spp. *Processes*. 2021;9(9). <https://doi.org/10.3390/pr9091606>.
110. Medic A, Lješević M, Inui H, Beškoski V, Kojić I, Stojanović K, et al. Efficient biodegradation of petroleum *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons by polyextremophilic *Pseudomonas aeruginosa* strain with multidegradative capacity. *RSC Advances*. 2020;10(24):14060–14070. <https://doi.org/10.1039/C9RA10371F>.
111. Jerin I, Rahi MS, Sultan T, Islam MS, Sajib SA, Hoque KMF, et al. Diesel degradation efficiency of *Enterobacter* sp., *Acinetobacter* sp., and *Cedecea* sp. isolated from petroleum waste dumping site: a bioremediation viewpoint. *Archives of Microbiology*. 2021;203(8):5075–5084. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02469-2>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-905-914>Оригинальная статья
<http://fptt.ru>

Разработка программного обеспечения процесса производства функциональных продуктов

Е. Ю. Титоренко¹, Н. Б. Трофимова¹, Е. О. Ермолаева^{1,*},
И. Е. Трофимов², А. И. Брескин³, И. В. Сурков⁴, Н. В. Астахова¹

¹ Кемеровский государственный университет , Кемерово, Россия² ООО «Калитеро», Москва, Россия³ ФАП Брескин А. И., Киев, Украина⁴ АО «УК «Кузбассразрезуголь», Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 08.09.2021

Принята после рецензирования: 15.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: eeo38191@mail.ru

© Е. Ю. Титоренко, Н. Б. Трофимова, Е. О. Ермолаева,
И. Е. Трофимов, А. И. Брескин, И. В. Сурков, Н. В. Астахова, 2021

Аннотация.

Введение. Для получения эффективного результата внедрения в производство современного метода анализа опасностей и рисков используются статистические методы обработки данных и IT-технологии, применение которых максимизирует возможности организации. Цель исследования – разработка программного обеспечения, которое обеспечивает информационные связи на производстве в части опасностей и рисков и разработку мероприятий по их минимизации.

Объекты и методы исследования. Производственное предприятие ООО «ЮГ» (г. Бийск), процесс производства функциональных продуктов, результаты исследования актуальных предложений готовых программных решений по проблеме автоматизации процессов. Применялись статистические методы, методы наблюдения, сбора первичной информации и последовательной нисходящей разработки алгоритмов, а также язык программирования Java.

Результаты и их обсуждение. На примере производственного предприятия ООО «ЮГ» изучен процесс регистрации и учета несоответствий и нарушений допустимых пределов, обнаруженных в критических контрольных точках. Разработано универсальное программное обеспечение, которое позволит операторам производственной линии вносить в систему данные о простоях и иных нарушениях процесса производства, а руководителям получать актуальные отчеты по различным критериям, на основании которых менеджер выявит нарушения и составит перечень корректирующих действий для устранения риска. Предложено готовое решение автоматизации процесса учета и анализа рисков и опасностей. В ходе апробации программы в условиях действующего производственного цеха изучены: динамика изменения затрат рабочего времени операторов и руководителей на регистрацию замечаний и несоответствий, анализ данных, разработка корректирующих и предупреждающих мероприятий и их выполнение.

Выводы. Использование программного обеспечения экономит рабочее время операторов и руководителей, а также позволит снизить затраты времени на учет и отчетность относительно нарушений производственных процессов.

Ключевые слова. Информационные технологии, программа, мониторинг, алгоритм, качество, безопасность, оператор, руководитель, обработка данных, визуализация данных, риск-менеджмент

Финансирование. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП КемГУ в рамках соглашения № 075-15-2021-694 от 05.08.2021, заключенного между Минобрнауки России и КемГУ (уникальный идентификатор контракта RF----2296.61321X0032).

Для цитирования: Разработка программного обеспечения процесса производства функциональных продуктов / Е. Ю. Титоренко [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 905–914. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-905-914>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Developing New Software for Functional Food Production

Elena Yu. Titorenko¹, Natalia B. Trofimova¹, Evgenia O. Ermolaeva^{1,*},
Ivan E. Trofimov², Leonid I. Breskin³, Igor V. Surkov⁴,
Natalia V. Astakhova¹

¹ Kemerovo State University , Kemerovo, Russia

² LLC Kalitero, Moscow, Russia

³ Sole Proprietor L.I. Breskin, Kiev, Ukraine

⁴ JSC UK “Kuzbassrazrezugol”, Kemerovo, Russia

Received: September 08, 2021

Accepted in revised form: November 15, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: eeo38191@mail.ru

© E.Yu. Titorenko, N.B. Trofimova, E.O. Ermolaeva,
I.E. Trofimov, L.I. Breskin, I.V. Surkov, N.V. Astakhova, 2021

Abstract.

Introduction. Statistical methods of data processing and IT technologies make it possible to introduce new modern methods of hazard and risk analysis in food industry. The research objective was to develop new software that would link together various risk-related production data.

Study objects and methods. The research featured food production company LLC Yug (Biysk, Russia) that specializes in functional products and various ready-made software automation solutions. The study also involved statistical methods, methods of observation, collection of primary information, sequential top-down development of algorithms, and the Java programming language.

Results and discussion. Food producers have a registration procedure for inconsistencies and violations of permissible limits at critical control points. The authors developed a new software program that allows production line operators to enter data on downtime and other violations of the production process. The program makes it possible for managers to receive up-to-date reports on various criteria, identify violations, and select appropriate corrective actions. This ready-made solution automates the process of accounting and hazard analysis. The program was tested at LLC Yug with the focus on the time that operators and managers needed to register the problem, analyze the data, develop corrective or preventive measures, and apply them.

Conclusion. The new software proved to be less time-consuming than standard procedures applied in food industry and made it possible to save the time that operators and managers spent on decision making and reporting.

Keywords. Information technology, program, monitoring, algorithm, quality, safety, operator, manager, data processing, data visualization, risk management

Funding. The research was conducted on the premises of the Research Equipment Sharing Center of KemSU, agreement No. 075-15-2021-694 dated August 5, 2021, between the Minobrnauka and KemSU (contract identifier RF----2296.61321X0032)..

For citation: Titorenko EYu, Trofimova NB, Ermolaeva EO, Trofimov IE, Breskin LI, Surkov IV, et al. Developing New Software for Functional Food Production. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):905–914. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-905-914>.

Введение

Сегодня компании в пищевой индустрии делают крупномасштабные инвестиции в технологическое и контрольно-измерительное оборудование, чтобы гарантировать высокое качество своей продукции. Несмотря на использование передовых технологий и процессов, загрязнение пищевых продуктов контаминантами все еще происходит [1, 2]. Следовательно, внедрение ISO 22000 имеет решающее значение для снижения опасностей в пищевой промышленности [2–8].

Все предприятия, производящие, обрабатывающие, транспортирующие или реализующие пищевую продукцию, в соответствии с требованиями ТР ТС 021/2011, обязаны внедрять систему критического контроля анализа рисков (НАССР). В данной системе потенциально опасные ситуации

определяются для каждого рабочего процесса и принимаются меры контроля для их предотвращения и минимизации [3].

Система управления безопасностью пищевых продуктов, анализ рисков и критические точки контроля (НАССР) являются эффективным способом снижения рисков в пищевой промышленности. НАССР продвигает систематический превентивный подход к повышению безопасности пищевых продуктов с учетом биологических, химических и физических опасностей, связанных с процессами их производства [4, 5].

Данные научных исследований по управлению безопасностью пищевой продукции подтвердили, что НАССР как инструмент управления не только гарантирует безопасность готовых пищевых продуктов, но и обеспечивает защиту как для потребителей, так и для компаний [4–6].

Меры предотвращения сбоев процессов играют важную роль в программе обеспечения безопасности пищевых продуктов на предприятии [8, 9]. В пункте 8.2 ISO 22000:2018 подчеркивается, что после анализа опасностей необходимо разработать и внедрить программу предварительных условий (PRP), т. к. Глобальная инициатива по безопасности пищевых продуктов (GFSI) не признает ISO 22000:2018 в качестве справочного стандарта для производителей пищевых продуктов [10]. Акцент на контроль процесса, а не на контроль конечного продукта, централизует систематический подход к идентификации, оценке и контролю опасностей на этапах, которые имеют решающее значение для здоровья потребителей в системе обработки [11]. Разработка, внедрение, контроль и управление системами НАССР имеют решающее значение для обеспечения безопасности пищевых продуктов [12]. Результаты исследований показали, что предприятия, прошедшие проверку по ISO 22000, имеют лучший НАССР, чем те, которые не прошли проверку [1].

Анализ рисков и критических контрольных точек – это эффективная система контроля качества для минимизации рисков безопасности продуктов. Она широко используется во многих отраслях пищевой промышленности [7].

В современных условиях рынка многим промышленным предприятиям необходимо совершенствовать производственные процессы в направлении обеспечения стабильности характеристик выпускаемой продукции. Руководители данных предприятий находятся в поисках инструментов и методов, позволяющих облегчить данную задачу. Сегодня из-за сложной ситуации на внутреннем и внешнем рынке организации применяют все средства для повышения конкурентных преимуществ своей продукции и для обеспечения ее безопасности и качества [13, 14]. Гарантировать выпуск продукции с заданными характеристиками, судя по мировому опыту ведущих компаний, позволяет управление рисками, а именно идентификация, анализ и комплекс мероприятий по их устранению и минимизации [2]. Попытки перенять данный опыт и внедрить международные стандарты в области менеджмента, регламентирующие требования к риск-ориентированному подходу, встречают непреодолимые для среднего и малого бизнеса проблемы:

- затруднения в обработке и анализе большого объема данных об идентифицированных рисках;
- недостаточный уровень экспертности в анализе рисков сотрудников предприятия;
- противоречивость оценок сотрудников предприятия в отношении частоты возникновения риска или тяжести последствий;
- затруднения в проведении сравнительного анализа результатов по нескольким временным интервалам.

Эффективное внедрение риск-ориентированного подхода и системы НАССР зависит не только от практического опыта и знаний, определенных в конкретном производственном процессе, но и от мер постоянного мониторинга и немедленной обратной связи [2, 7].

Внедрение современных методов и моделей менеджмента качества и безопасности на предприятиях, входящих в состав цепи поставок пищевой продукции, сопряжено с большим количеством трудностей [5–7]. Идеология управления рисками предполагает наличие мониторинга показателей с заданной и оцененной периодичностью. Тем не менее динамические показатели не измеряются и не отслеживаются в реальном времени [3–6]. В данной ситуации требуется универсальное решение, которое позволит обеспечить доступ к актуальным сведениям о состоянии системы компании, а также собрать и систематизировать информацию по возможным нарушениям с целью минимизации рисков в дальнейшем.

Развитие информационных технологий позволяет создавать и использовать программные средства, минимизирующие обозначенные проблемы.

Исследователи данного направления осуществляют проектирование программного обеспечения, которое применяется в производственных системах, где используется подход, ориентированный на продукт, т. е. общий производственный процесс определяется на основе спецификаций продукта и требований заказчика [14–16].

Программное обеспечение позволяет ускорить процесс получения и обработки данных о системных несоответствиях при производстве продукции, облегчает работу операторов, предоставляющих данные о нарушениях, с помощью продуманной формы для заполнения, а не написания длинных письменных отчетов по каждому случаю. Это означает, что разработка и внедрение программного обеспечения, позволяющего упростить работу в области гарантии качества и безопасности производимых продуктов, является востребованной и актуальной темой для исследования [17–24].

Целью исследования стала разработка программного обеспечения «Система поддержки принятия решений при анализе рисков на производстве», обеспечивающего информационные коммуникации между структурными подразделениями и руководством относительно опасностей и рисков, влияющих на результаты работы предприятия, и разработку мероприятий по их минимизации.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на базе промышленного предприятия Российской Федерации ООО «ЮГ». Область деятельности данного мероприятия – производство специализированной и обогащенной

пищевой продукции: драже, конфет, функциональных напитков (сиропов, бальзамов), биологически активных добавок к пище и сырья для их производства. Стандарт ISO 22000 был внедрен на всех производственных линиях в 2005 г. Программное обеспечение было апробировано на цехе безалкогольных напитков.

Проведено исследование рынка программного обеспечения в сфере обеспечения качества пищевой продукции методом выявления и учета несоответствий. Выявлено, что для данных целей можно использовать платформу 1С: Предприятие или специализированные информационные системы. Однако для этого требуется доработка программного обеспечения [7–12, 15–20]. Данное решение экономически не выгодно из-за приобретения лицензии и сопровождения программного обеспечения, а также отсутствия возможности в короткие сроки внести изменения в формы программы согласно требованиям пользователей. Собственная программа будет подстроена под работу конкретного предприятия и позволит сэкономить средства на покупке лицензии и корректировке готовых решений под его нужды. На основании данного исследования

руководством ООО «ЮГ» было разработано и утверждено техническое задание. В соответствии с ним проводилось данное исследование и разработка программного обеспечения.

Согласно приказу руководства ООО «ЮГ» была утверждена рабочая группа, собранная из сотрудников предприятия. Было принято решение о разработке программы, содержащей следующие функции: фиксирование возникшего несоответствия оператором с описанием величины, определение вероятности появления и значимости выявленного риска, а также тяжести возможных последствий.

Необходимо проводить регистрацию полученных сведений в общий перечень с присвоением всем записям идентификационного номера (id). Сотрудниками ООО «ЮГ» предложено фиксировать дату и время появления несоответствия. В части проведения своевременного мониторинга и пересмотра показателей требуется автоматическое формирование отчетов, в которых говорится о частоте возникновения несоответствий, приводящих к нарушению качества вырабатываемой продукции.

Алгоритм оценки вероятности появления рисков, представленный на рисунке 1,

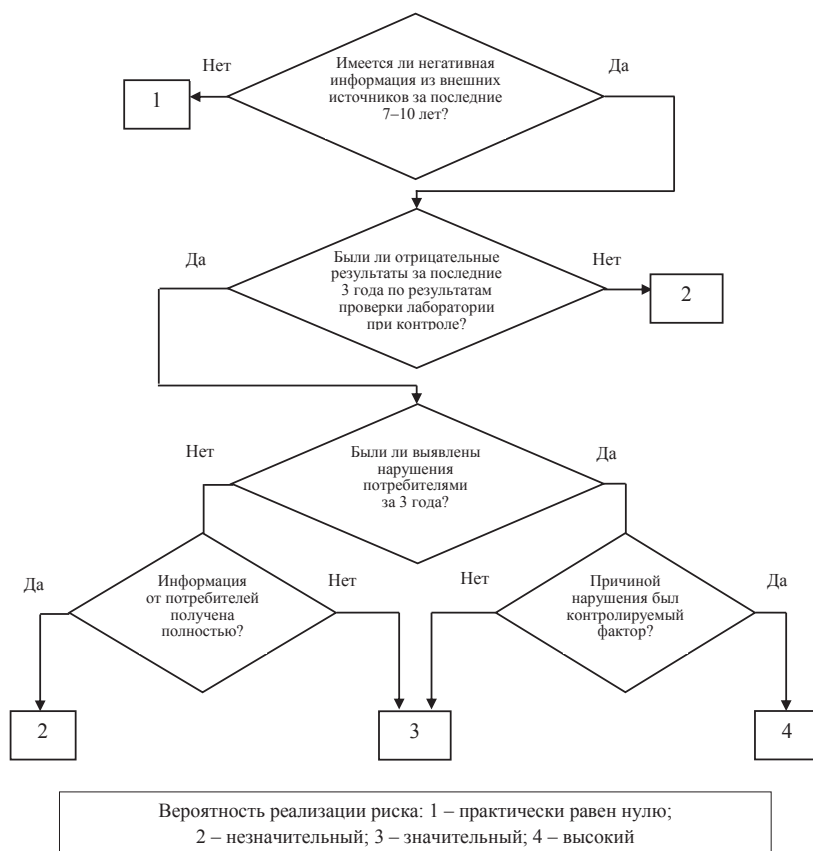


Рисунок 1. Алгоритм оценки вероятности реализации риска

Figure 1. Algorithm for hazard assessment

предполагает определение количественного уровня с помощью опроса и использование ответов пользователя на вопросы:

- есть ли гарантии, что негативная тенденция будет обнаружена сотрудниками производства до реализации рискового события?
- выявлялись ли за последние 3 года данные негативные тенденции сотрудниками производства до реализации рискового события?
- информация от потребителей получена полностью?
- все ли зарегистрированные случаи реализации риска были выявлены у потребителя?

Исходя из перечня вопросов, предлагаемых в алгоритме, в проектируемой программе должно быть предусмотрено:

- ввод информации пользователей о выявленных рисках;
- оценка степени тяжести последствий нежелательных событий на основе сравнения с обширной базой данных;
- оценка вероятности возникновения нежелательных событий на основе анализа ответов пользователя с учетом типового алгоритма;
- возможность проведения двух- и трехфакторного анализа и оценки рисков;
- хранение информации по анализу рисков для нескольких производств;
- аналитические отчеты по динамике количественных оценок рисков за различные временные интервалы;
- хранение информации о мероприятиях по минимизации и контролю рисков на предприятии;
- фильтрация рисков по видам, ключевым словам и количественному значению показателя величины риска;
- экспорт сформированного реестра рисков в Microsoft Excel и Microsoft Word.

Исходя из инфраструктуры предприятия, определены системные требования к программному обеспечению: оно должно быть совместимо с IBM PC, работающими под управлением операционных систем семейства Microsoft Windows (XP, Vista, 7, 8, 10). В связи с установкой во многих цехах персональных компьютеров с небольшим объемом жесткого диска объем дистрибутива не должен превышать 100 Мб.

Результаты и их обсуждение

Осуществлена разработка программного обеспечения «Система поддержки принятия решений при анализе рисков на производстве». Его целью является автоматизация процесса учета и анализа рисков, а также поддержка принятия решений в разработке мероприятий по устранению и минимизации негативных факторов, влияющих на результаты деятельности организации. Данная программа соответствует требованиям предприятия, заявленным в техническом задании.

Разработанная система поддержки принятия решений позволяет автоматизировать и упростить для работников предприятия пищевой промышленности

Рисунок 2. Окно настройки проверки

Figure 2. Scan settings

управляющие процессы системы менеджмента, объединяя в себе передовые статистические методы и компьютерные технологии.

IBM PC – совместимое программное обеспечение для ЭВМ, которое выполняет поставленные задачи при работе в заявленных операционных системах Microsoft Windows. Данные хранятся программой в системе управления базами данных Microsoft SQL Server 2012. В настоящее время программный продукт проходит регистрацию в ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности».

После запуска программного продукта пользователь получает доступ к главному экрану (рис. 2) для настройки проверки, а также к следующим формам:

- актуальный реестр рисков;
- редактирование реестра рисков;
- выборка из реестра рисков;
- динамика рисков.

Форма настройки проверки содержит выпадающий список для выбора производства (в зависимости от места выявления несоответствий) и выпадающий список выбора модели оценки рисков. Окно настройки предполагает выбор шкалы оценки (поля для заполнения «Шкала от», «до»).

Форма фиксации рисков (рис. 3), заполняемая оператором, предусматривает введение следующей информации:

- тип риска (с выпадающим списком выбора: микробиологический, физический, химический);
- наименование риска (текстовое поле для фиксации несоответствия, выявленного в ходе работы);
- оценка вероятности появления рискового события (оценивается по шкале от 0 до 10);
- оценка тяжести последствий рискового события (предполагает сравнение данных (всех слов)), введенных пользователем в поле «наименование риска» с таблицей «описание и тяжесть последствий типовых рисков», содержащей столбцы: ID типового риска, тип риска, наименование риска, описание риска и тяжесть последствий (максимальная);

Фиксация риска

Тип риска
Микробиологический ▼

Наименование риска
Риск появления плесени на упакованной продукц

Оценка вероятности возникновения 2

Оценка тяжести последствий 2

Величина риска 4

Значимость риска незначимый

Приоритетность риска

Мероприятия по минимизации Добавить

+

Рисунок 3. Окно фиксации рисков

Figure 3. Hazard registration

- величина риска оценивается в совокупности вероятности возникновения риска и его последствий по 10-балльной шкале;
- значимость риска (оператором производится градация выявленного негативного явления);
- показатель приоритетности риска (с помощью цветовой кнопки отображается приоритетность: зеленый – низкий приоритет, желтый – приоритет средней степени, красный – высокий приоритет);
- мероприятия по минимизации и (при необходимости) контролю риска (кнопка, приводящая в окно по предложению мероприятия по минимизации риска) (рис. 4).

Открыв окно по предложению мероприятий по минимизации рисков, оператору необходимо ввести наименование мероприятия и указать предполагаемого ответственного. Все предложенные мероприятия рассматриваются и корректируются руководством с помощью реестра мероприятий по минимизации рисков (рис 5.) На основании предложенных данных руководитель вносит изменения в корректирующее мероприятие, назначает другого ответственного и определяет срок выполнения данного мероприятия. Доступ к отчетам, информации и мероприятиям по минимизации рисков открыт для всех пользователей, но редактирование доступно только отдельным категориям пользователей. Доступность данных для всех категорий пользователей является одним из методов реализации базовых принципов менеджмента качества: «принятие решений, основанных на свидетельствах» и «вовлечение работников». Благодаря им повышается осведомленность работников и понимание их личного вклада в качество и безопасность готовой продукции.

Мероприятие по минимизации риска

Наименование
Отправлять готовую продукцию на склад каждые

Ответственный
Нач. цеха Иванов А.А.

Крайний срок выполнения

Добавить

Рисунок 4. Окно по предложению мероприятий по минимизации рисков

Figure 4. Measures of risk minimization

Результативное внедрение системы менеджмента безопасности продукции по международному стандарту ISO 22000-2018 или национальному ГОСТ Р ИСО 22000-2019 предполагает обязательный сбор, хранение, систематизацию и мониторинг информации о соответствии продукции, о нарушениях и аварийных ситуациях на производстве и о реализации рискованных ситуаций [3, 14]. Эти функции берет на себя разработанный программный продукт. Данные, хранящиеся в ПО, планируется использовать при проведении анализа со стороны руководства и принятии решений о необходимости корректирующих и предупреждающих мероприятий.

Для проведения анализа полученные данные могут сортироваться пользователем по следующим параметрам: название подразделения, дата регистрации несоответствия, значимость риска. Это позволяет расставить приоритеты в работе руководства. До внедрения в производственные процессы разработанного ПО сбор и обработка этих данных занимала существенную часть

Мероприятия по минимизации риска
Риск появления плесени на упакованной продукции

1 Отправлять готовую продукцию на склад каждые 15 минут Нач. цеха Иванов А.А.
2 Ознакомить работников цеха с регламентом 01.03.2021 Главный технолог Петрова Е.А.

+

Рисунок 5. Окно реестра мероприятий по минимизации рисков

Figure 5. Registering the measures of risk minimization

Таблица 1. Анализ затрат времени работников с учетом использования программного обеспечения «Система поддержки принятия решений при анализе рисков на производстве»

Table 1. Time consumption of the new software “Decision Support System for Hazard Assessment in Production”

Категория сотрудников	Количество сотрудников	Категория операции	Время на операции до внедрения программы, мин	Время на операции после внедрения программы, мин	Изменение времени выполнения, мин
Руководитель	4	Регистрация данных	15,0	12,0	3,0
		Анализ данных	95,0	86,0	9,0
		Разработка мероприятий	148,0	144,5	3,5
		Выполнение мероприятий	72,0	75,0	–3,0
		Прочее	134,5	136,5	–2,0
Оператор	35	Регистрация данных	13,0	10,0	3,0
		Анализ данных	18,0	15,5	2,5
		Выполнение мероприятий	238,0	215,0	23,0
		Прочее	89,5	88,5	1,0

рабочего времени операторов и требовала постоянного вовлечения руководителя структурного подразделения. После автоматизации обработки сведений отчетные данные выдаются в готовом виде, что экономит временные ресурсы исполнителей и высшего руководства, и представляются на заседаниях рабочей группы по качеству и безопасности пищевой продукции.

Автоматизированная обработка данных с помощью программы «Система поддержки принятия решений при анализе рисков на производстве» была внедрена в цехе производства безалкогольных напитков.

Так как цех безалкогольных напитков используется предприятием для производства широкой номенклатуры готовой продукции в несколько смен, было принято решение о поэтапном внедрении программного продукта.

В рамках первого этапа были проведены работы: – составлены блок-схемы каждого процесса и подпроцесса производства функциональных напитков; – произведено «фотографирование» рабочего дня специалистов и линейных руководителей предприятия; – разработанное ПО инсталлировано на персональные компьютеры, используемые в цеху.

Второй этап включал в себя посменное обучение работников цеха работе с программным продуктом, отработку внесения массива данных в базу программы, составление кратких методических инструкций по работе с ПО, включающих в себя ответы на типовые вопросы сотрудников.

Третьим этапом внедрения стал трехмесячный тестовый период использования системы. После изучения инструментария программного обеспечения и по истечении тестового периода сотрудники смогли дать свои рекомендации и пожелания относительно

работы программы. Данные, полученные в ходе опроса сотрудников, были рассмотрены и внедрены при доработке программы.

Заключительным этапом внедрения ПО стала оценка результативности процесса и эффективности реализованных мероприятий. Для этого повторно были формализованы «фотографии рабочего дня», а также проведено сравнение расходования временных ресурсов сотрудников «до» и «после» внедрения ПО. Результаты представлены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 видно, что внедренный программный продукт способствует сокращению затрат времени операторов на 29,5 мин в смену. Это составляет 6,1 % от продолжительности рабочего дня. Экономия времени осуществляется благодаря использованию программного продукта, заменившего собой заполнение журналов на бумажном носителе.

Руководители, используя «Систему поддержки принятия решений при анализе рисков на производстве», экономят 2,8 % рабочего времени (13,5 мин в день), т. к. оптимальным является анализ уже сгруппированных данных.

Из приведенных данных видно, что применение разработанного программного продукта является эффективным для организации процессов мониторинга и анализа данных, а также помогает экономить рабочее время как исполнителям, так и руководителям. Разработанная программа рассчитана на применение специалистами группы безопасности и качества, внедряющими и поддерживающими систему менеджмента безопасности пищевой продукции. Программа может быть адаптирована под задачи конкретных производств [26, 27].

Выводы

Авторами предложены рекомендации по усовершенствованию и автоматизации системы

менеджмента предприятия с помощью программного обеспечения «Система поддержки принятия решений при анализе рисков на производстве». Разработано и апробировано программное обеспечение в условиях действующего производства. В область действия системы менеджмента качества компании ООО «ЮГ», в соответствии с п. 8.1 «Планирование и управление деятельностью на стадиях жизненного цикла продукции и услуг» ГОСТ Р ИСО 9001-2015, включены производственные процессы. В ходе апробации было отмечено повышение результативности процесса управления несоответствиями, а также сокращение затрат времени на учет и отчетность относительно нарушений производственных процессов. Для повышения эффективности и результативности целесообразно внедрить данную практику во всех цехах производственного предприятия ООО «ЮГ», а также применять программу в рамках улучшения других предприятий

по производству безалкогольных напитков, в том числе функциональных.

Критерии авторства

Е. О. Ермолаева руководила проектом. Все авторы принимали участие в исследовании и разработке программного обеспечения, обработке данных и написании текстов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

E.O. Ermolaeva supervised the project. All the authors participated in the software development, data processing, and writing.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. HACCP certification in food industry: Trade-offs in product safety and firm performance / F. Liu [et al.] // *International Journal of Production Economics*. 2021. Vol. 231. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107838>.
2. Food safety management systems based on ISO 22000:2018 methodology of hazard analysis compared to ISO 22000:2005 / H. Chen [et al.] // *Accreditation and Quality Assurance*. 2019. Vol. 25. № 1. P. 23–37. <https://doi.org/10.1007/s00769-019-01409-4>.
3. Design and evaluation of an HACCP gluten-free protocol in a children's hospital / D. Vukman [et al.] // *Food Control*. 2021. Vol. 120. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107527>.
4. Escanciano C., Santos-Vijande M. L. Reasons and constraints to implementing an ISO 22000 food safety management system: Evidence from Spain // *Food Control*. 2014. Vol. 40. № 1. P. 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.032>.
5. Psomas E. L., Kafetzopoulos D. P. HACCP effectiveness between ISO 22000 certified and non-certified dairy companies // *Food Control*. 2015. Vol. 53. P. 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.01.023>.
6. Modeling and evaluation on WSN-enabled and knowledge-based HACCP quality control for frozen shellfish cold chain / H. Feng [et al.] // *Food Control*. 2019. Vol. 98. P. 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.11.050>.
7. Hasnan N. Z. N., Mohd Ramli S. H. Modernizing the preparation of the Malaysian mixed rice dish (MRD) with Cook-Chill Central Kitchen and implementation of HACCP // *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2020. Vol. 19. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100193>.
8. Study on the risks of metal detection in food solid seasoning powder and liquid sauce to meet the core concepts of ISO 22000:2018 based on the Taiwanese experience / H. Chen [et al.] // *Food Control*. 2020. Vol. 111. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107071>.
9. How remote monitoring can improve water treatment management. URL: <https://www.foodqualityandsafety.com/article/water-treatment-remote-monitoring/> (date of the application: 08.08.2021).
10. da Cunha D. T. Improving food safety practices in the foodservice industry // *Current Opinion in Food Science*. 2021. Vol. 42. P. 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.05.010>.
11. Muda I., Erlina A. A. Influence of human resources to the effect of system quality and information quality on the user satisfaction of accrual-based accounting system // *Contaduría y Administración*. 2018. Vol. 64. № 2. <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2019.1667>.
12. Фазулина О. Ф., Смирнов С. О. Разработка системы управления безопасностью процесса производства макаронных изделий // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50. № 4. С. 736–748. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-736-748>.
13. Трофимова Н. Б., Ермолаева Е. О., Трофимов И. Е. Разработка программного продукта для автоматизации учета несоответствий и нарушений критических пределов на производстве // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50. № 1. С. 167–175. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-167-175>.

14. Prosekov A. Yu., Ivanova S. A. Providing food security in the existing tendencies of population growth and political and economic instability in the world // *Foods and Raw Materials*. 2016. Vol. 4. № 2. P. 201–211. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-201-211>.
15. Экспертная система определения опасностей и контрольных точек производственных процессов по принципам ХАССП: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018666105 Рос. Федерация. № 2018663719 / Сурков И. В. [и др.]; заявл. 30.11.2018; опубл. 12.12.2018.
16. Учет и анализ несоответствий внутреннего аудита интегрированной системы менеджмента (учет и анализ несоответствий внутреннего аудита ИСМ): свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017616985 Рос. Федерация. № 2018663719 / Сурков И. В. [и др.]; заявл. 07.03.2017; опубл. 21.06.2017.
17. Учет опасных факторов и несоответствий процессов производства пищевой продукции: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018665743 Рос. Федерация. № 2018663675 / Прохоров А. А. [и др.]; заявл. 30.11.2018; опубл. 10.12.2018.
18. Product lifecycle management service system / D. Woźniak [et al.] // *Advances in intelligent networking and collaborative systems* / editors L. Barolli, H. Nishino, H. Miwa. Cham: Springer, 2019. P. 525–533. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29035-1_51.
19. Utilizing software design patterns in product-driven manufacturing system: A case study / D. Drozdov [et al.] // *Service oriented, holonic and multi-agent manufacturing systems for industry of the future* / editors T. Borangiu [et al.]. Cham: Springer, 2020. P. 301–312. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_23.
20. Разработка программного продукта для обеспечения процесса внутреннего аудита пищевого предприятия / Д. В. Россиева [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. 2017. Т. 46. № 3. С. 135–140.
21. Keeping data at the edge of smart irrigation networks: A case study in strawberry greenhouses / C. Angelopoulos [et al.] // *Computer Networks*. 2020. Vol. 167. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107039>.
22. Assunção W. K. G., Vergilio S. R., Lopez-Herrejon R. E. Automatic extraction of product line architecture and feature models from UML class diagram variants // *Information and Software Technology*. 2020. Vol. 117. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.106198>.
23. Wang L., Liu C. Evolutionary game analysis on government supervision and dairy enterprise in the process of product recall in China // *International Journal of Information Systems in the Service Sector*. 2020. Vol. 12. № 1. P. 44–66. <https://doi.org/10.4018/IJISSS.2020010104>.
24. Sahni V., Srivastava S., Khan R. Modelling techniques to improve the quality of food using artificial intelligence // *Journal of Food Quality*. 2021. Vol. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2140010>.
25. Project-level audits as part of an effective quality assurance process: Applied practices and relevant lessons learned / M. Değerli [et al.] // *CEUR Workshop Proceedings*. 2017. Vol. 1980. P. 391–402.
26. Lisitsyn A. B., Chernukha I. M., Nikitina M. A. Russian methodology for designing multicomponent foods in retrospect // *Foods and Raw Materials*. 2020. Vol. 8. № 1. P. 2–11. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-2-11>.
27. Social responsibility as the dominant driver of the evolution of reporting from financial to non-financial: theory and methodology / S. M. Bychkova [et al.] // *Foods and Raw Materials*. 2021. Vol. 9. № 1. P. 135–145. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-135-145>.

References

1. Liu F, Rhim H, Park K, Xu J, Lo CKY. HACCP certification in food industry: Trade-offs in product safety and firm performance. *International Journal of Production Economics*. 2021;231. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107838>.
2. Chen H, Liu S, Chen Y, Chen C, Yang H, Chen Y. Food safety management systems based on ISO 22000:2018 methodology of hazard analysis compared to ISO 22000:2005. *Accreditation and Quality Assurance*. 2019;25(1):23–37. <https://doi.org/10.1007/s00769-019-01409-4>.
3. Vukman D, Viličnik P, Vahčić N, Lasić D, Niseteo T, Panjkota Krbavčić I, et al. Design and evaluation of an HACCP gluten-free protocol in a children's hospital. *Food Control*. 2021;120. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107527>.
4. Escanciano C, Santos-Vijande ML. Reasons and constraints to implementing an ISO 22000 food safety management system: Evidence from Spain. *Food Control*. 2014;40(1):50–57. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.032>.
5. Psomas EL, Kafetzopoulos DP. HACCP effectiveness between ISO 22000 certified and non-certified dairy companies. *Food Control*. 2015;53:134–139. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.01.023>.
6. Feng H, Chen J, Zhou W, Rungsardthong V, Zhang X. Modeling and evaluation on WSN-enabled and knowledge-based HACCP quality control for frozen shellfish cold chain. *Food Control*. 2019;98:348–358. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.11.050>.
7. Hasnan NZN, Mohd Ramli SH. Modernizing the preparation of the Malaysian mixed rice dish (MRD) with Cook-Chill Central Kitchen and implementation of HACCP. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2020;19. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100193>.

8. Chen H, Liou B-K, Dai F-J, Chuang P-T, Chen C-S. Study on the risks of metal detection in food solid seasoning powder and liquid sauce to meet the core concepts of ISO 22000:2018 based on the Taiwanese experience. *Food Control*. 2020;111. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107071>.
9. How remote monitoring can improve water treatment management [Internet]. [cited 2021 Aug 08]. Available from: <https://www.foodqualityandsafety.com/article/water-treatment-remote-monitoring/>.
10. da Cunha D. T. Improving food safety practices in the foodservice industry. *Current Opinion in Food Science*. 2021;42:127–133. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.05.010>.
11. Muda I, Erlina AA. Influence of human resources to the effect of system quality and information quality on the user satisfaction of accrual-based accounting system. *Contaduría y Administración*. 2018;64(2). <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2019.1667>.
12. Fazullina OF, Smirnov SO. New safety management system for pasta production. *Food Processing: Technique and Technology*. 2020;50(4):736–748. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-736-748>.
13. Trofimova NB, Ermolaeva EO, Trofimov IE. Development of a software product for the automation of hazard analysis and critical control points in food production. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(1):167–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-167-175>.
14. Prosekov AY, Ivanova SA. Providing food security in the existing tendencies of population growth and political and economic instability in the world. *Foods and Raw Materials*. 2016;4(2):201–211. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-201-211>.
15. Surkov IV, Ermolaeva EO, Rossieva DV, Trofimova NB, Trofimov IE. Ehkspertnaya sistema opredeleniya opasnostey i kontrol'nykh tochek proizvodstvennykh protsessov po printsipam KHASSP [Expert system for determining the hazards and control points of production processes according to the principles of HACCP]. Certificate of registration of the computer program RU 2018666105. 2018.
16. Surkov IV, Ermolaeva EO, Rossieva DV, Trofimova NB, Trofimov IE. Uchet i analiz nesootvetstviy vnutrennego audita integrirovannoy sistemy menedzhmenta (uchet i analiz nesootvetstviy vnutrennego audita ISM) [Accounting and analysis of inconsistencies in the internal audit of the integrated management system (accounting and analysis of inconsistencies in the internal audit of the IMS)]. Certificate of registration of the computer program RU 2017616985. 2017.
17. Prokhorov AA, Ermolaeva EO, Trofimova NB, Trofimov IE. Uchet opasnykh faktorov i nesootvetstviy protsessov proizvodstva pishchevoy produktsii [Hazards and inconsistencies in food production processes]. Certificate of registration of the computer program RU 2018665743. 2018.
18. Woźniak D, Gohardani B, Majchrzak E, Hoti E, Urikova O. Product lifecycle management service system. In: Barolli L, Nishino H, Miwa H, editors. *Advances in intelligent networking and collaborative systems*. Cham: Springer; 2019. pp. 525–533. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29035-1_51.
19. Drozdov D, Atmojo UD, Pang C, Patil S, Ali MI, Tenhunen A, et al. Utilizing software design patterns in product-driven manufacturing system: A case study. In: Borangiu T, Trentesaux D, Leitão P, Boggino AG, Botti V, editors. *Service oriented, holonic and multi-agent manufacturing systems for industry of the future*. Cham: Springer; 2020. pp. 301–312. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_23.
20. Rossieva DV, Ermolaeva EO, Trofimova NB, Trofimov IE. Development of software product to support the process of internal audit of a food company. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2017;46(3):135–140. (In Russ.).
21. Angelopoulos C, Filios G, Nikolettas S, Raptis TP. Keeping data at the edge of smart irrigation networks: A case study in strawberry greenhouses. *Computer Networks*. 2020;167. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107039>.
22. Assunção WKG, Vergilio SR, Lopez-Herrejon RE. Automatic extraction of product line architecture and feature models from UML class diagram variants. *Information and Software Technology*. 2020;117. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.106198>.
23. Wang L, Liu C. Evolutionary game analysis on government supervision and dairy enterprise in the process of product recall in China. *International Journal of Information Systems in the Service Sector*. 2020;12(1):44–66. <https://doi.org/10.4018/IJISSS.2020010104>.
24. Sahni V, Srivastava S, Khan R. Modelling techniques to improve the quality of food using artificial intelligence. *Journal of Food Quality*. 2021;2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2140010>.
25. Değerli M, Özbudak EK, Aslı Aytaç A, Nur Çolakoğlu F, Demirel OE. Project-level audits as part of an effective quality assurance process: Applied practices and relevant lessons learned. *CEUR Workshop Proceedings*. 2017;1980:391–402.
26. Lisitsyn AB, Chernukha IM, Nikitina MA. Russian methodology for designing multicomponent foods in retrospect. *Foods and Raw Materials*. 2020;8(1):2–11. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-2-11>.
27. Bychkova SM, Karelskaia SN, Abdalova EB, Zhidkova EA. Social responsibility as the dominant driver of the evolution of reporting from financial to non-financial: theory and methodology. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(1):135–145. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-135-145>.

Изучение физико-химических показателей эмульгаторов и их влияния на процесс образования пищевых эмульсий



А. В. Терещук¹, К. А. Загородников²,
К. В. Старовойтова^{1,*}, П. А. Вьюшинский³

¹ Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

² Московский государственный университет пищевых производств^{ROR}, Москва, Россия

³ ООО «Зеленые линии», Красногорск, Россия

Поступила в редакцию: 06.08.2021

Принята после рецензирования: 01.11.2021

Принята в печать: 01.12.2021



*e-mail: centol@mail.ru

© А. В. Терещук, К. А. Загородников, К. В. Старовойтова, П. А. Вьюшинский, 2021

Аннотация.

Введение. Исследование свойств эмульгаторов и их влияния на характеристики пищевых эмульсий, разработка технологических решений по подбору эмульгаторов и их смесей для различных продуктов является актуальным направлением научных исследований. Цель работы – исследование влияния физико-химических показателей поверхностно-активных веществ на свойства пищевых эмульсий, а также разработка практических рекомендаций по их подбору для создания эмульсионных продуктов различных типов.

Объекты и методы исследования. Модельные молочно-жировые эмульсии; спреды, изготовленные в лаборатории; твердые и мягкие моноглицериды жирных кислот и лецитины различных производителей. Температуру плавления эмульгаторов определяли методом, который основан на фиксации температуры поднятия расплава эмульгатора в капилляре, открытом с двух концов. Жирнокислотный состав определяли путем получения хроматограмм метиловых эфиров жирных кислот с последующей идентификацией разделяемых компонентов и их количественным определением по площади пиков. Содержание твердых триглицеридов в эмульгаторах определяли методом ЯМР. Сведения о гидрофильно-липофильном балансе исследуемых эмульгаторов были получены из спецификаций производителей.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что твердые моноглицериды отличаются повышенным содержанием стеариновой и пальмитиновой кислот. В мягких моноглицеридах преобладает олеиновая кислота, в комплексном эмульгаторе «моноглицериды/лецитин» – линоленовая и олеиновая жирные кислоты. Твердые моноглицериды характеризуются высоким содержанием твердых триглицеридов при 35 °С (82,93 %), что коррелирует с высокой температурой плавления (80 °С) и низким йодным числом (3 мг I₂/100 г). Для формирования рекомендаций по способу подготовки эмульгатора к внесению в состав пищевой эмульсии были подобраны соотношения рафинированного дезодорированного жидкого растительного масла и эмульгатора. Эмульгаторы растворяли в масле при температуре на 5–7 °С выше температуры плавления эмульгатора при соотношении масло:эмульгатор от 6:1 до 10:1. При изучении процесса переохлаждения эмульсии при производстве спредов с использованием различных эмульгаторов определена температура кристаллизации и время фазового перехода.

Выводы. Данные, полученные в результате исследования, позволяют расширить теоретические основы создания пищевых эмульсий путем разработки научно обоснованных рекомендаций по подбору поверхностно-активных веществ и открывают перспективы дальнейших исследований свойств различных эмульгаторов и их влияния на качество готовых пищевых эмульсий.

Ключевые слова. Эмульгаторы, гидрофильно-липофильный баланс, поверхностно-активные свойства, коагуляционные структуры, кристаллизационные структуры, жирно-кислотный состав

Финансирование. Соглашение между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России)^{ROR} и ООО «Зеленые линии» о предоставлении из федерального бюджета субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием Московского государственного университета пищевых производств (МГУПП)^{ROR} от 26 ноября 2019, № 075-11-2019-042

Для цитирования: Изучение физико-химических показателей эмульгаторов и их влияния на процесс образования пищевых эмульсий / Л. В. Терещук [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 915–929. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-915-929>.

Physical and Chemical Parameters of Emulsifiers and Their Effect on the Process of Food Emulsion Formation

Lubov V. Tereshchuk¹, Konstantin A. Zagorodnikov²,
Kseniya V. Starovoitova^{1,*}, Pavel A. Viushinskij³

¹ Kemerovo State University^{}, Kemerovo, Russia

² Moscow State University of Food Production^{}, Moscow, Russia

³ LLC Zelenye linii, Krasnogorsk, Russia

Received: August 06, 2021

Accepted in revised form: November 01, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021



*e-mail: centol@mail.ru

© L.V. Tereshchuk, K.A. Zagorodnikov, K.V. Starovoitova, P.A. Viushinskij, 2021

Abstract.

Introduction. Modern food science needs new research of food emulsifiers, their composition, properties and effect on the structural characteristics of emulsions. It looks for modern technological solutions on how to select proper emulsifiers and their mixes to produce emulsions with different mass fractions of fat. The research objective was to study the effect of physical and chemical indicators of surfactants on the properties of food emulsions, as well as to develop practical recommendations for the selection of surfactants for various types of products.

Study objects and methods. The research featured model dairy fat emulsions and laboratory-made vegetable oil, as well as hard and soft mono- and diglycerides of fatty acids and lecithins. The emulsifiers were used to determine the melting point, fatty acid composition, iodine number, and solid triglyceride content at various temperatures. The melting point of emulsifiers was determined by fixing the melting temperature in a capillary oven. To identify the fatty acid composition, the methyl esters of fatty acids were subjected to the chromatogram method. After that, the separated components and their quantity were determined by the area of the peaks. The content of solid triglycerides in the emulsifiers was determined by the method of nuclear magnetic resonance. The hydrophilic-lipophilic balance was obtained from the manufacturer's specifications.

Results and discussion. The solid mono- and diglycerides appeared to have a high content of stearic and palmitic acids. Oleic acid predominated in soft monoglycerides; unsaturated fatty acids (linolenic and oleic) also predominated in the monoglycerides/lecithin complex emulsifier. Solid monoglycerides had a high content of solid triglycerides at 35°C (82.93%), which correlated with the high melting point (80°C) and the lowest iodine number (3 mg I₂/100 g) of all the samples. The optimal ratio of vegetable oil and the emulsifier was defined empirically. The emulsifiers were dissolved in refined deodorized vegetable oil at 5–7°C above the melting point of the emulsifier. The resulting ratios were between 6:1 and 10:1. The samples of creamy vegetable spreads were obtained using the studied emulsifiers and their compositions in different doses and ratios. The crystallization temperature and phase transition time were determined when studying the process of emulsion overcooling. The article introduces a list of technological and physicochemical indicators of emulsifiers: the fatty acid composition, the degree of saturation, the melting point, and the content of solid triglycerides. By finding out the physicochemical parameters of emulsifiers, producers can vary the ratio of the components of emulsifying compositions to achieve the desired properties of food emulsions. The hydrophilic-lipophilic balance also proved to be an important index since the proportion of hydrophilic and hydrophobic groups in surfactants affects the type of emulsions and makes it possible to adjust the fat content of the finished product.

Conclusion. The research results can expand the theoretical foundations of food emulsions. The article contains scientifically grounded recommendations on how to select optimal surfactants. The research opens up prospects for further studies of emulsifiers and their effect on the quality of finished products.

Keywords. Emulsifiers, hydrophilic-lipophilic balance, surface-active properties, coagulation structures, crystallization structures, fatty acid composition

Funding. The present research was performed by LLC Zelenye Linii and the Moscow State University of Food Production (MSUFP)^{} as part of assignment No. 075-11-2019-042 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka)^{} (November 26, 2019).

For citation: Tereshchuk LV, Zagorodnikov KA, Starovoitova KV, Viushinskij PA. Physical and Chemical Parameters of Emulsifiers and Their Effect on the Process of Food Emulsion Formation. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):915–929. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-915-929>.

Введение

Существенную долю в современной структуре питания занимают эмульсионные пищевые продукты. Водно-жировые системы, стабилизированные природными и синтезированными поверхностно-активными веществами, обладают лучшей усвояемостью организмом человека, чем нативные масла и жиры. Изменение в определенном диапазоне доли водной и жировой фазы, концентрации и соотношений поверхностно-активных веществ позволяет создавать продукты с необходимым составом и свойствами. Стабильность эмульсионных продуктов зависит от различных факторов: вида и химической структуры эмульгатора, способа производства пищевых эмульсий, степени модификации и очистки составляющих липидной фазы эмульсии [1, 2].

Выбор эмульгаторов для создания эмульсионных продуктов обусловлен многими факторами, характеризующими как ожидаемые свойства конечного продукта, так и особенности технологического процесса его изготовления. Большое значение имеют тип и свойства эмульсионной системы, возможное взаимодействие эмульгатора с другими рецептурными ингредиентами, а также его влияние на органолептические свойства продукта, в том числе вкус, аромат и сенсорные ощущения во рту при употреблении продукта в пищу. Технологические параметры перемешивания, гомогенизации, взбивания, перекачивания и др. влияют на выбор эмульгатора [3].

Поверхностно-активные вещества являются незаменимым компонентом в производстве пищевых эмульсий. Использование эмульгаторов в рецептурах спредов, маргаринов и майонезной продукции улучшает дисперсность и стойкость готового продукта, способствует легкому усвоению масел и жиров, входящих в состав продукта, организмом человека. Таким образом, эмульгаторы проявляют не только технологические, но и функциональные свойства. Изучение состава эмульгаторов с целью установления критериев их действия является необходимым и важным этапом в производстве продуктов питания.

Важнейшим показателем качества эмульсионных продуктов является их стойкость при термическом и механическом воздействии. Она зависит от различных факторов: соотношения гидрофильных и липофильных групп в химической структуре эмульгатора; состава и концентрации твердых и жидких фаз в триацилглицеринах как создаваемых эмульсий, так и используемого эмульгатора; технологических условий кристаллизации пищевых эмульсий [4–7]. Основными показателями липидной фазы эмульсионных масложировых продуктов, включающей природные масла и их смеси с модифицированными жировыми компонентами, а также с эмульгаторами, является пластичность,

хорошая намазываемость и легкоплавкость. Эти показатели зависят от правильно выбранного комплекса поверхностно-активных веществ, компонентного состава используемых эмульгаторов, их свойств и дозировки. При составлении рецептуры липидной фазы пищевых эмульсий, которые могут быть низко- и высокожирными, в общем количестве жиров учитывают жир, введенный с эмульгатором. В связи с этим важным является контроль показателей безопасности вводимых эмульгаторов, в том числе содержание транс-изомеров жирных кислот [8, 9].

Следующей важной функцией эмульгаторов является управление процессом кристаллизации жиров [10–12]. Эмульгаторы, участвуя в формировании структуры пищевых эмульсий, определяют размер кристаллов дисперсной фазы и скорость их роста. От состава и свойств эмульгатора зависит формирование структуры и консистенции продукта, его термоустойчивость. Именно технологические свойства правильно выбранного эмульгатора определяют однородную и пластичную консистенцию при замораживании и оттаивании продукта и оказывают влияние на длительность хранения, способствуя предотвращению выделения капель влаги или масла [13–15].

Наблюдается повышенный спрос не только на моно- и диглицериды жирных кислот, но и на их смеси с фосфолипидами и их синтетическими аналогами [16–18]. Из всех групп фосфолипидов наивысшей поверхностной активностью обладает фосфатидилхолин (лецитин), в меньшей – фосфатидилсерин, фосфатидилинозитол и фосфатидные кислоты. Разработаны комплексные эмульгаторы (моноглицериды/лецитин) с использованием различных видов моноглицеридов (твердых и мягких) и лецитинов (фракционированных, гидролизированных, ацелированных), обладающие эмулирующим и антиоксидантным действием для различных типов эмульсий в широком диапазоне жирности. При смешивании эмульгаторов проявляется синергетический эффект усиления свойств отдельных поверхностно-активных веществ, входящих в комплекс [19–21].

Таким образом, изучение состава и свойств эмульгаторов, их влияния на структурные характеристики пищевых эмульсий, а также разработка технологических решений по подбору эмульгаторов и их смесей для пищевых эмульсий с различной массовой долей жира является актуальным направлением научных исследований [19–21].

Одним из условий производства качественных эмульсионных продуктов является проведение фундаментальных и прикладных исследований состава и свойств сырьевых компонентов пищевых эмульсий. Совокупность технологических и функциональных свойств правильно подобранных пищевых добавок и их комплексов обуславливает назначение конечного продукта и обеспечивает его качество [22–25].

Целью работы является исследование влияния физико-химических показателей различных поверхностно-активных веществ на свойства пищевых эмульсий, а также разработка практических рекомендаций по их подбору для создания эмульсионных продуктов различных типов.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели были смоделированы и изготовлены в лабораторных условиях пищевые эмульсии с варьируемым соотношением липидной и водной фаз, а также с использованием нескольких поверхностно-активных веществ (ПАВ).

В качестве объектов исследования выступали модельные молочно-жировые эмульсии и сливочно-растительные спреды, изготовленные в лабораторных условиях. Также были исследованы физико-химические свойства используемых поверхностно-активных веществ: твердых и мягких моно- и диглицеридов жирных кислот и лецитинов.

В работе были использованы моноглицериды дистиллированные марки 2 (E471), выработанные на основе пальмового стеарина, и моноглицериды марки ПО-90. Они представляют собой дистиллированные моноглицериды на основе рапсового масла (ГК «НМЖК, г. Нижний Новгород). Лецитин (E322), использованный в работе, произведен компанией ООО «Ювикс-фарм».

Выбор в качестве объектов исследований моно- и диглицеридов жирных кислот и лецитинов, полученных разными способами, обусловлен тем, что именно эти виды эмульгаторов зарекомендовали себя как эффективные в производстве молочно-жировых эмульсионных продуктов, в том числе спредов с различной массовой долей жира (от 39 до 82 %).

В эмульгаторах была определена температура плавления, жирнокислотный состав, йодное число и содержание твердых триглицеридов при различных температурах.

Определение температуры плавления жиров и эмульгаторов осуществлялось при постоянном постепенном нагревании охлажденного жира (эмульгатора) до момента его расплавления, характеризующегося прозрачностью и подвижностью. Метод основан на фиксации температуры плавления по поднятию расплава эмульгатора в капилляре, открытом с двух концов с диаметром 0,1 мм. Определение проводили в трехкратной повторности, т. к. температура плавления для каждого вида эмульгатора является точной величиной и чувствительна к присутствию примесей. В результате этого можно идентифицировать эмульгатор и определить его чистоту.

Жирнокислотный состав исследуемых эмульгаторов определяли методом, основанным на получении хроматограммы метиловых эфиров жирных кислот с последующей идентификацией разделяемых

компонентов и их количественном определении по площади пиков. Каждый компонент смеси метиловых эфиров жирных кислот характеризуется конкретным временем удержания – от момента ввода пробы до появления максимума пика на хроматограмме. Время удержания является измеряемой величиной и составляет, например, для пальмитата 16,886 мин, для олеата 20,604 мин. Смеси жирных кислот, которые не способны димеризоваться, перед исследованием переводят в более легколетучие метиловые эфиры. Кроме этого, хроматографирование метиловых эфиров насыщенных и ненасыщенных жирных кислот с одинаковым количеством углеродных атомов облегчается. Определение проводили на газожидкостном хроматографе Agilent 7890A. Обработка данных выполнена системой Полихром.

Исследование содержания твердых триглицеридов в эмульгаторах в определенном диапазоне температур проводили методом ядерно-магнитного резонанса по ГОСТ 31757-2012 на аппарате Bruker Minispec MQ20.

Для измерения массовой доли твердых триглицеридов использовали радиоимпульс (диапазон частот от 20 до 40 МГц), который направляется относительно магнитного поля под углом 90°. Магнитное поле создается постоянным магнитом. Однородность поля магнита должна обеспечить полупериод спада намагниченности образца жидкого жира не менее 1000 мкс. Перед проведением анализа проводили пробоподготовку: эмульгатор расплавляли при температуре на 5 °С выше его температуры плавления (присутствие влаги в образце недопустимо). Расплавленным жиром (эмульгатором) заполняли ампулы (диаметром 10 мм) на высоту 2–2,5 см. Ампулы помещали в термостат при температуре 80 °С и выдерживали 30 мин. Затем ампулы охлаждали в металлическом блоке при температуре 0 °С в течение 30 мин. Далее помещали ампулы в металлические блоки термостатов с температурой 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 °С и выдерживали 20 мин. Далее пробирки переносили в измерительную ячейку ЯМР-анализатора. Результаты измерения фиксировали на приборе дисплея после нажатия клавиши Enter. Расхождение между параллельными измерениями не превышало 0,5 %.

Йодное число в эмульгаторах определяли по ГОСТ ISO 3961-2020.

Сведения о гидрофильно-липофильном балансе (ГЛБ) исследуемых эмульгаторов были получены из спецификаций производителей. Для исследований были отобраны следующие образцы: гидролизированный лецитин (ГЛБ 8); мягкие моно- и диглицериды (ГЛБ 4); твердые моно- и диглицериды (ГЛБ 3); фракционированный лецитин (ГЛБ 2). Гидрофильно-липофильный баланс смоделированных комплексных эмульгаторов был определен путем сложения ГЛБ отдельных эмульгаторов, умноженных на массовую долю эмульгатора в смеси.

Таблица 1. Характеристика природных и искусственных пищевых эмульсий

Table 1. Natural and artificial food emulsions

Показатели качества эмульсионных продуктов	Молоко	Спред низкожирный	Масло сливочное	Спред высокожирный
Массовая доля жира, %	2,8–4,8	39–60	60–82	60–80
Тип эмульсии	Прямая	Обратная	Обратная	Обратная
Вид эмульсии	Тонкодисперсная	Тонкодисперсная	Грубодисперсная	Тонкодисперсная
Размер частиц дисперсной фазы, мкм	5–7	3–5	20–30	3–5
Эмульгаторы	Белки Фосфолипиды	Моно- и диглицериды Лецитин	Фосфолипиды	Моно- и диглицериды Лецитин

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлена характеристика различных пищевых эмульсий. Молоко и масло сливочное являются эмульсиями, стабилизированными природными фосфолипидами (сфингомиелинами), содержащимися в молочном жире. Сливочно-растительные спреды, произведенные с правильно подобранными поверхностно-активными веществами, отличаются не меньшей, а иногда даже большей стабильностью, чем эмульсии, содержащие естественные поверхностно-активные вещества.

Многокомпонентность водной и жировой фаз, природа и концентрация эмульгатора, технологические условия диспергирования оказывают влияние на стойкость получаемых эмульсий [26, 27]. На рисунке 1 представлена модель поведения различных эмульгаторов на границе раздела водной и жировой фаз в зависимости от преобладания в эмульгаторе количества липофильных или гидрофильных групп [28].

Значение гидрофильно-липофильного баланса эмульгатора определяет возможность его применения для эмульсий различных типов. Для эмульсии вода в масле (обратного типа) необходимо использовать эмульгатор с ГЛБ от 2 до 6, где доля гидрофильных групп составляет от 10 до 30 %. Эмульгатор с таким значением ГЛБ необходимо растворять в масле или многокомпонентной жировой фазе. При производстве эмульсий масло в воде, относящихся к прямому типу, необходимо подбирать эмульгатор с высоким значением ГЛБ (в интервале от 10 до 14). В составе таких эмульгаторов доля гидрофобных групп составляет от 30 до 50 %. Для получения стойких эмульсий данного типа эмульгатор необходимо диспергировать в водной или молочной фазах.

Зависимость типа получаемой эмульсии от соотношений гидрофильных и гидрофобных групп в химической структуре эмульгатора представлена в таблице 2.

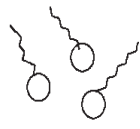
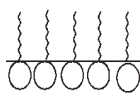
Жировая фаза		Молочный жир Твердые природные масла: пальмовое масло кокосовое масло Фракционированные масла: пальмовый олеин пальмовый стеарин Перезтерифицированные жиры Жирорастворимые ПАВ	Тпл 30–32 °C Тпл 33–39 °C Тпл 24–39 °C Тпл 21–24 °C Тпл 50–52 °C Тпл 27–36 °C Тпл 27–65 °C	
Водная фаза	 H ₂ O	Вода Водорастворимые белки Лактоза Водорастворимые ПАВ		
	a	b		c

Рисунок 1. Поведение дифильного эмульгатора на границе масло – вода:

а – с преобладающими гидрофильными свойствами; б – с преобладающими липофильными свойствами;
с – со сбалансированными гидрофильными и липофильными свойствами

Figure 1. Diphilic emulsifier at the oil-water interface: а – with predominant hydrophilic properties;
b – with predominant lipophilic properties; c – with balanced hydrophilic and lipophilic properties

Таблица 2. Взаимосвязь между строением ПАВ и типом получаемых эмульсий

Table 2. Effect of surfactant structure on the type of emulsions

	ПАВ для обратных эмульсий	ПАВ для смешанных эмульсий	ПАВ для прямых эмульсий
Доля гидрофобных групп, %	90	70	60
Доля гидрофильных групп, %	10	30	40
Гидрофильно-липофильный баланс	2	6	8
Типы получаемых эмульсий	Вода в масле	Вода в масле Масло в воде	Масло в воде

Система выбора эмульгатора на основе ГЛБ включает три этапа:

- определение оптимального значения ГЛБ для планируемого продукта;
- определение лучших видов эмульгаторов;
- окончательная корректировка ГЛБ.

В этой процедуре эмульгаторы и смеси со значениями ГЛБ вне установленного интервала могут быть отброшены для сокращения количества испытаний при использовании метода проб и ошибок. Определение наилучшего значения ГЛБ включает следующие шаги:

1. Выбор подходящей пары эмульгаторов (один липофильный, другой гидрофильный) с известными значениями. Например, моно- и диглицериды с ГЛБ 3 являются липофильными поверхностно-активными веществами, а гидролизированный лецитин с ГЛБ 10 – гидрофильным.

2. Приготовление серии опытных эмульсий с выбранными эмульгаторами, которые смешиваются таким образом, чтобы получить различные значения ГЛБ, начиная от полностью липофильного и заканчивая полностью гидрофильным веществом. Для двух поверхностно-активных веществ, предложенных на первом шаге, интервал значений ГЛБ будет от 3 до 10. Смесь эмульгаторов должна использоваться

в избыточном количестве или составлять около 10–12 % от содержания жира в конечном продукте.

3. Оценка полученной серии смесей эмульгаторов с использованием подходящих методов оценки функциональной эффективности, основанных на требованиях к продукту. С одной или несколькими смесями эмульгаторов будут получаться лучшие эмульсии, чем с остальными. Но если все смеси оказываются хорошими, то нужно повторить серию испытаний с более низкой дозировкой смеси эмульгаторов. Если все смеси дают плохие результаты нужно повысить дозировку и повторить серию.

4. Окончательные результаты испытаний должны указать с точностью до 2 единиц интервал ГЛБ, который будет наилучшим для конечного продукта. Более точное значение ГЛБ можно определить с помощью следующей серии испытаний со значениями ГЛБ, входящими в этот интервал.

Подходящий химический тип поверхностно-активных веществ является столь же важным, как и значение ГЛБ. После установления значения ГЛБ нужно определить, не будет ли какая-то другая смесь эмульгатора работать лучше, не будет ли она более эффективной или более экономически выгодной при том же значении ГЛБ.

Цель проведения этих испытаний заключается в выборе нескольких пар эмульгаторов, охватывающих широкое разнообразие химических соединений. Оценка функциональной эффективности этих смесей является основой для выбора идеальной смеси эмульгаторов для конкретного продукта.

Для производства спредов различной жирности при помощи вышеприведенного алгоритма были подобраны пары эмульгаторов с различным значением гидрофильно-липофильного баланса. В таблице 3 представлены характеристики выбранных эмульгаторов и подобранные дозировки для эмульсионных продуктов с различной массовой долей жира.

Как отмечалось выше, понятие гидрофильно-липофильного баланса позволяет получить полезную информацию, в том числе рассчитать его значения для смесей эмульгаторов и составить таблицы экспериментально полученных значений ГЛБ. Однако метод ГЛБ не является совершенной

Таблица 3. Характеристика эмульгаторов для спредов различной жирности

Table 3. Emulsifiers for spreads of different fat content

Спред	Эмульгатор	ГЛБ	Доля липофильных групп	Количество эмульгатора, %
Спред сливочно-растительный с м.д.ж. 40 %	Гидролизированный лецитин	8	40	0,3
	Моно- и диглицериды	4	20	0,6
Спред сливочно-растительный с м.д.ж. 80%	Фракционированный лецитин	2	10	0,2
	Моно- и диглицериды	4	20	0,4

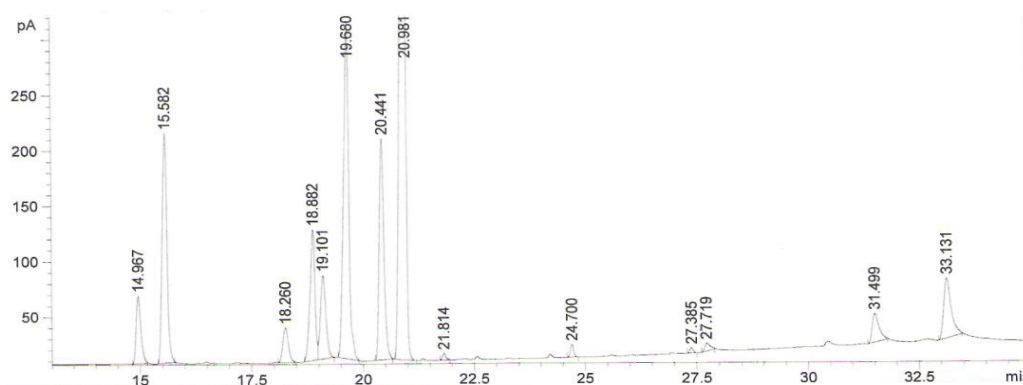


Рисунок 2. Хроматограмма метиловых эфиров жирных кислот эмульгатора E471 (твердые моно- и диглицериды)

Figure 2. Chromatogram of methyl esters of fatty acids in emulsifier E471 (solid mono- and diglycerides)

системой выбора поверхностно-активных веществ, поскольку не учитывает другие важные факторы, в том числе молекулярную массу поверхностно-активного вещества, температуру плавления и условия растворения. Например, по ГЛБ невозможно получить информацию о кристаллизационных свойствах моноглицеридов и их производных. Тем не менее понятие ГЛБ хорошо себя зарекомендовало как полезный инструмент для формирования общего представления о вероятных свойствах эмульгаторов и их смесей.

Соотношение твердых и жидких триглицеридов в композициях жиров и масел, входящих в состав жировой основы пищевых эмульсий, а также присутствие в смеси комплекса эмульгаторов в различных соотношениях может оказать влияние на технологический процесс образования пищевых эмульсий. В связи с этим были изучены жирнокислотный состав и свойства выбранных эмульгаторов, а также их влияние на модификацию кристаллов в процессе переохладения пищевых эмульсий.

На процесс кристаллизации эмульсии может оказывать влияние несколько факторов, в том числе присутствие в жировой фазе эмульгатора. Он являясь высокоплавким ингредиентом, выполняет функцию центра кристаллизации, способствуя агрегации и росту кристаллов в дисперсионной системе.

В процессе производства эмульгаторов используются твердые природные и модифицированные масла, а также жиры или жирные кислоты разной степени чистоты.

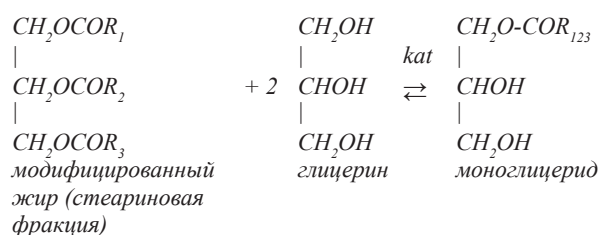
Идентификация липидной фазы эмульгатора может быть проведена на основании изучения ее жирнокислотного состава методом газожидкостной разделительной хроматографии. Данная методика позволяет быстро и качественно выполнить количественный анализ исследуемого сырья.

Хроматограммы, характеризующие жирнокислотный состав исследованных эмульгаторов, представлены на рисунках 2, 4 и 5.

Данные хроматограммы, представленной на рисунке 2, свидетельствуют о том, что в составе твердых моно- и диглицеридов преобладают насыщенные жирные кислоты: количество пальмитиновой кислоты составляет 30–40 %, стеариновой – 50–60 %.

Особенности жирнокислотного состава эмульгатора обусловлены, с одной стороны, спецификой состава жирового сырья, используемого при получении моноглицеридов, а с другой – химизмом и технологическими условиями процесса переэтерификации триацилглицеринов глицерином (глицеролизом) или этерификации глицерина жирными кислотами.

При производстве моноглицеридов путем глицеролиза модифицированных жиров дистиллированным глицерином полученная смесь продуктов реакции центрифугируется и подвергается молекулярной дистилляции. В качестве сырья используются твердые жиры, полученные гидронованием с температурой плавления от 55 до 80 °С и йодным числом от 1 до 3 г I₂/100 г. В качестве катализатора используют оксид кальция. Процесс переэтерификации триацилглицеринов дистиллированным глицерином происходит следующим образом:



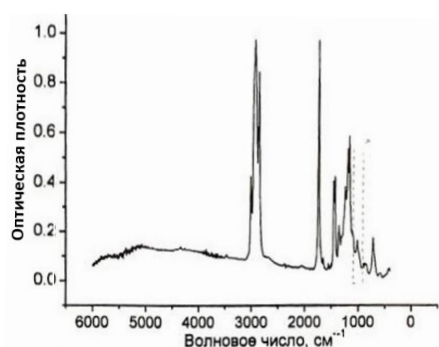
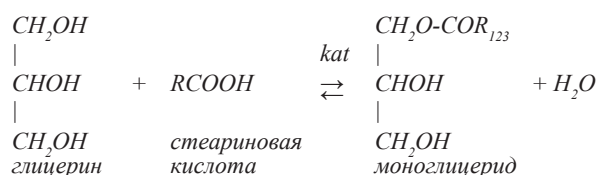


Рисунок 3. ИК-спектр транс метил олеата

Figure 3. IR spectrum of trans methyl oleate

При получении эмульгатора этерификацией используют дистиллированный глицерин и дистиллированную стеариновую кислоту.



Наряду с образованием моноглицеридов получается определенное количество диглицеридов. Бóльший избыток глицерина способствует бóльшему образованию моноглицеридов.

В связи с протеканием процесса при температуре 210–220 °С в присутствии катализатора (0,3 %) и остаточном давлении 30–35 кПа образуется небольшое количество транс-изомеризованных жирных кислот, содержание которых в готовом продукте составляет от 2 до 4 %.

Определение количества элаидиновой кислоты, которая является транс-изомером олеиновой кислоты, осуществляли методом ИК-Фурье спектроскопии диффузионного отражения. Процесс каталитической переэтерификации и глицеролиза сопровождается

транс-изомеризацией и перемещением двойных связей в молекулах жирных кислот. Эти химические превращения приводят к увеличению твердости и температуры плавления липидной фазы. Характерной особенностью непредельных соединений с изолированной транс-этиленовой связью является интенсивная полоса поглощения области 968 см⁻¹. Определение проводили на спектрометре Shimadzu FTIR8300, оснащенный приставкой диффузионного отражения DRS 8000. ИК-спектры были записаны в интервале 400–6000 см⁻¹, анализировали интервал числа частот 900–1060 см⁻¹ (рис. 3).

Анализируемый образец смеси метиловых эфиров жирных кислот (табл. 4) помещали на матовое зеркало кюветы приставки диффузионного отражения. Затем образец высушивали потоком воздуха до образования равномерной пленки на поверхности. Данная методика позволяет уменьшить влияние растворителя на оптическую плотность исследуемой смеси. Оптическая плотность образца ($A_{\text{об}}$) в области 966 см⁻¹ выражается как сумма оптической плотности транс С=С двойной связи ($A_{\text{тр}}$) и оптической плотности всех остальных компонентов в этой области ($A_{\text{ав}}$).

$$A = A_{\text{ав}} + A_{\text{тр}}$$

Доля транс метил олеата в смеси рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{тр}} = 0,37 \cdot (A_{\text{об}}/A_{\text{ав}} - 1), \text{ мольная доля}$$

где 0,37 – множитель калибровки данных ИКС.

Жирнокислотный состав мягких моноглицеридов характеризуется высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот. В образце присутствует олеиновая кислота, в том числе в транс-изомеризованной конфигурации.

Композиционный эмульгатор «моноглицериды/лецитины» получали смешиванием двух фракций в соотношении от 3:1 до 5:1 соответственно. Смесь тщательно перемешивали при температуре 75–85 °С и охлаждали. Фосфолипидный комплекс, в котором преобладают лецитины (60 %), проявляет

Таблица 4. Компонентный состав метиловых эфиров мягких моно- и диглицеридов жирных кислот

Table 4. Methyl esters of soft mono- and diglycerides of fatty acids

Компонентный состав					
Вещество	Время, мин	Концентрация, %	Площадь, мВ·мин	Высота, мВ	Ширина, мин
1 Пальмитат	16,884	12,262075	4,661	43,654	0,45
2 Стеарат	19,515	6,946059	2,640	18,213	0,338
3 Олеат	19,97	76,142850	28,944	107,07	0,578
4 Линолеат	20,604	2,689341	1,022	4,256	0,432
6	22,206	0,245211	0,093	0,142	0,702
7	23,269	1,714464	0,652	0,844	1,625
Итого		100,00000	38,012	174,45	

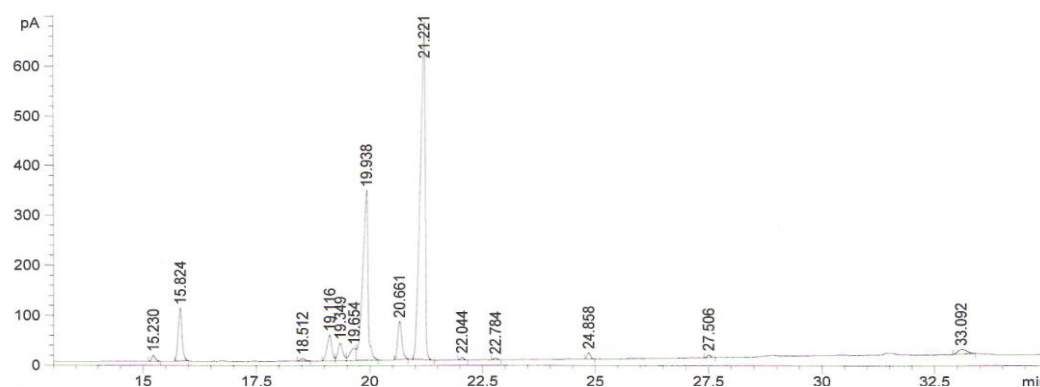


Рисунок 4. Хроматограмма метиловых эфиров жирных кислот эмульгатора E471 (мягкие моно- и диглицериды)

Figure 4. Chromatogram of methyl esters of fatty acids of emulsifier E471 (soft mono- and diglycerides)

наилучшие гидрофильные свойства, хорошо удерживает влагу, переходя при взаимодействии с водой в гидратированные формы, что способствует приобретению антиразбрызгивающих свойств. Кроме этого, композиционный эмульгатор улучшает пластические свойства эмульсионных продуктов и прочно удерживает влагу при повышении температуры окружающей среды. Результаты определения жирнокислотного состава композиционного эмульгатора представлены на рисунке 5.

В композиционном эмульгаторе из-за присутствия в нем фосфолипидов были идентифицированы ненасыщенные жирные кислоты: олеиновая и линоленовая.

На следующем этапе исследовали йодное число эмульгаторов. Оно является показателем, характеризующим степень непредельности жирных кислот, входящих в состав жиров и масел, или

липидной части жиросодержащего компонента (эмульгатора). Йодное число показывает количество граммов йода, эквивалентное галогену, который присоединяется по месту двойных связей к жирным кислотам в 100 г жира.

Создавая определенные условия, можно полностью насыщать непредельные связи жирных кислот. В лабораторных условиях в качестве галогенов используют бром и йод. Реакция протекает в строго определенных условиях и требует избытка галогена и ограниченного времени насыщения из-за высокой активности реагентов и проведения реакции без доступа света.

При определении йодного числа эмульгаторов был использован метод Вийса, который основан на применении хлор йода в ледяной уксусной кислоте в качестве галогенреагента. Следует отметить, что хлористый йод в уксусной кислоте

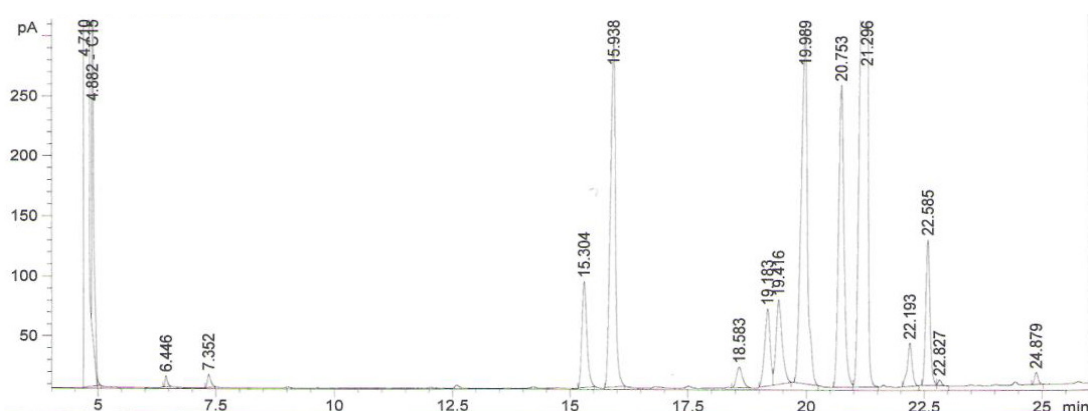


Рисунок 5. Хроматограмма метиловых эфиров жирных кислот композиционного эмульгатора «моноглицериды/лецитины»

Figure 5. Chromatogram of methyl esters of fatty acids of the composite emulsifier "monoglycerides/lecithins"

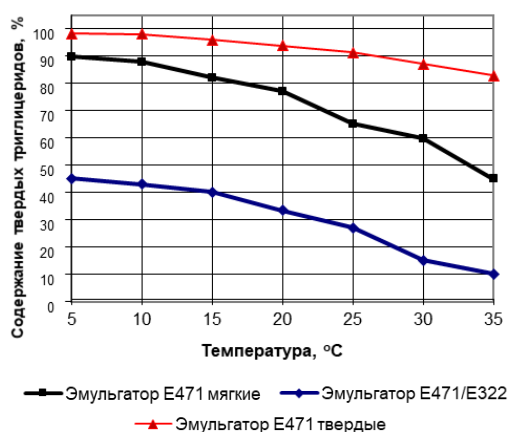
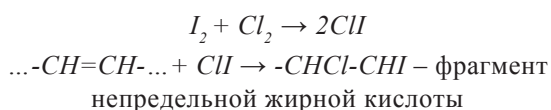


Рисунок 6. Результаты исследования содержания твердых триглицеридов в эмульгаторах

Figure 6. Composition of solid triglycerides in emulsifiers

обладает наивысшей активностью по сравнению со спиртовым раствором. Данная активность галогена обеспечивает полное насыщение непредельных связей. В приготовленном реагенте недопустим избыток свободного хлора, но необходимо, чтобы йод был в небольшом избытке. Это обеспечивает протекание реакции насыщения, а замещение водорода в углеродной цепи не происходит. При методе Вийса протекают следующие реакции:



Результаты определения йодного числа эмульгаторов представлены в таблице 6.

Важной технологической характеристикой липидных систем является содержание твердых

Таблица 5. Характеристика процесса переохлаждения эмульсии в процессе производства спредов с использованием различных эмульгаторов

Table 5. Emulsion overcooling in spreads production for various emulsifiers

Продукт	Температура переохлаждения (кристаллизации), °C	Время фазового перехода (кристаллизации), мин
Спред с мягкими моноглицеридами (м.д.ж. 72 %)	12 2	18 12
Спред с твердыми моноглицеридами (м.д.ж. 72 %)	12 2	14 10
Спред с моноглицеридами и лецитином (м.д.ж. 72 %)	12 2	16 11

триглицеридов. Эмульгаторы должны обладать высокой термической стабильностью, а гранулы должны быть однородными. Содержание твердой фазы при температуре 35 °C должно быть не менее 5 %.

На рисунке 6 представлено содержание твердых триглицеридов при различных температурах в исследуемых эмульгаторах.

Содержание твердых триглицеридов исследуемых эмульгаторов при 35 °C составило от 10 % у мягких моноглицеридов до 80 % у твердых.

Температура плавления эмульгатора имеет важное практическое значение в технологии производства пищевых эмульсий, в том числе для производства спредов. Кроме того, подготовка эмульгатора осуществляется путем растворения его в масле при температуре на 10–12 °C выше его температуры

Таблица 6. Показатели качества эмульгаторов, используемых в технологии производства спредов

Table 6. Quality indicators of emulsifiers used in spread production

Показатели	Моно- и диглицериды ненасыщенные (E471)	Моно- и диглицериды насыщенные (E471)	Композиции моно- и диглицеридов и лецитина (E471/E322)
Функциональные группы, определяющие гидрофильность	-COOH -OH	-COOH -OH	-NH ₂ -COOH -OH
Растворимость эмульгатора	Растворимы в липидной фазе		
Соотношение масло:эмульгатор при растворении	8:1	10:1	6:1
Температура плавления эмульгатора, °C	40	80	50
Йодное число (степень насыщенности), г I ₂ /100 г	65	3	36
Количество моноглицеридов, %	45	80	60
Соотношений компонентов эмульгатора	–	–	3:1
Гидрофильно-липофильный баланс	4	3	4

плавления. Результаты определения температуры плавления исследуемых эмульгаторов представлены в таблице 6.

На следующем этапе изучали влияние состава эмульгатора на кристаллизационные свойства эмульсионных продуктов (спредов).

В лабораторных условиях было получено 6 образцов сливочно-растительных спредов, в липидной фазе которых использован молочный жир (50 %), пальмовое масло (10 %), заменитель молочного жира (20 %) и подсолнечное масло, рафинированное по полному циклу (10 %). Продукт изготовлен с жирностью 72 %. Дозировка эмульгаторов (моноглицериды мягкие, моноглицериды твердые, лецитины), вносимых в рецептуру спреда, составила от 0,6 до 0,9 %.

Процесс переохлаждение пищевой эмульсии проводили в двух температурных режимах:

- охлаждения холодной водой (12–13 °С);
- охлаждение ледяным рассолом (0–2 °С).

Результаты исследований представлены в таблице 5.

Переход пищевой эмульсии из жидкого состояния в твердое происходит не мгновенно, а в определенном интервале времени и температуры. Это обусловлено многокомпонентностью триацилглицеринов липидной фазы, включающей природные масла и жиры, подвергнутые модификации. На образование кристаллической структуры продукта влияние оказывают специфические особенности глицеридов, жирнокислотный состав и количественное содержание твердой фазы в эмульгаторе. Самая высокая скорость кристаллизации наблюдалась в образцах спредов с использованием твердых моноглицеридов, характеризующихся высокой степенью насыщенности и наибольшим содержанием твердой фазы при температуре 12 °С.

Анализ данных по формированию кристаллической структуры показывает, что время фазового

перехода эмульсии в твердое состояние зависит и от температуры процесса.

Исследование органолептических свойств (внешний вид, консистенция, намазываемость) полученных образцов спредов с различными эмульгаторами показало, что внесение в рецептуры пищевых эмульсий твердых моноглицеридов высокой степени насыщенности, характеризующихся низким йодным числом и высокой температурой плавления, способствовало образованию конденсационно-кристаллизационной структуры. В ней кристаллы липидной фазы, срастаясь между собой, образуют твердый каркас. Также наблюдалось образование нескольких кристаллов из одного центра. Образцы не восстанавливались после механического разрушения. Образованная эмульсия характеризовалась повышенной твердостью, крошливой консистенцией и неудовлетворительной пластичностью.

Использование при производстве пищевых эмульсий в качестве эмульгатора мягких моноглицеридов обеспечило получение стабильной коагуляционной структурированной системы, где кристаллы жира сцеплены между собой слабым взаимодействием через тонкие пленки водной среды. Такая эмульсия имеет высокую степень пластичности и достаточное количество тиксотропна. Использование мягких моноглицеридов обеспечивает хорошую намазываемость спреда с массовой долей жира от 39 до 60 %.

Использование композиционной эмульгирующей системы «моноглицериды/лецитин» позволило получить смешанные модификации с оптимальным балансом коагуляционных и кристаллизационных структур. Это обеспечивает продукту достаточную плотность и пластичность.

Были выполнены микроскопические исследования полученных образцов спредов в светлом поле. На рисунке 7 изображены микрофотографии образцов,

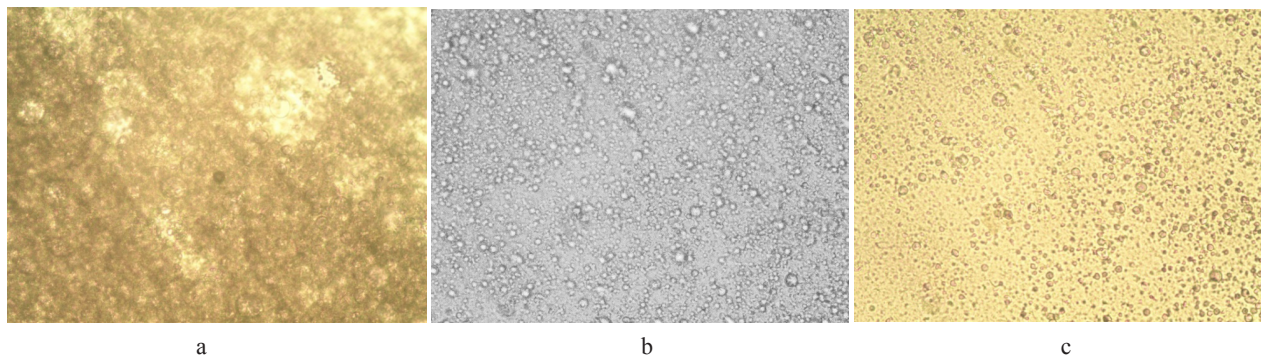


Рисунок 7. Микрофотографии образцов спредов, полученных с использованием твердых (а) и мягких моноглицеридов (б), а также смеси моноглицеридов и лецитина (с)

Figure 7. Micrographs of spread samples obtained using solid monoglycerides (a), soft monoglycerides (b), and a mix of monoglycerides and lecithin (c)

полученных с использованием твердых и мягких моноглицеридов, а также смеси моноглицеридов с лецитином.

На рисунке 7а видны большие неправильные агрегаты сросшихся кристаллов жировой фазы. На рисунках 7б и 7с видны отдельные сферические капли жировой фазы, равномерно распределенные в дисперсионной среде.

Таким образом, состав и свойства эмульгатора для пищевых эмульсий оказывает существенное влияние на дисперсность, стойкость эмульсии и формирование кристаллической структуры.

Твердые насыщенные моноглицериды с низким йодным числом оказывают влияние на укрепление кристаллической структуры эмульсионного продукта, тем самым предотвращая отделение жидких компонентов липидной фазы (растительного масла). Их рекомендуется использовать при производстве спредов высокой жирности (80–82 %). Мягкие моноглицериды, в жирнокислотном составе которых количество ненасыщенных жирных кислот выше, чем в твердых моноглицеридах, рекомендуется использовать при получении спредов низкой жирности до 60 %.

Для формирования рекомендаций по способу подготовки эмульгатора к внесению в состав пищевой эмульсии опытным путем был осуществлен подбор соотношений жидкого растительного масла и эмульгатора. Эмульгаторы растворялись в рафинированном дезодорированном растительном масле при температуре на 5–7 °С выше температуры плавления эмульгатора при соотношении масло:эмульгатор от 6:1 до 10:1.

В таблице 6 систематизированы физико-химические показатели и показатели эмулирующей активности, которые необходимо учитывать при выборе поверхностно-активных веществ для производства спредов.

Таким образом, жирнокислотный состав, степень насыщенности, температура плавления и содержание твердых триглицеридов в эмульгаторах и их смесях определяют скорость роста кристаллов и размер жировых шариков в эмульсии, т. е. степень ее дисперсности, а также полиморфную форму жира. Владение информацией о физико-химических показателях эмульгаторов позволяет варьировать соотношение компонентов эмульгирующих композиций, а также их дозировки для достижения требуемых свойств получаемых пищевых эмульсий.

Выводы

На основании проведенных исследований предложен перечень технологических и физико-химических показателей эмульгаторов, по которым следует их оценивать перед использованием в производстве пищевых эмульсий.

В связи с использованием в производстве эмульгаторов различных модифицированных жиров, в том числе полученных методом гидрирования, нужно определять содержание транс-изомеров жирных кислот в эмульгаторах, т. к. они относятся к нормируемым показателям безопасности при определении качества эмульсионных продуктов, в том числе спредов. Температуру плавления необходимо определять для корректировки технологического этапа подготовки раствора эмульгатора. Предложено растворение эмульгатора в рафинированном дезодорированном растительном масле при температуре на 5–7 °С выше температуры плавления эмульгатора при соотношении масло:эмульгатор от 6:1 до 10:1. Установлено влияние йодного числа, содержания твердых триглицеридов и жирнокислотного состава эмульгаторов и их композиций на образование кристаллизационных структур. В ходе проведенных исследований показано, что при выборе эмульгатора также необходимо учитывать показатель гидрофильно-липофильного баланса, т. к. доля гидрофильных и гидрофобных групп в поверхностно-активных веществах влияет на тип получаемых эмульсий и позволяет корректировать жирность готового продукта.

Данные, полученные в результате исследования, позволяют расширить теоретические основы создания пищевых эмульсий путем разработки научно обоснованных рекомендаций по подбору поверхностно-активных веществ и открывают перспективы дальнейших исследований свойств различных эмульгаторов и их влияния на качество готовых пищевых эмульсий.

Критерии авторства

Л. В. Терещук – общая редакция рукописи, разработка плана исследования, получение фактического материала. К. А. Загородников и П. А. Вьюшинский – получение фактического материала. К. В. Старовойтова – обзор литературы по теме исследования, методология исследования, получение фактического материала.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

L.V. Tereshchuk edited the manuscript, developed the research plan, and obtained the research material. K.A. Zagorodnikov and P.A. Viushinskij obtained the research material. K.V. Starovoitova reviewed the publications, developed the research methodology, and obtained the research material.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Арасова Л. И., Тагиева Т. Г., Завадская И. М. К вопросу оценки эффективности пищевых ПАВ для эмульсионной продукции масложирового ассортимента // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2019. № 1–2. С. 39–43.
2. Tereshchuk L. V., Starovoytova K. V., Ivashina O. A. Practical aspects of the use of emulsifiers in manufacturing emulsion fat-and-oil products // Foods and Raw Materials. 2018. Vol. 6. № 1. P. 30–39. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-30-39>.
3. Топникова Е. В., Лепилкина О. В., Коноплева А. А. Влияние эмульгаторов на реологические свойства спредов // Переработка молока. 2014. Т. 179. № 9. С. 44–46.
4. Monoacylglycerols in dairy recombined cream: II. The effect on partial coalescence and whipping properties / E. Fredrick // Food Research International. 2013. Vol. 51. № 2. P. 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.006>.
5. Fredrick E., Walstra P., Dewettinck K. Factors governing partial coalescence in oil-in-water emulsions // Advances in Colloid and Interface Science. 2010. Vol. 153. № 1–2. P. 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.10.003>.
6. Petrut R. F., Danthine S., Blecker C. Assessment of partial coalescence in whippable oil-in-water food emulsions // Advances in Colloid and Interface Science. 2016. Vol. 229. P. 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.004>.
7. Study of the biofunctional properties of cedar pine oil with the use of *in vitro* testing cultures / A. Yu. Prosekov [et al.] // Foods and Raw Materials. 2018. Vol. 6. № 1. P. 136–143. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-136-143>.
8. Ali F., Wang J., Ullah N. Oil/fat blending strategy for improving milk fat globule membrane stability and its effect on fatty acid composition // International Journal of Dairy Technology. 2019. Vol. 72. № 4. P. 496–504. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12604>.
9. Habashi V., Elhamirad A. H., Pedramnia A. Textural properties of low fat mayonnaise with whey protein concentrate and Tragacanth gum as egg and fat substitutes // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 19–23. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-19-23>.
10. Tippetts M., Martini S. Effect of cooling rate on lipid crystallization in oil-in-water emulsions // Food Research International. 2009. Vol. 42. № 7. P. 847–855. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.009>.
11. Relating crystallization behavior of monoacylglycerols-diacylglycerol mixtures to the strength of their crystalline network in oil / I. Tavernier [et al.] // Food Research International. 2019. Vol. 120. P. 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.092>.
12. Influence of cooling rate on partial coalescence in natural dairy cream / K. Moens [et al.] // Food Research International. 2019. Vol. 120. P. 819–828. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.044>.
13. Loi C. C., Eyres G. T., Birch E. J. Effect of mono- and diglycerides on physical properties and stability of a protein-stabilised oil-in-water emulsion // Journal of Food Engineering. 2019. Vol. 240. P. 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.016>.
14. Moens K., Tavernier I., Dewettinck K. Crystallization behavior of emulsified fats influences shear-induced partial coalescence // Food Research International. 2018. Vol. 113. P. 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.005>.
15. Doğan M., Göksel Saraç M., Aslan Türker D. Effect of salt on the inter-relationship between the morphological, emulsifying and interfacial rheological properties of O/W emulsions at oil/water interface // Journal of Food Engineering. 2018. Vol. 275. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109871>.
16. Technical emulsifiers in aerosol whipping cream – Compositional variations in the emulsifier affecting emulsion and foam properties / M. Blankart [et al.] // International Dairy Journal. 2020. Vol. 102. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104578>.
17. Jadhav H., Waghmare J., Annature U. Effect of mono and diglyceride of medium chain fatty acid on the stability of flavour emulsion // Food Research. 2021. Vol. 5. № 2. P. 214–220. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(2\).589](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(2).589).
18. Katsouli M., Tzia C. Effect of lipid type, dispersed phase volume fraction and emulsifier on the physicochemical properties of nanoemulsions fortified with conjugated linoleic acid (CLA): Process optimization and stability assessment during storage conditions // Journal of Molecular Liquids. 2019. Vol. 292. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111397>.
19. Design of biosystems to provide healthy and safe food. Part A: effect of emulsifier and preparation technique on physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties / B. Maherani [et al.] // European Food Research and Technology. 2018. Vol. 244. № 11. P. 1963–1975. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3108-2>.
20. Marhamati M., Ranjbar G., Rezaie M. Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of oil-in-water nanoemulsions: A critical review // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 340. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117218>.
21. Formation and stability of W/O-high internal phase emulsions (HIPEs) and derived O/W emulsions stabilized by PGPR and lecithin / P. K. Okuro [et al.] // Food Research International. 2019. Vol. 122. P. 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.028>.
22. Effect of outer water phase composition on oil droplet size and yield of (w1/o/w2) double emulsions / A. K. L. Oppermann [et al.] // Food Research International. 2018. Vol. 107. P. 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.021>.

23. Pathak M. Nanoemulsions and their stability for enhancing functional properties of food ingredients // *Nanotechnology applications in food: Flavor, stability, nutrition and safety* / editors A. E. Oprea, A. M. Grumezescu. Academic Press, 2017. P. 87–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811942-6.00005-4>.
24. Fabrication of oil-in-water emulsions as shelf-stable liquid non-dairy creamers: Effects of homogenization pressure, oil type, and emulsifier concentration / Y. N. Soo [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 101. № 6. P. 2455–2462. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10871>.
25. Novoselova M. V., Prosekov A. Yu. Technological options for the production of lactoferrin // *Foods and Raw Materials*. 2016. Vol. 4. № 1. P. 90–101. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-90-101>.
26. Yildirim M., Sumnu G., Sahin S. The effects of emulsifier type, phase ratio, and homogenization methods on stability of the double emulsion // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2017. Vol. 38. № 6. P. 807–814. <https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1201768>.
27. Effect of oil content and emulsifier type on the properties and antioxidant activity of sea buckthorn oil-in-water emulsions / H. Zheng [et al.] // *Journal of Food Quality*. 2020. Vol. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1540925>.
28. Effect of HLB value on the properties of chitosan/zein/lemon essential oil film-forming emulsion and composite film / Y. Sun [et al.] // *International Journal of Food Science and Technology*. 2021. Vol. 56. № 10. P. 4925–4933. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15216>.

References

1. Tarasova LI, Tagijeva TG, Zavadskaja IM. To the question of evaluation of food SAS efficiency for the emulsion products of oil and fat product range. *Vestnik of the All-Russia Scientific Research Institute of Fats*. 2019;(1–2):39–43. (In Russ.).
2. Tereshchuk LV, Starovoytova KV, Ivashina OA. Practical aspects of the use of emulsifiers in manufacturing emulsion fat-and-oil products. *Foods and Raw Materials*. 2018;6(1):30–39. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-30-39>.
3. Topnikova EV, Lepilkina OV, Konopleva AA. Vliyanie ehmul'gatorov na reologicheskie svoystva spredov [Effect of emulsifiers on the rheological properties of spreads]. *Milk Processing*. 2014;179(9):44–46. (In Russ.).
4. Fredrick E, Heyman B, Moens K, Fischer S, Verwijlen T, Moldenaers P, et al. Monoacylglycerols in dairy recombined cream: II. The effect on partial coalescence and whipping properties. *Food Research International*. 2013;51(2):936–945. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.006>.
5. Fredrick E, Walstra P, Dewettinck K. Factors governing partial coalescence in oil-in-water emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2010;153(1–2):30–42. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.10.003>.
6. Petrut RF, Danthine S, Blecker C. Assessment of partial coalescence in whippable oil-in-water food emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2016;229:25–33. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.004>.
7. Prosekov AYU, Dyshlyuk LS, Milent'eva IS, Pavsky VA, Ivanova SA, Garmashov SYu. Study of the biofunctional properties of cedar pine oil with the use of *in vitro* testing cultures. *Foods and Raw Materials*. 2018;6(1):136–143. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-136-143>.
8. Ali F, Wang J, Ullah N. Oil/fat blending strategy for improving milk fat globule membrane stability and its effect on fatty acid composition. *International Journal of Dairy Technology*. 2019;72(4):496–504. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12604>.
9. Habashi V, Elhamirad AH, Pedramnia A. Textural properties of low fat mayonnaise with whey protein concentrate and Tragacanth gum as egg and fat substitutes // *Foods and Raw Materials*. 2021;9(1):19–23. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-19-23>.
10. Tippetts M, Martini S. Effect of cooling rate on lipid crystallization in oil-in-water emulsions. *Food Research International*. 2009;42(7):847–855. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.009>.
11. Tavernier I, Moens K, Heyman B, Danthine S, Dewettinck K. Relating crystallization behavior of monoacylglycerols-diacylglycerol mixtures to the strength of their crystalline network in oil. *Food Research International*. 2019;120:504–513. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.092>.
12. Moens K, Tzompa-Sosa DA, Van de Walle D, Van der Meeren P, Dewettinck K. Influence of cooling rate on partial coalescence in natural dairy cream. *Food Research International*. 2019;120:819–828. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.044>.
13. Loi CC, Eyres GT, Birch EJ. Effect of mono- and diglycerides on physical properties and stability of a protein-stabilised oil-in-water emulsion. *Journal of Food Engineering*. 2019;240:56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.016>.
14. Moens K, Tavernier I, Dewettinck K. Crystallization behavior of emulsified fats influences shear-induced partial coalescence. *Food Research International*. 2018;113:362–370. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.005>.
15. Doğan M, Göksel Saraç M, Aslan Türker D. Effect of salt on the inter-relationship between the morphological, emulsifying and interfacial rheological properties of O/W emulsions at oil/water interface. *Journal of Food Engineering*. 2018;275. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109871>.
16. Blankart M, Kratzner C, Link K, Oellig C, Schwack W, Hinrichs J. Technical emulsifiers in aerosol whipping cream – Compositional variations in the emulsifier affecting emulsion and foam properties. *International Dairy Journal*. 2020;102. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104578>.

17. Jadhav H, Waghmare J, Annapure U. Effect of mono and diglyceride of medium chain fatty acid on the stability of flavour emulsion. *Food Research*. 2021;5(2):214–220. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(2\).589](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(2).589).
18. Katsouli M, Tzia C. Effect of lipid type, dispersed phase volume fraction and emulsifier on the physicochemical properties of nanoemulsions fortified with conjugated linoleic acid (CLA): Process optimization and stability assessment during storage conditions. *Journal of Molecular Liquids*. 2019;292. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111397>.
19. Maherani B, Khelifi MA, Salmieri S, Lacroix M. Design of biosystems to provide healthy and safe food. Part A: effect of emulsifier and preparation technique on physicochemical, antioxidant and antimicrobial properties. *European Food Research and Technology*. 2018;244(11):1963–1975. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3108-2>.
20. Marhamati M, Ranjbar G, Rezaie M. Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of oil-in-water nanoemulsions: A critical review. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;340. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117218>.
21. Okuro PK, Gomes A, Costa ALR, Adame MA, Cunha RL. Formation and stability of W/O-high internal phase emulsions (HIPEs) and derived O/W emulsions stabilized by PGPR and lecithin. *Food Research International*. 2019;122:252–262. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.028>.
22. Oppermann AKL, Noppers JME, Stieger M, Scholten E. Effect of outer water phase composition on oil droplet size and yield of (w1/o/w2) double emulsions. *Food Research International*. 2018;107:148–157. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.021>.
23. Pathak M. Nanoemulsions and their stability for enhancing functional properties of food ingredients. In: Oprea AE, Grumezescu AM, editors. *Nanotechnology applications in food: Flavor, stability, nutrition and safety*. Academic Press; 2017. pp. 87–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811942-6.00005-4>.
24. Soo YN, Tan CP, Tan PY, Khalid N, Tan TB. Fabrication of oil-in-water emulsions as shelf-stable liquid non-dairy creamers: Effects of homogenization pressure, oil type, and emulsifier concentration. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101(6):2455–2462. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10871>.
25. Novoselova MV, Prosekov AYU. Technological options for the production of lactoferrin. *Foods and Raw Materials*. 2016;4(1):90–101. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-90-101>.
26. Yildirim M, Sumnu G, Sahin S. The effects of emulsifier type, phase ratio, and homogenization methods on stability of the double emulsion. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2017;38(6):807–814. <https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1201768>.
27. Zheng H, Mao L, Yang J, Zhang C, Miao S, Gao Y. Effect of oil content and emulsifier type on the properties and antioxidant activity of sea buckthorn oil-in-water emulsions. *Journal of Food Quality*. 2020;2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1540925>.
28. Sun Y, Liu Z, Wang X, Zhang F, Huang X, Li J, et al. Effect of HLB value on the properties of chitosan/zein/lemon essential oil film-forming emulsion and composite film. *International Journal of Food Science and Technology*. 2021;56(10):4925–4933. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15216>.

Теплофизические параметры арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления

А. Х.-Х. Нугманов^{1,*}, Г. С. Мещерякова¹, В. А. Лебедев²,
Д. М. Бородулин³, И. Ю. Алексанян¹, Е. В. Соколова¹



¹ Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

² ООО «Инновационные технологии продуктов питания», Астрахань, Россия

³ Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 09.09.2021

Принята после рецензирования: 21.10.2021

Принята в печать: 01.12.2021

*e-mail: albert909@yandex.ru



© А. Х.-Х. Нугманов, Г. С. Мещерякова, В. А. Лебедев,
Д. М. Бородулин, И. Ю. Алексанян, Е. В. Соколова, 2021

Аннотация.

Введение. Разработка защитных покрытий на базе пектина ориентирована на снятие проблем при производстве биоразлагаемой съедобной пленки. Перспективным ресурсом для ее выработки может послужить вторичное арбузное сырье, остающееся на полях в большом количестве. В нем присутствует 13,4 % пектиновых компонентов, из которых 8,1 % протопектина. Цель исследования – определение плотности и теплофизических характеристик пектинового экстракта для проектирования процесса сушки.

Объекты и методы исследования. Пектиновый экстракт из корки арбуза. Определение его теплофизических характеристик проводилось по способу, опирающемуся на термическую инерцию термопары. При изменении агрегатного состояния объекта применялся калориметрический метод. Плотность объекта находилась пикнометрическим способом. Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по критериальным уравнениям.

Результаты и их обсуждение. В результате исследований арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления получены: усредненная плотность конечного пленочного материала (652 кг/м^3) и жидкого полуфабриката (1028 кг/м^3); зависимость его физической плотности и влажности W ; теплоемкость c_m , температуропроводность и теплопроводность. При различных значениях W (80, 70, 60 и 50 %) получены усредненные значения c_m – 3393, 3225, 3137 и 3113 соответственно. Была скорректирована и модифицирована критериальная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи α от скорости воздушного теплоносителя и традиционно применяемой температуры теплоносителя ($\approx 100^\circ\text{C}$) в контакте с поверхностью пищевого продукта ($\approx 80^\circ\text{C}$).

Выводы. С целью проведения расчетных процедур при проектировании агрегатов для сушки найдены теплофизические характеристики и физическая плотность арбузного геля в определенных пределах варьирования влажности и параметров теплового агента. Была скорректирована и модифицирована критериальная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи. Полученные данные можно использовать при проектировании не только операций обезвоживания, но и других теплофизических процессов и их аппаратного оформления.

Ключевые слова. Арбузное сырье, корка, пектиновые экстракты, защитная пленка, теплофизические параметры, структурно-механические характеристики, сушка

Для цитирования: Теплофизические параметры арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления / А. Х.-Х. Нугманов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 930–942. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-930-942>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Thermophysical Parameters of a Semi-Finished Watermelon Product as an Object of Dehumidification

Albert H.-H. Nugmanov^{1,*}, Galina S. Meshcheryakova¹,
Viktor A. Lebedev², Dmitry M. Borodulin³, Igor Yu. Aleksanian¹,
Ekaterina V. Sokolova¹

¹ Astrakhan State Technical University , Astrakhan, Russia

² LLC Innovative Food Technologies, Astrakhan, Russia

³ Kemerovo State University , Kemerovo, Russia

Received: September 09, 2021

Accepted in revised form: October 21, 2021

Accepted for publication: December 01, 2021

*e-mail: albert909@yandex.ru

© A.H.-H. Nugmanov, G.S. Meshcheryakova, V.A. Lebedev,
D.M. Borodulin, I.Yu. Aleksanian, E.V. Sokolova, 2021



Abstract.

Introduction. Pectin-based protective coatings can produce a perfect biodegradable edible film. Secondary watermelon raw materials are a promising resource for this type of food coating as it contains 13.4% of pectin components, of which 8.1% is protopectin. The present research objective was to find the density and thermophysical characteristics of the pectin extract in order to optimize the drying process.

Study objects and methods. The research featured a pectin extract from watermelon rind. Its thermophysical properties were defined according to the thermocouple inertia method. The calorimetric method was used to change the aggregation state, while the pycnometric method was applied to calculate the density. The method of criterion equations helped to define the heat transfer coefficient.

Results and discussion. The average density of the final film material was 652 kg/m³ and that of the liquid semi-finished product was 1.028 kg/m³. The research also revealed the dependence of physical density and humidity W , heat capacity, thermal diffusivity, and thermal conductivity. For different W , averaged were 3393, 3225, 3137, and 3113, respectively. The study also provided the criterion dependence for determining the heat transfer coefficient and modified α on the speed of the air coolant for artificial convection at conventional coolant temperature ($\approx 100^\circ\text{C}$) in contact with the food product surface ($\approx 80^\circ\text{C}$).

Conclusion. The article introduces the thermophysical characteristics and physical density of watermelon gel for various humidity and thermal agent parameters, as well as a modified criterion dependence for determining the heat transfer coefficient. The research results can be used to design dehydration operations, other thermophysical processes, and their equipment.

Keywords. Watermelon raw materials, rind, pectin extracts, protective film, thermophysical parameters, structural and mechanical characteristics, drying

For citation: Nugmanov AH-H, Meshcheryakova GS, Lebedev VA, Borodulin DM, Aleksanian IYu, Sokolova EV. Thermophysical Parameters of a Semi-Finished Watermelon Product as an Object of Dehumidification. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):930–942. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-930-942>.

Введение

Пристальное внимание в мире стали обращать на интенсивное и спонтанное увеличение использования синтетических полимерных упаковочных материалов для пищевых продуктов, что обуславливает перманентный рост отходов, которые не подвержены биоразложению. Это предопределяет актуальность решения задач по разработке и производству пищевой современной упаковки в различных секторах пищевой индустрии. Она позволит уменьшить отрицательное воздействие на внешнюю среду обитания человека через понижение времени биodeградации упаковки после ее применения. Одним из максимально пригодных методов решения данных задач служит широкое использование в инженерной практике съедобных защитных пленок на основе пектина из возобновляемых пищевых сырьевых источников.

Разработка защитных покрытий на базе пектиновых субстанций, служащих натуральными

структурообразователями, выработанными из вторичной ресурсной базы, ориентирована на снятие комплексной проблемы при производстве готовых изделий путем глубокой обработки основных сырьевых материалов и разработки оригинального пленочного материала [1, 2]. Техническим результатом получения пектиносодержащих пленочных структур является их способность обеспечить защиту пищевым продуктам от микробиологической порчи и естественных потерь при хранении, а также обеспечить сохранность показателей качества и безопасности. Следует отметить, что в условиях нарастания рыночной потребности в пленочных покрытиях определяющей становится задача выявления новых источников для их производства.

Все преимущества пленочных структур, полученных как из растительного, так и животного сырья, обусловлены их структурно-механическими параметрами, определяющими скорость внутреннего

переноса влаги и тепловой энергии, а также процедурой формирования заданной структуры у готовой продукции. По этой причине в процессе осуществления теплотехнических исследований, например, конвективного обезвоживания гелеобразных покрытий на базе пектиновых экстрагированных компонентов арбузной корки (арбузный полуфабрикат), необходимо обладать информацией о теплофизических характеристиках (ТФХ) объекта сушки, включая его плотность. Эти сведения дают возможность выявить и обосновать рациональную интенсивность операции влагоудаления на экспериментальном стенде, предназначенном для изучения сушки исследуемого объекта при варьировании режимных параметров этого процесса.

Целью исследования является нахождение структурно-механических и теплофизических характеристик пектинового экстракта для проектирования процесса его сушки.

Объекты и методы исследования

Перспективным вторичным ресурсом для производства пектиносодержащей пленки может стать арбузное сырье. Во-первых, в нем присутствует 13,4 % пектиновых компонентов, из которых 8,1 % приходится на протопектин, определяющий прочность плодовой ткани [3]. Во-вторых, согласно данным волгоградских ученых, невостребованной арбузной продукции на полях остается около 150 тыс. т [4]. Это выброшенные ресурсы, используя которые можно получить различные и нужные на рынке пищевые продукты, в том числе глубокой переработки. Например, пленочные пектиносодержащие структуры.

Конкретным объектом данного исследования послужил пектиновый экстракт из не утилизируемой корки арбуза.

Определяющей структурно-механической характеристикой пищевого продукта служит его плотность, которая для влажных гидрогелевых структур в пределах варьирования температур T от 273 до 363 °К не меняется. По этой причине в этом температурном интервале можно осуществить опытную серию пикнометрическим способом [5–7].

В процессе конвективной сушки из жидкого арбузного полуфабриката получается пленочная структура, значение плотности которой в начальном и итоговом состоянии различается при варьировании ее влагосодержания. При этом можно ограничиться нахождением плотности в начальном и итоговом состоянии образца, а ее промежуточная величина определяется путем интерполяции при линейной аппроксимации данных пороговых значений.

В работе [8, 9] приведен способ нахождения комплекса ТФХ (коэффициенты теплопроводности λ , температуропроводности α и удельной теплоемкости c_M) жидких, пастообразных и тонкодисперсных субстанций в процессе их

термообработки, опирающийся на теплоинерционные параметры термодатчика [10].

Очевидно, что скорость изменения температуры датчика, оперативно введенного в образец, обусловлена его свойствами и параметрами. Это легло в основу экспресс-метода по нахождению ТФХ [8, 9]. Скорость повышения температуры термодатчика находится из соотношения (1) [8]:

$$\theta_{(\tau)} = \frac{T_c - T_{2(\tau)}}{T_c - T_0} = \frac{2K}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp(-u^2 Fo) u^2 du}{(u^2 - K)^2 + u^2 K^2} \quad (1)$$

где $\theta_{(\tau)} = \frac{T_c - T_{2(\tau)}}{T_c - T_0}$ – безразмерная T ; Fo – обобщенная переменная Фурье; $K = mc_1\rho_1$ – обобщенная переменная, определяющая соотношение объемных теплоемкостей образца и термодатчика; $m = \left(\frac{c_2\rho_2}{3}\right)^{-1}$ – константа термодатчика, (м³·К)/Дж; $c_1\rho_1$ и $c_2\rho_2$ – объемные теплоемкости образца и термодатчика, Дж/(м³·К).

Из публикации [8] следует, что по скорости повышения температуры термодатчика можно найти следующие ТФХ: λ , α и $c_1\rho_1$ [10]. С этой целью применили разложение функционала $\theta_{(\tau)}$ в ряд при значительных величинах Fo . В итоге имеем [8]:

$$\theta_{(\tau)} = \frac{1}{2K\sqrt{\pi}Fo^3} \cdot \left\{ 1 + \frac{3(2-K)}{2K} \cdot \frac{1}{Fo} + \frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2} \cdot \frac{1}{Fo^2} + \dots + R_n(Fo) \right\} \quad (2)$$

Для остаточного слагаемого $R_n(Fo)$ погрешность, приемлемая после замены ряда конкретной, по модулю меньше конечного не отброшенного слагаемого. По этой причине, оставив первые три слагаемых, имеем соотношение, дающее возможность найти Fo и K :

$$\theta_{2(\tau)} \approx \frac{1}{2K\sqrt{\pi}Fo^3} \left\{ 1 + \frac{3(2-K)}{2K} \cdot \frac{1}{Fo} + \frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2} \cdot \frac{1}{Fo^2} \right\} \quad (3)$$

При максимально возможной ошибке:

$$\delta_{max} \leq \left| \frac{15[(K-2)^2-1]}{4K^2} \cdot \frac{1}{Fo^2} \right| \quad (4)$$

Соотношение (3) при $1 < K < 2$ в координатной сетке $y = \theta_{2(\tau)}(Fo)\sqrt{Fo^3}$ и $x = 1/Fo$ приобретает параболический вид с максимумом при определенной величине Fo_{max} . Опытное тестирование полученных результатов для ряда продуктов приведено в публикации [8].

Согласно условию экстремума функционала (3) имеем:

$$\frac{1}{Fo} = -\frac{1}{5} \cdot \frac{(2-K)K}{[(K-2)^2-1]} \quad (5)$$

$$\theta_{2(\tau)}\sqrt{Fo^3} = -\frac{1}{2K\sqrt{\pi}} \left[\frac{0,15(2-K)^2}{(K-2)^2-1} - 1 \right] \quad (6)$$

Осуществив опытную серию и трансформировав данные в графический вид $\theta\sqrt{\tau^3} = f\left(\frac{1}{\tau}\right)$, находим θ_{max} , из соотношения (7) – K , а из 5 – Fo_{max} , обусловленный величиной K :

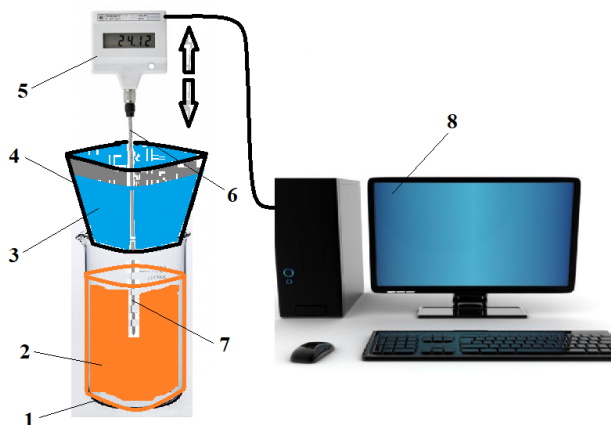


Рисунок 1. Опытный стенд: 1 – емкость для образца; 2 – материал с комнатной температурой; 3 – водоледяная смесь для поддержания t около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – емкость из бумаги; 5 – ЛТ-300; 6 – зонд для замера в исходном состоянии; 7 – он же в итоговом состоянии; 8 – компьютер с программным обеспечением ThermoChart

Figure 1. Experimental stand: 1 – sample container; 2 – material with room temperature; 3 – water-ice mixture to maintain the temperature at about $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – paper container; 5 – LT-300; 6 – probe in the initial state; 7 – probe in the final state; 8 – computer with ThermoChart software

$$\theta_{\max} \sqrt{\left\{ -\frac{(2-K)K}{5[(K-2)^2-1]} \right\}^{-3}} = \frac{1}{2K\sqrt{\pi}} \left[\frac{0,15(2-K)^2}{(K-2)^2-1} - 1 \right] \quad (7)$$

По методике [8] можно найти ТФХ по величинам $Fo_{\max}$ и K при $\tau_{\max}$ и $\theta_{\max}$. Итоговые соотношения имеют следующую форму:

$$a = \frac{Fo_{\max} R^2}{\tau_{\max}} \quad (8)$$

$$c_M \rho_M = \frac{K}{m} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{Fo_{\max} R^2}{\tau_{\max}} \cdot \frac{K}{m} \quad (10)$$

где R – эквивалентный радиус зондового элемента, м.

С целью осуществления опытной серии по определению ТФХ арбузного полуфабриката по описанной методике использовался электронный термометр ЛТ-300, где чувствительным элементом служит платиновый термометр сопротивления пленочного типа на керамической поверхности. Данный элемент обладает хорошим воспроизводством характеристики T и длительной стабильностью при эксплуатации. На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки.

В процессе осуществления опыта температура водоледяной композиции доводится в емкости из бумаги до значения в пределах $1\text{--}4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем активизируется программное обеспечение ThermoChart, которое фиксирует на мониторе значение T с помощью ЛТ-300.

Для изучения подготовленный образец с комнатной температурой погружается в емкость, над которой размещается емкость из бумаги с водоледяной смесью и зондом. После подключения термодатчика к компьютеру и активизации программного обеспечения на мониторе появляются значения величины T и оперативно пробивается зондом доньшко емкости из бумаги, который погружается в область замера T . Программное обеспечение отражает варьирование величины T . Опыт пятикратно дублируется, результаты табулируются и по методу [8] рассчитываются ТФХ.

Последующее определение ТФХ арбузного полуфабриката предопределяет установление их зависимостей от содержания влаги в пределах варьирования $0,1 \leq W \leq 0,91$ кг/кг. Изменение теплоемкости при варьировании влажности пищевых продуктов можно принять линейным. Поэтому информация о величине этого параметра в нескольких (как минимум в двух) точках дает возможность получить аппроксимирующую зависимость его влажности в заданном диапазоне, используя методы экстра- или интерполяции. Что касается коэффициента теплопроводности, то его можно найти по соотношению (13), полученному М. А. Грозовым для жидких пищевых продуктов. Расчет коэффициента температуропроводности связан с его зависимостью от λ , c_M и ρ .

Информация о величине коэффициента теплоемкости арбузного полуфабриката при фиксированных значениях его влажности была получена экспериментальным путем на опытной установке, представленной на фотографии (рис. 2). Следует отметить, что сравнительно точный метод адиабатического калориметра малоприменим для термолабильных пищевых материалов, поэтому целесообразно реализовать другую калориметрическую методику [11–13]. Она опирается на нахождение калориметрической константы K , зависящей от потерь подведенной теплоты, при наличии высокочувствительной схемы замеров, дающей возможность проводить их в малых (около $2\text{ }^{\circ}\text{K}$) вариациях T пробы за несколько минут.

Опытный стенд (рис. 2) скомпонован из 2-х отсеков – термического и измерительного. Первый является термоизолированным резервуаром (термосом), где размещаются изучаемые пробы. Второй скомпонован из схем питания и замера разности электрических потенциалов и силы тока в нагревательном узле, а также определения температуры и ее временной фиксации. Схема экспериментального стенда приведена на рисунке 3.

Величина удельной теплоемкости находится по соотношению:

$$c_M = \frac{Q_{\text{пол}}}{M_{\text{обр}} \cdot \Delta T}, \quad (\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})) \quad (11)$$



Рисунок 2. Опытный стенд для нахождения теплоемкости

Figure 2. Experimental stand for calculating heat capacity

где $Q_{пол}$ – полезное тепло, подводимое к материалу, Дж; $M_{обр}$ – его масса, кг; ΔT – варьирование его T , °К.

Из (11) вытекает перечень параметров, подлежащих определению. Причем $Q_{пол}$, подводимое электронагревательным узлом, находится по закономерности Джоуля-Ленца:

$$Q_{пол} = U \cdot I \cdot \Delta t \text{ (Дж)} \quad (12)$$

где U – разность электрических потенциалов на нагревательном узле, В; I – сила тока в нем, А; Δt – временной промежуток прохождения через него тока, с.

Из соотношений (11) и (12) вытекает, что для нахождения удельной теплоемкости объекта исследования нужно корректно определять U , I , Δt , и ΔT от подведенной энергии при минимальных тепловых потерях. Изучаемый пищевой материал обладает специфическими особенностями, что не дает возможности разместить его в герметичных резервуарах и воспользоваться адиабатическими точными калориметрическими установками. В нашем варианте целесообразно минимизировать тепловые потери, не создавая адиабатные условия при хорошей теплоизоляции.

Калориметрическая постоянная, которая табулирована в зависимости от водной теплоемкости воды, находится в результате опытной серии по выявлению зависимости t в определенных временных рамках Δt . Такие опыты для $t = 25\text{--}40$ °С осуществлены и приведены в публикации [14]. По причине малозаметной вариативности калориметрической постоянной в данном диапазоне температур ее можно с определенной погрешностью считать равной 15,3 Дж.

Таким образом, итоговое соотношение для нахождения жидкого арбузного полуфабриката будет иметь следующий вид:

$$c_M = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t - K}{M_{обр} \cdot \Delta T}$$

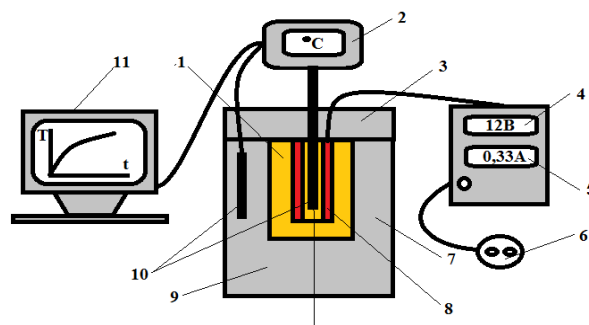


Рисунок 3. Принципиальная схема опытной установки для определения теплоемкости материалов:

1 – изучаемая проба; 2 – табло теплового датчика; 3 – калориметрическая крышка; 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – электроточка; 7 – термостатическая калориметрическая емкость; 8 – электрический термоэлемент; 9 – теплоизоляция; 10 – термодатчики; 11 – компьютер

Figure 3. Pilot set for determining heat capacity: 1 – sample; 2 – thermal sensor board; 3 – calorimetric cover; 4 – voltmeter; 5 – ammeter; 6 – electric point; 7 – thermostatic calorimetric container; 8 – electric thermal element; 9 – thermal insulation; 10 – temperature sensors; 11 – computer

где $K = 15,3$ – калориметрическая постоянная, Дж.

Коэффициент теплопроводности является не аддитивным параметром. По этой причине для его нахождения можно применить соотношение (13) [10]:

$$\lambda = \frac{B}{\alpha} \rho \quad (13)$$

где B – константа, обусловленная природой жидкой среды и ее влажностью; ρ – плотность экстракта, кг/м³; α – коэффициент, характеризующий степень ассоциации [10].

Важным аспектом выявления рациональных режимных показателей влагоудаления из арбузного геля и размеров рабочей зоны обезвоживания является соотношение расходов теплового носителя и объекта сушки при заданном виде его слоя: плотный, псевдооживленный и др. [15, 16]. Расчет данного соотношения опирается на материальные и тепловые балансовые соотношения, кинетические уравнения и статические зависимости, определяемые 3-мя термодинамическими началами [17–20]. В них включены коэффициенты тепло- (α) и массоотдачи (β).

Анализ большого количества публикаций в РФ и за рубежом по определению коэффициентов тепло- (α) и массоотдачи (β) не дает однозначного подхода к данному вопросу [17]. Принято, что минимальные величины $\alpha = 10\text{--}50$ Вт/(м²·К) присущи теплообмену с газовыми средами. Что касается водных и жидких сред, то диапазон варьирования коэффициента теплоотдачи другой: $\alpha = 200\text{--}10000$. Это говорит в пользу того, что эффективность теплообмена с газовой

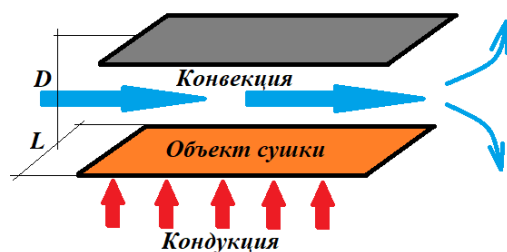


Рисунок 4. Плоский зазор между объектом сушки и верхней частью сушильной камеры

Figure 4. Flat gap between the drying object and the top of the drying chamber

средой наименее интенсивна, что целесообразно принять во внимание в процессе изучения операции сушки арбузного полуфабриката.

В рекомендованных вариантах сушки исследуемого полуфабриката предполагается обезвоживание его слоя на поверхности вальца или плоского транспортера. С теплофизической точки зрения в обоих случаях рассматривается вариант комбинированного энергоподвода, осуществляемый путем конвекции с внешней стороны слоя и его кондукции с внутренней стороны при контакте с нагретой конвейерной лентой или поверхностью вальца (рис. 4). Это говорит в пользу того, что для расчета теплотехнических параметров сушки объекта исследования, в частности коэффициента теплоотдачи, можно использовать апробированную методику, изложенную в работе [21].

Ниже приведены критериальные уравнения, описывающие конвективную теплоотдачу в зазоре между двумя плоскими поверхностями (рис. 4) в условиях вынужденного движения среды в нем. Зазор образован двумя параллельными плоскостями с определяющим размером L в направлении движения потока среды и расстоянием D между плоскостями.

Если число Рейнольдса с определяющим размером L принадлежит диапазону значений от 2×10^2 до $1,2 \times 10^5$, то критериальное уравнение для числа Нуссельта Nu записывается следующим образом:

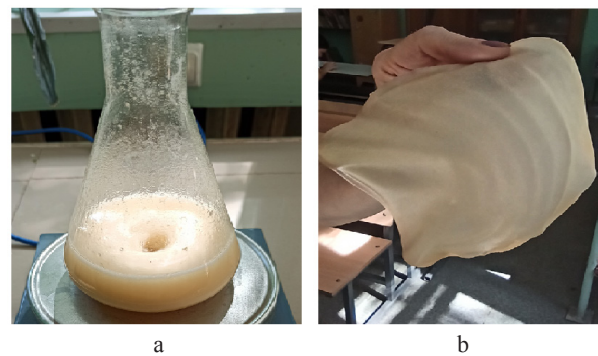


Рисунок 5. Фотографии арбузного полуфабриката (a) и полученной из нее пленочной структуры (b)

Figure 5. Semi-finished watermelon product (a) and watermelon film (b)

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_{sr}} = 1,35 \left(\frac{L}{D \cdot Re_D} \right)^{0,1} \cdot Re_L^{0,5} \cdot Pr_{sr}^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad (14)$$

где $Re_D = \frac{\rho_{sr} \omega_{sr} D}{\mu_{sr}}$; $Re_L = \frac{\rho_{sr} \omega_{sr} L}{\mu_{sr}}$; $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$; Re_D , Re_L и Pr_{sr} вычисляются при определенной температуре, равной температуре сушильного агента на входе в зазор; Pr_s вычисляется при средней температуре на поверхности объекта сушки; ω_{sr} – интенсивность движения теплового носителя, м/с; ρ_{sr} – его плотность, кг/м³; μ_{sr} – его динамическая вязкость, Па·с; λ_{sr} – для теплоносителя, Вт/(м·К); ν – кинематическая вязкость для теплоносителя, м²/с; α – коэффициент температуропроводности сушильного агента, м²/с; L – ширина вальца или транспортирующей ленты, м; D – расстояние между объектом сушки и верхней частью сушильной камеры, м.

Если скорость движения теплоносителя и определяющий размер зазора таковы, что $Re_L > 1,2 \times 10^5$, то для вычисления безразмерного комплекса Nu потребуется уравнение, представленное ниже:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_{sr}} = 0,037 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr_{sr}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad (15)$$

Результаты и их обсуждение

На рисунке 5 показаны фотоснимки жидкого

Таблица 1. Плотность жидкого полуфабриката и сухой пищевой пленки

Table 1. Density of liquid semi-finished product and dry film

Наименование	Плотность ρ , кг/м ³
Арбузный полуфабрикат, полученный из пектинового экстракта, концентрация сухих веществ 9 %	1028 ± 3
Полимерный материал, полученный методом конвективной сушки арбузного полуфабриката, концентрация сухих веществ 90 %	652 ± 3

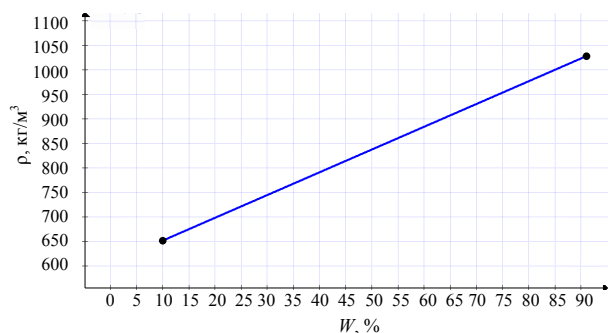


Рисунок 6. Зависимость физической плотности объекта изучения в пределах варьирования W от 0,1 до 0,91 кг/кг и $T = 273\text{--}363$ °K

Figure 6. Dependence of the physical density within the variation range of W from 0.1 to 0.91 kg/kg and $T = 273\text{--}363$ °K

арбузного полуфабриката при доле сухого остатка в нем 9 %, а также полученной из него влагоудалением пленочной структуры с влажностью 10 %.

Опытные данные по нахождению плотности жидкого полуфабриката ρ и конечного пленочного материала сведены в таблице 1.

На рисунке 6 показана зависимость физической плотности объекта изучения в пределах варьирования влажности W от 0,1 до 0,91 кг/кг и $T = 273\text{--}363$ °K.

Данная зависимость линейно аппроксимирована для $0,1 \leq W \leq 0,91$ кг/кг и действует в интервале температур от 273 до 363 °K:

$$\rho = 4,64W + 605,6 \quad (16)$$

Для арбузного полуфабриката при $W = 91$ % получены величины ТФХ, представленные в таблице 2.

Опытные данные по нахождению теплоемкости полуфабриката c_M при варьировании влажности в образце W сведены в таблице 3. Дальнейшее изменение c_M было получено при использовании методов экстра- или интерполяции.

На рисунке 7 показан результат графической аппроксимации зависимости c_M в пределах варьирования $T = 273\text{--}363$ °K и W от 0,1 до 0,91 кг/кг.

Линейная зависимость (рис. 7) получена путем аппроксимации эмпирических точек при: $0,1 \leq W \leq 0,91$ кг/кг и T от 273 до 363 °K:

$$c_M = 8,97W + 2622 \quad (17)$$

Таблица 2. Результаты по опытному нахождению ТФХ объекта изучения

Table 2. Results of experimental finding of the thermophysical characteristics of the object of study

W , %	c_M , Дж/(кг·K)	$\alpha \times 10^8$, м²/с	λ , Вт/(м·K)
≈ 91	≈ 3 439	≈ 11,59	≈ 0,41

Таблица 3. Значения коэффициента теплоемкости жидкого полуфабриката при разных влажностях

Table 3. Coefficient of heat capacity of the liquid semi-finished product at different humidity

Влажность образца, %	Удельная теплоемкость c_M , Дж/(кг·K)
91	3439
80	3393
70	3225
60	3137
50	3113

В соотношении (13) параметр B , обобщенный для множества жидких пищевых систем, целесообразно откорректировать для изучаемого продукта путем добавления поправочного коэффициента B_{non} , найденного посредством корреляции опытного и вычисленного по соотношению (18) параметров при равнозначных влажностях [10].

$$B_{non} = \frac{A_T \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{M^{\frac{1}{3}}} \quad (18)$$

где $A_T = 0,428 \times 10^{-7}$ – инвариант, зависящий от температуры жидкой среды без учета ее природы [10]; $M = 18$ – молярная масса жидкой основы полуфабриката.

Подставив зависимость (18) в уравнение (13), получим:

$$\lambda = \frac{A_T' \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{\alpha} \quad (19)$$

где $A_T' = \frac{0,428}{18^{\frac{1}{3}}} \times 10^{-7} = 0,1633 \times 10^{-7}$ – инвариант, который определяется температурой жидкости и зависит от ее вида.

Зная значения λ , c_M и ρ для влажности полуфабриката, равной 91 %, найдем из уравнения

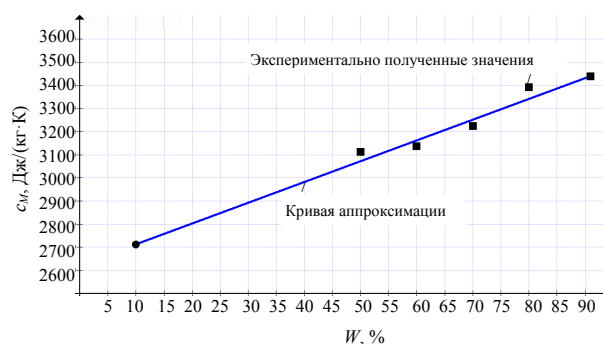


Рисунок 7. График зависимости теплоемкости объекта исследования от его влажности в интервале температур 273–363 °K

Figure 7. Effect of humidity on heat capacity at 273–363°K

(19) величину, характеризующую степень ассоциации, т. е. α :

$$\alpha = \frac{A_T' \cdot c_M \cdot \rho^{\frac{1}{3}}}{\lambda} \rho = \frac{0,1633 \times 10^{-7} \cdot 3439 \cdot 1028^{\frac{1}{3}}}{0,41} 1028 = 1,4211$$

Определив величину α , запишем математическую зависимость искомой теплофизической характеристики λ от ее влажности W в следующем виде:

$$\lambda(W) = \frac{A_T' \cdot c_M(W) \cdot \rho(W)^{\frac{1}{3}}}{\alpha} \rho(W) \quad (20)$$

или

$$\lambda(W) = A_T'' \cdot c_M(W) \cdot \rho(W)^{\frac{1}{3}} \cdot \rho(W) \quad (21)$$

где $A_T'' = A_T' / \alpha = 0,1149 \times 10^{-7}$.

На рисунке 8 показана зависимость $\lambda(W)$ при $T = 273\text{--}363$ °K и W от 0,1 до 0,91 кг/кг.

Коэффициент температуропроводности для заданных пределов варьирования W исследуемого гидрогеля от 0,1 до 0,91 кг/кг определяется как $\alpha(W) = \frac{\lambda(W)}{c(W)\rho(W)}$. На рисунке 9 представлен график этой зависимости для исследуемого продукта в заданных пределах варьирования W и T .

Учитывая, что целесообразным способом сушки исследуемого полуфабриката является обезвоживание с комбинированным кондуктивно-конвективным энергоподводом, то для получения высококачественного конечного продукта максимально возможная температура сушильного агента не должна превышать 100 °C. Его максимальная скорость после проведения постановочных экспериментов не может быть выше 2,7 м/с, направленная прямо- или противотоком. Следует отметить, что превышение порогового значения скорости сушильного агента приводит к деформации поверхностного слоя, а также вероятности уноса геля (сдувание) с рабочей поверхности сушилки. При этом такие величины скорости рекомендуются для

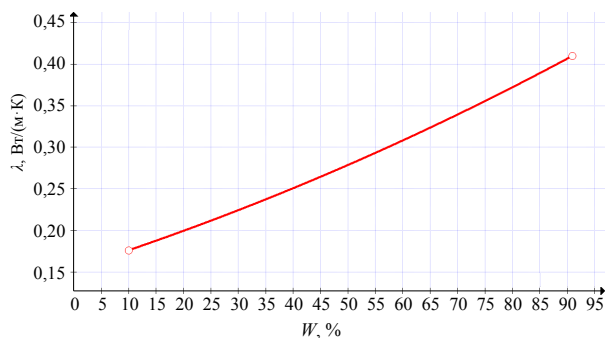


Рисунок 8. Зависимость $\lambda(W)$ при $T = 273\text{--}363$ °K и W от 0,1 до 0,91 кг/кг

Figure 8. Dependence of $\lambda(W)$ at $T = 273\text{--}363$ °K and $W = 0.1\text{--}0.91$ kg/kg

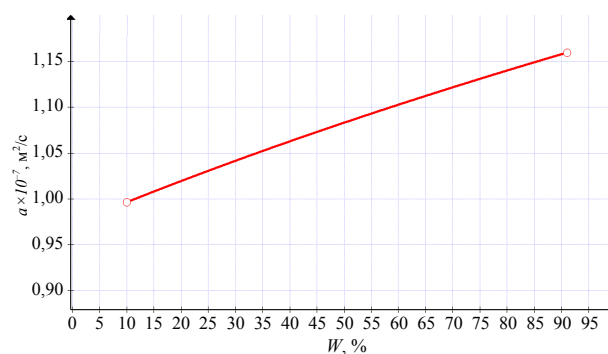


Рисунок 9. Зависимость коэффициента температуропроводности геля от его влажности при $T = 273\text{--}363$ °K

Figure 9. Effect of moisture content on thermal diffusivity of the gel at $T = 273\text{--}363$ °K

промышленных ленточных и вальцовых конвективных сушилок [22–27]. По ГОСТ 20-85 и ГОСТ 22644-77 значение величины L можно ограничить стандартной шириной ленты в 500 мм, т. к. в ТУ на пищевые полимерные пленки их максимальная рациональная ширина не превышает 400 мм [28]. Представленные сведения позволяют вычислить максимальное значение критерия Re_L и выбрать необходимую формулу для расчета критерия Nu .

В таблице 4 представлены сведения для расчета максимального значения безразмерного комплекса Re_L .

В итоге $Re_L = 58315$, что меньше $1,2 \times 10^5$. Следовательно, для вычисления безразмерного комплекса Nu потребуется уравнение (14), рассчитав которое при разных условиях сушки, получим диапазон варьирования α . Для его упрощения и представления в более компактной форме проведем математическое преобразование и коррекцию численного коэффициента в уравнении (14). В результате получим следующее выражение для расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = 4,35 \left(\frac{\rho_{sr} \omega_{sr}}{L} \right)^{0,4} \cdot \frac{\lambda_{sr}^{0,67} \cdot c_{sr}^{0,33}}{\mu_{sr}^{0,07} \cdot D^{0,2}} \cdot \Psi^{0,25} \quad (22)$$

где $\Psi = \frac{Pr_{sr}}{Pr_s}$; c_{sr} – коэффициент теплоемкости сушильного агента, Дж/(кг·K).

Величина D в уравнении (22), т. е. расстояние

Таблица 4. Значения величин ω_{sr} , L , ρ_{sr} и μ_{sr} для расчета критерия Рейнольдса [29]

Table 4. Values of ω_{sr} , L , ρ_{sr} and μ_{sr} for calculating the Reynolds criterion [29]

t , °C	ω_{sr} , м/с	μ_{sr} , Па·с	ρ_{sr} , кг/м³	L , м
100	2,7	$21,9 \times 10^{-6}$	0,946	0,5

Таблица 5. Данные для расчета симплекса Ψ и результат расчета [30]Table 5. Calculating the Ψ simplex [30]

$t, ^\circ\text{C}$	Наименование	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$\alpha, \text{м}^2/\text{с}$	Ψ
100	Сушильный агент	$23,13 \times 10^{-6}$	$33,6 \times 10^{-6}$	0,986
80	Арбузный полуфабрикат	$21,09 \times 10^{-6}$	$30,2 \times 10^{-6}$	

Таблица 6. Значения величин C_{sr} и λ_{sr} для расчета коэффициента теплоотдачи [30]Table 6. Values of C_{sr} and λ_{sr} for calculating the heat transfer coefficient [30]

$t, ^\circ\text{C}$	$C_{sr}, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\lambda_{sr}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
100	1009	0,0321	26,53

между поверхностью объекта сушки и верхней внутренней поверхностью корпуса сушильной камеры, в аспекте уменьшения габаритов сушилки должна быть минимальной, но не менее 100 мм, согласно техническим рекомендациям по проектированию агрегатов для обезвоживания [23, 26, 27]. В этой связи рекомендуемое значение D , равное 100 мм, обусловленное минимизацией возможного загрязнения внутренней поверхности рабочей камеры, было принято как исходное при проведении исследований и проектирования технологического оборудования. При росте интенсивности влагоудаления в случае увеличения скорости теплоносителя в сушильной камере целесообразно из-за варьирования этого параметра принять ее величину 2,5 м/с.

Расчет симплекса Ψ в уравнении (22) связан с выявлением средней температуры на поверхности объекта сушки, которая, как и температура теплоносителя, является важным параметром процедуры обезвоживания, т. к. влияет на интенсивность этого процесса в любой из его стадий. Влияние температуры определяется как увеличением потенциала влагоудаления (психрометрическая разница T) при ее росте, так и резким ростом интенсивности внутреннего массопереноса при увеличении теплопроводности объекта излучения [22, 24].

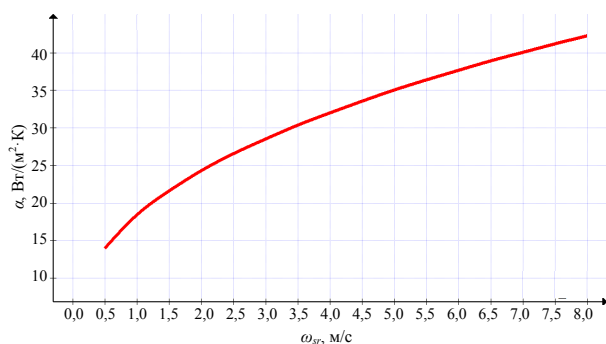


Рисунок 10. График зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости сушильного агента при его температуре 100 °C

Figure 10. Effect of drying agent speed on heat transfer coefficient at 100 °C

Результаты экспериментальных исследований процесса сушки пищевых материалов могут быть представлены в виде зависимостей средних значений температуры объектов обезвоживания от продолжительности. При этом их характер для большинства высоковлажных материалов типичен [29]. Анализ выводов, обоснованных в работах [24, 29], показывает, что для большинства промышленно реализуемых процессов сушки пищевых материалов характерно отличие температуры сушильного агента от температуры объекта сушки на 15–20 %.

Таким образом, с приемлемой погрешностью возможно принять, что среднее значение температуры на поверхности объекта сушки, которая является важным параметром процедуры обезвоживания, будет меньше температуры сушильного агента на 20 %, т. е. составлять 80 °C. Такое заключение позволяет вычислить значение симплекса Ψ . В таблице 5 представлен результат расчета и данные для его вычисления (кинематическая вязкость ν и коэффициент температуропроводности α сушильного агента).

В соотношении (22) значения практически всех величин, входящих в него, уже известны (табл. 5), кроме коэффициентов теплоемкости C_{sr} и теплопроводности λ_{sr} сушильного агента. В таблице 6 представлены эти параметры и результат расчета коэффициента теплоотдачи α .

Для наглядности и удобства использования, при исключении математических операций, на рисунке 10 показана зависимость α от скорости сушильного агента (воздух) ω_{sr} в случае искусственной конвекции и традиционно применяемой температуры теплоносителя (≈ 100 °C) в контакте с поверхностью пищевого продукта (≈ 80 °C).

Выводы

В результате проведения исследований по нахождению теплофизических параметров арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления получены следующие данные:

- усредненные величины плотности жидкого полуфабриката – 1028 кг/м³ и конечного пленочного материала – 652 кг/м³;
- зависимость физической плотности объекта

изучения в пределах варьирования влажности W от 0,1 до 0,91 кг/кг и $T = 273\text{--}363\text{ }^{\circ}\text{K}$ – $\rho = 4,64W + 605,6$; – величины теплофизических характеристик для арбузного полуфабриката при $W = 91\%$: $c_M = 3439$ Дж/(кг·К); $\alpha = 11,59 \times 10^{-8}$ м²/с; $\lambda = 0,41$ Вт/(м·К); – усредненные значения удельной теплоемкости c_M для арбузного полуфабриката при различных W (80, 70, 60 и 50 %) – 3393, 3225, 3137 и 3113 Дж/(кг·К) соответственно; – зависимость удельной теплоемкости объекта изучения в пределах варьирования влажности W от 0,1 до 0,91 кг/кг и $T = 273\text{--}363\text{ }^{\circ}\text{K}$ – $c_M = 8,97W + 2622$; – зависимость коэффициента теплопроводности объекта изучения в пределах варьирования влажности W от 0,1 до 0,91 кг/кг и $T = 273\text{--}363\text{ }^{\circ}\text{K}$ – $\lambda(W) = A_T'' \cdot c_M(W) \cdot \rho(W)^{\frac{1}{3}} \cdot \rho(W)$, где $A_T'' = A_T' / \alpha = 0,1149 \times 10^{-7}$; – зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости сушильного агента (воздух) ω_{sr} в случае искусственной конвекции и традиционно применяемой температуры теплоносителя ($\approx 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) в контакте с поверхностью пищевого продукта ($\approx 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) – $\alpha = 4,35 \left(\frac{\rho_{sr} \omega_{sr}}{L} \right)^{0,4} \cdot \frac{\lambda_{sr}^{0,67} \cdot c_{sr}^{0,33}}{\mu_{sr}^{0,07} \cdot D^{0,2}} \cdot \Psi^{0,25}$. Все входящие в уравнение члены для теплоносителя известны (расшифровка символов и численные значения параметров представлены в разделе статьи «результаты и их обсуждение») и постоянны, кроме скорости, которая варьируется от 0,5 до 8 м/с.

Таким образом, с целью проведения расчетных процедур при проектировании агрегатов для сушки теоретически и опытным путем найдены ТФХ и физическая плотность арбузного геля в определенных пределах варьирования влажности и параметров теплового агента. Кроме того, была скорректирована и модифицирована критериальная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи с учетом известных литературных

данных и авторских тестирующих экспериментов. Это позволило рассчитать искомый коэффициент в зависимости от варьирования влияющих на него физических параметров.

Критерии авторства

А. Х.-Х. Нугманов руководил научной работой. Г. С. Мещерякова, Е. В. Соколова и В. А. Лебедев составляли план экспериментов, сконпоновывали лабораторные стенды и проводили опытные серии, табулировали полученные данные и получали их графическую интерпретацию. Д. М. Бородулин участвовал в оценке актуальности и постановке задач исследования, обсуждении его результатов, а также вносил редакционные правки с учетом требований к публикации. И. Ю. Алексанян проводил математическую обработку полученных данных и оценивал адекватность проведенных экспериментальных исследований к известным научно-техническим результатам в рассматриваемой области.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.H.-H. Nugmanov supervised the research. G.S. Meshcheryakova, E.V. Sokolova, and V.A. Lebedev planned the experiments, arranged the laboratory stands, carried out experiments, tabulated the obtained data, and compiled their graphic interpretation. D.M. Borodulin assessed the relevance, set the research objectives, discussed the results, and proofread the manuscript. I.Yu. Aleksanian processed the data and assessed the adequacy of the experimental research.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Хатко З. Н., Ашинова А. А. Пектиносодержащие пленочные структуры. Майкоп: Майкопский государственный технологический университет, 2019. 112 с.
2. Modelling formation and removal of biofilms in secondary dairy raw materials / S. A. Ryabtseva [et al.] // *Foods and Raw Materials*. 2021. Vol. 9. № 1. P. 59–68. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-59-68>.
3. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review / L. R. Adetunji [et al.] // *Food Hydrocolloids*. 2017. Vol. 62. P. 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015>.
4. Effect of rootstock on growth dynamics and yield components of early watermelon cultivars / N. Toth [et al.] // *Acta Horticulturae*. 2021. Vol. 1320. P. 355–362. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1320.47>.
5. Rahman M. M., Joardder M. U. H., Karim A. Non-destructive investigation of cellular level moisture distribution and morphological changes during drying of a plant-based food material // *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 169. P. 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.007>.

6. Zielinska M., Ropelewska E., Markowski M. Thermophysical properties of raw, hot-air and microwave-vacuum dried cranberry fruits (*Vaccinium macrocarpon*) // LWT. 2017. Vol. 85. P. 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.016>.
7. An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables / T. B. Roratto [et al.] // LWT. 2021. Vol. 140. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110777>.
8. The method and the device for measuring thermophysical properties of liquids / A. Divin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 693. № 1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/693/1/012020>.
9. Albouchi F., Abdelmajid J. Photothermal investigations of conductive and optical properties of liquids in the near infrared // Instrumentation Measure Metrologie. 2021. Vol. 20. № 1. P. 49–56. <https://doi.org/10.18280/I2M.200107>.
10. Определение теплофизических характеристик тропических фруктов для использования их при производстве сухих молочных продуктов / И. А. Короткий [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 220–231. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-220-231>.
11. Jafari S. M., Saremnejad F., Dehnad D. Nano-fluid thermal processing of watermelon juice in a shell and tube heat exchanger and evaluating its qualitative properties // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2017. Vol. 42. P. 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.003>.
12. El Matarawy A., El-Dien E. M. Precise temperature controlling algorithm for metrological adiabatic calorimeters based on proportional-integration (α) thermal energy // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10806-2>.
13. Morphological, textural and physico-chemical characterization of processed meat products during their shelf life / E. Melro [et al.] // Food Structure. 2020. Vol. 26. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2020.100164>.
14. Исследование теплоемкости пастообразных пищевых продуктов / А. Х.-Х. Нугманов [и др.] // Естественные и технические науки. 2015. Т. 84. № 6. С. 487–489.
15. Study of granular food material drying in a pilot-scale rotating fluidized bed with static geometry dryer / P. Singh [et al.] // Recent advances in mechanical engineering: Select proceedings of ICRAME 2020 / editors K. M. Pandey [et al.]. Singapore: Springer, 2021. P. 555–562. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7711-6_55.
16. Physical properties of barley grains at hydration and drying conditions of malt production / G. R. Carvalho [et al.] // Journal of Food Process Engineering. 2021. Vol. 44. № 4. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13644>.
17. Hijjaji K., Gabsi S., Frikha N. Determination of heat and mass transfer coefficients in a spray humidifier humidification–dehumidification desalination system // Desalination and Water Treatment. 2021. Vol. 225. P. 392–401. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27218>.
18. Reinhardt A., Cheng B. Quantum-mechanical exploration of the phase diagram of water // Nature Communications. 2021. Vol. 12. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20821-w>.
19. Encapsulation of *Lactobacillus casei* in quince seed gum-alginate beads to produce a functional synbiotic drink powder by agro-industrial by-products and freeze-drying / M. Jouki [et al.] // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 120. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106895>.
20. Özbek H. N. Radio frequency-assisted hot air drying of carrots for the production of carrot powder: Kinetics and product quality // LWT. 2021. Vol. 152. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112332>.
21. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer of *Lavandula x allardii* leaves during non-isothermal convective drying / V. Chasiotis [et al.] // Journal of Food Engineering. 2021. Vol. 311. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110708>.
22. Mathematical model of high-temperature tubeshaped pasta drying in a conveyer belt drier / A. N. Ostrikov [et al.] // International Journal of Food Engineering. 2021. Vol. 17. № 3. P. 209–215. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0101>.
23. Parameters of the drying medium and dried hops in belt dryer / A. Rybka [et al.] // Research in Agricultural Engineering. 2017. Vol. 63. P. S24–S32. <https://doi.org/10.17221/35/2017-RAE>.
24. Water leakage control by using vibratory roller on a dry-seeded rice field in southwestern Japan / K. Fukami [et al.] // Soil and Tillage Research. 2017. Vol. 166. P. 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.011>.
25. Neuro-fuzzy modeling of a conveyor-belt grain dryer / O. F. Lutfy [et al.] // Journal of Food, Agriculture and Environment. 2010. Vol. 8. № 3–4. P. 128–134.
26. Kamata T., Wada K., Ichikawa H. Dry pre-coating of active pharmaceutical ingredient with submicron-sized hydroxypropylcellulose in dry granulation using roller compactor improves granule properties // Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2018. Vol. 43. P. 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.08.009>.
27. Friso D. Conveyor-belt dryers with tangential flow for food drying: Mathematical modeling and design guidelines for final moisture content higher than the critical value // Inventions. 2020. Vol. 5. № 2. <https://doi.org/10.3390/inventions5020022>.
28. Технические условия на пленки полимерные для пищевой промышленности. URL: <https://всероссийская-база-гу.рф/tekhnicheskie-usloviya-na-pljonki-polimernye-dlya-pishchevoj-produktsii> (дата обращения: 02.07.2021).
29. Effects of maltodextrin content in double-layer emulsion for production and storage of spray-dried carotenoid-rich microcapsules / M. L. F. F. Ribeiro [et al.] // Food and Bioprocess Processing. 2020. Vol. 124. P. 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.004>.

30. Computational analysis of the thermal performance of rarefied air flow in V-shaped microchannels / M. Hader [et al.] // *Heat Transfer*. 2021. Vol. 50. № 4. P. 3977–3995. <https://doi.org/10.1002/htj.22060>.

References

1. Khatko ZN, Ashinova AA. Pektinosoderzhashchie plenochnye struktury [Pectin-containing film structures]. Maykop: Maykop State Technological University; 2019. 112 p. (In Russ.).
2. Ryabtseva SA, Tabakova YuA, Khramtsov AG, Anisimov GS, Kravtsov VA. Modelling formation and removal of biofilms in secondary dairy raw materials. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(1):59–68. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-59-68>.
3. Adetunji LR, Adekunle A, Orsat V, Raghavan V. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. *Food Hydrocolloids*. 2017;62:239–250. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015>.
4. Toth N, Sedlar A, Radman S, Fabek Uher S, Zutic I, Benko B. Effect of rootstock on growth dynamics and yield components of early watermelon cultivars. *Acta Horticulturae*. 2021;1320:355–362. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1320.47>.
5. Rahman MM, Joardder MUH, Karim A. Non-destructive investigation of cellular level moisture distribution and morphological changes during drying of a plant-based food material. *Biosystems Engineering*. 2018;169:126–138. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.007>.
6. Zielinska M, Ropelewska E, Markowski M. Thermophysical properties of raw, hot-air and microwave-vacuum dried cranberry fruits (*Vaccinium macrocarpon*). *LWT*. 2017;85:204–211. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.016>.
7. Roratto TB, Monteiro RL, Carciofi BAM, Laurindo JB. An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables. *LWT*. 2021;140. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110777>.
8. Divin A, Ponomarev S, Petrasheva M, Lyubimova D, Mozgova G, Belyaev P, et al. The method and the device for measuring thermophysical properties of liquids. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;693(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/693/1/012020>.
9. Albouchi F, Abdelmajid J. Photothermal investigations of conductive and optical properties of liquids in the near infrared. *Instrumentation Measure Metrologie*. 2021;20(1):49–56. <https://doi.org/10.18280/I2M.200107>.
10. Korotkiy IA, Neverov EN, Vladimirov AA, Neverova OA, Proskuryakova LA. Thermophysical characteristics of tropical fruits in milk powder products. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(2):220–231. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-220-231>.
11. Jafari SM, Saremnejad F, Dehnad D. Nano-fluid thermal processing of watermelon juice in a shell and tube heat exchanger and evaluating its qualitative properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2017;42:173–179. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.003>.
12. El Matarawy A, El-Dien EM. Precise temperature controlling algorithm for metrological adiabatic calorimeters based on proportional-integration (α) thermal energy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10806-2>.
13. Melro E, Antunes F, Cruz I, Ramos PE, Carvalho F, Alves L. Morphological, textural and physico-chemical characterization of processed meat products during their shelf life. *Food Structure*. 2020;26. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2020.100164>.
14. Nugmanov AKh-Kh, Krasnov VA, Maksimenko YuA, Fomenko EV. Issledovanie teploemkosti pastoobraznykh pishchevykh produktov [Heat capacity of pasty food products]. *Natural and Technical Sciences*. 2015;84(6):487–489. (In Russ.).
15. Singh P, Kalita P, Mahanta P, Das HJ. Study of granular food material drying in a pilot-scale rotating fluidized bed with static geometry dryer. In: Pandey KM, Misra RD, Patowari PK, Dixit US, editors. *Recent advances in mechanical engineering: Select proceedings of ICRAE 2020*. Singapore: Springer; 2021. pp. 555–562. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7711-6_55.
16. Carvalho GR, Polachini TC, Augusto PED, Telis-Romero J, Bon J. Physical properties of barley grains at hydration and drying conditions of malt production. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(4). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13644>.
17. Hijjaji K, Gabsi S, Frikha N. Determination of heat and mass transfer coefficients in a spray humidifier humidification–dehumidification desalination system. *Desalination and Water Treatment*. 2021;225:392–401. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27218>.
18. Reinhardt A, Cheng B. Quantum-mechanical exploration of the phase diagram of water. *Nature Communications*. 2021;12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20821-w>.
19. Jouki M, Khazaei N, Rashidi-Alavijeh S, Ahmadi S. Encapsulation of *Lactobacillus casei* in quince seed gum-alginate beads to produce a functional synbiotic drink powder by agro-industrial by-products and freeze-drying. *Food Hydrocolloids*. 2021;120. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106895>.
20. Özbek HN. Radio frequency-assisted hot air drying of carrots for the production of carrot powder: Kinetics and product quality. *LWT*. 2021;152. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112332>.
21. Chasiotis V, Tzempelikos D, Mitrakos D, Filios A. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer of *Lavandula x allardii* leaves during non-isothermal convective drying. *Journal of Food Engineering*. 2021;311. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110708>.

22. Ostrikov AN, Ospanov AA, Shevtsov AA, Muslimov NZh, Timurbekova AK, Jumabekova GB. Mathematical model of high-temperature tubeshaped pasta drying in a conveyer belt drier. *International Journal of Food Engineering*. 2021;17(3):209–215. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0101>.
23. Rybka A, Heřmánek P, Honzík I, Krofta K. Parameters of the drying medium and dried hops in belt dryer. *Research in Agricultural Engineering*. 2017;63:S24–S32. <https://doi.org/10.17221/35/2017-RAE>.
24. Fukami K, Mukunoki T, Nakano K, Matsuo N, Okayasu T. Water leakage control by using vibratory roller on a dry-seeded rice field in southwestern Japan. *Soil and Tillage Research*. 2017;166:138–146. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.011>.
25. Lutfy OF, Mohd Noor SB, Marhaban MH, Abbas KA, Mansor H. Neuro-fuzzy modeling of a conveyor-belt grain dryer. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2010;8(3–4):128–134.
26. Kamata T, Wada K, Ichikawa H. Dry pre-coating of active pharmaceutical ingredient with submicron-sized hydroxypropylcellulose in dry granulation using roller compactor improves granule properties. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2018;43:34–43. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.08.009>.
27. Friso D. Conveyor-belt dryers with tangential flow for food drying: Mathematical modeling and design guidelines for final moisture content higher than the critical value. *Inventions*. 2020;5(2). <https://doi.org/10.3390/inventions5020022>.
28. Tekhnicheskie usloviya na plenki polimernye dlya pishchevoy promyshlennosti [Specifications for polymer films in food industry] [Internet]. [cited 2021 Jul 02]. Available from: <https://всеобщий-база-ту.рф/tekhnicheskie-usloviya-na-plonki-polimernye-dlya-pishchevoj-produktsii>.
29. Ribeiro MLFF, Roos YH, Ribeiro APB, Nicoletti VR. Effects of maltodextrin content in double-layer emulsion for production and storage of spray-dried carotenoid-rich microcapsules. *Food and Bioprocess Processing*. 2020;124:208–221. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.004>.
30. Hader M, Al-Kouz W, Kiwan S, Alshare A, Chamkha A. Computational analysis of the thermal performance of rarefied air flow in V-shaped microchannels. *Heat Transfer*. 2021;50(4):3977–3995. <https://doi.org/10.1002/htj.22060>.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» предназначен для публикации статей, посвященных проблемам пищевой и смежных отраслей промышленности.

Статья должна отвечать профилю журнала, обладать научной новизной, публиковаться впервые.

Рукопись научной статьи, поступившая в редакцию журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)», рассматривается ответственным за выпуск на предмет соответствия профилю журнала, требования к оформлению, проверяется оригинальность представленного текста в системе «Антиплагиат», регистрируется.

В журнале публикуются только рукописи, текст которых рекомендован рецензентами.

Редакция организует «двухстороннее слепое» (анонимное) рецензирование представленных рукописей с целью их экспертной оценки. Выбор рецензента осуществляется решением главного редактора или его заместителя. Для проведения рецензирования рукописей статей в качестве рецензентов могут привлекаться как члены редакционной коллегии журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)», так и высококвалифицированные ученые и специалисты других организаций и предприятий, обладающие глубокими профессиональными знаниями и опытом работы по конкретному научному направлению, как правило, доктора наук, профессора. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи.

Рецензенты уведомляются о том, что присланные им рукописи являются частной собственностью авторов и относятся к сведениям, не подлежащим разглашению. Рецензентам не разрешается делать копии статей для своих нужд. Рецензирование проводится конфиденциально. Нарушение конфиденциальности возможно только в случае заявления рецензента о недостоверности или фальсификации материалов, изложенных в статье.

Срок рассмотрения статьи не должен превышать трех месяцев со дня получения статьи на рецензирование.

Оригиналы рецензий хранятся в издательстве и в редакции издания в течение пяти лет со дня публикации статей.

Если в рецензии на статью имеется указание на необходимость ее исправления, то статья направляется автору на доработку.

Если статья по рекомендации рецензента подверглась значительной авторской переработке, то она направляется на повторное рецензирование тому же рецензенту, который сделал критические замечания.

Редакция оставляет за собой право отклонения статей в случае неспособности или нежелания автора учесть пожелания редакции.

При наличии отрицательных рецензий на рукопись от двух разных рецензентов или одной рецензии на ее доработанный вариант статья отклоняется от публикации без рассмотрения другими членами редколлегии. Автору не принятой к публикации статьи ответственный за выпуск направляет мотивированный отказ. Фамилия рецензента может быть сообщена автору лишь с согласия рецензента.

Решение о возможности публикации после рецензирования принимается главным редактором, а при необходимости – редколлекцией в целом.

Редакция журнала направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

Редакция журнала не хранит рукописи, не принятые к печати. Рукописи, принятые к публикации, не возвращаются. Рукописи, получившие отрицательный результат от рецензента, не публикуются и также не возвращаются обратно автору.

Рукописи печатаются, как правило, в порядке очередности их поступления в редакцию. В исключительных случаях, редакционная коллегия имеет право изменить очередность публикации статей.

Все материалы журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» распространяются на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Объем статьи должен быть не менее 20–25 тыс. знаков (не включая списки литературы на русском и английском языках). Объем обзорной рукописи – более 25 тыс. знаков.

Оформление текста (форматирование): поля по 20 мм, одинарный интервал без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов, шрифт Times New Roman, 10 кегль. Следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, дублирования одних и тех же результатов в таблицах и графиках.

Графики, диаграммы и т. п. (желательно цветные), созданные средствами Microsoft Office и Corel Draw, должны допускать возможность редактирования и направляются в редакцию отдельными файлами в форматах tiff, jpeg, cdr, excel.

Каждая таблица, график, диаграмма и т. п. должны иметь заголовки и порядковые номера, в тексте статьи должны присутствовать ссылки на каждую из них.

Структура статьи:

1. Индекс УДК, тип статьи;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилии всех авторов;
4. Официальное полное название учреждения;
5. E-mail автора, с которым следует вести переписку;
6. Аннотация (разбивается на разделы: «Введение», «Объекты и методы исследований», «Результаты и их обсуждение», «Выводы»);
7. Ключевые слова;
8. Финансирование;
9. Текст статьи (обязательные разделы: «Введение», «Объекты

и методы исследований», «Результаты и их обсуждение», «Выводы»);

10. Критерий авторства;
11. Конфликт интересов;
12. Благодарности;
13. Список литературы;
14. Список литературы (References);
15. Сведения об авторах (на русском и английском языках).

Подать рукопись можно на сайте журнала <http://fppt.ru> или отправив на e-mail fppt98@gmail.com

В редакцию предоставляются:

1. Электронная версия статьи в программе MSWord. Файл статьи следует назвать по фамилии первого автора – ПетровГП.doc. Не допускается в одном файле помещать несколько документов;
2. Сканированная электронная версия статьи, подписанная всеми авторами, в программе PDF. Файл статьи следует назвать по фамилии первого автора – ПетровГП.pdf. Не допускается в одном файле помещать несколько документов;
3. Гарантийное письмо (скан-копия) на имя главного редактора журнала на бланке направляющей организации с указанием даты регистрации и исходящего номера, с заключением об актуальности работы и рекомендациями к опубликованию, с подписью руководителя учреждения;
4. Издательский лицензионный договор.

Более подробная информация на сайте журнала «Техника и технология пищевых производств (Food Processing: Techniques and Technology)» <http://fppt.ru>.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4><http://fptt.ru/>

Колонка редактора	653	Быстров Д. И. Биологически активные вещества порошков из плодов барбариса и калины	779
Просяков А. Ю., Алтшуллер О. Г., Курбанова М. Г. Исследование качества и безопасности мяса диких животных, полученного в условиях биоценоза Белоосиповского ртутного месторождения (часть 2)	654	Стаценко Е. С., Литвиненко О. В., Кодирова Г. А., Кубанкова Г. В., Корнева Н. Ю., Покотило О. В. Разработка технологии производства кисломолочных напитков, обогащенных соевым белковым ингредиентом	784
Бухарев А. Г., Гаврилова Н. Б., Кригер О. В., Чернопольская Н. Л. Биотехнологические аспекты подготовки ферментированных сливок для обогащения творожного продукта пробиотическими культурами	664	Зенькова М. Л., Мельникова Л. А. Микробиологическая оценка процесса прорастивания зерна пшеницы и гречихи	795
Демченко Е. А., Савенкова Т. В., Мизинчикова И. И. Влияние жировых продуктов на качественные характеристики, пищевую ценность и хранимоспособность печенья	674	Асякина Л. К., Дышлюк Л. С., Просяков А. Ю. Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов	805
Иванова М. И., Янченко Е. В., Янченко А. В., Вирченко И. И. Качество и оптимальный срок лежкости капусты белокачанной позднего срока созревания	690	Кузьмина С. С., Козубаева Л. А., Егорова Е. Ю., Кулущаева Б. М., Смольникова Ф. Х. Активность дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> в условиях стресс-провокации плодово-ягодными экстрактами	891
Копылова А. В., Давыденко Н. И., Сапожников А. Н., Ульянова Г. С. Использование пряного растительного сырья в технологии заварного полуфабриката	701	Щербакова Н. А., Мистенева С. Ю., Руденко О. С., Кондратьев Н. Б., Баскаков А. В. Изучение влияния продуктов переработки овса на изменение качественных характеристик мучных кондитерских изделий	832
Куликова Е. И., Макаров С. С., Кузнецова И. Б., Чудецкий А. И. Особенности культивирования российских и зарубежных сортов жимолости съедобной (<i>Lonicera edulis</i> Turcz.) in vitro	712	Плотникова Л. В., Плотников И. Б., Иванов П. П., Семенов А. Г., Плотникова И. О., Плотников К. Б. Исследование способа интенсификации экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой	849
Оганесянц Л. А., Севостьянова Е. М., Кузьмина Е. И., Ганин М. Ю., Чебыкин Е. П., Сутурин А. Н. Изучение изотопного и химического состава глубинной воды озера Байкал	723	Флавянская А. А., Грибкова В. А., Николаева Н. В., Митрошина Д. П. Исследование возможности применения гранулированного сахаросодержащего продукта с функциональными добавками при производстве жележных начинок	859
Новикова А. Е., Скрыпник Л. Н. Оптимизация условий мицеллярно-ферментативной экстракции пектина из плодов боярышника (<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.)	733	Фотина Н. В., Емельяненко В. П., Воробьева Е. Е., Бурова Н. В., Остапова Е. В. Современные биологические методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса	869
Мизанбекова С. К., Богомолова И. П., Василенко И. Н., Уразова О. А. Инновационные технологии очистки сточных вод для ресурсосберегающей деятельности комбикормовых предприятий	743	Фасхутдинова Е. Р., Осинцева М. А., Неверова О. А. Перспективы использования микробиома почв угольных отвалов с целью ремедиации антропогенно нарушенных экосистем	883
Захаренко А. М., Кириченко К. Ю., Вахнюк И. А., Голохваст К. С. Применение технологии сверхкритической экстракции для получения полиненасыщенных кислот из морской звезды (<i>Lysastrosoma anthosticta</i> Fisher, 1922)	753	Титоренко Е. Ю., Трофимова Н. Б., Ермолаева Е. О., Трофимов И. Е., Брескин Л. И., Сурков И. В., Астахова Н. В. Разработка программного обеспечения процесса производства функциональных продуктов	905
Садыгова М. К., Гапонов С. Н., Шутарева Г. И., Цетва Н. М., Кириллова Т. В., Филина Д. К. Технологический потенциал зерна яровой твердой пшеницы Саратовской селекции	759	Терещук Л. В., Загородников К. А., Старовойтова К. В., Вьюшинский П. А. Изучение физико-химических показателей эмульгаторов и их влияния на процесс образования пищевых эмульсий	915
Руднев С. Д., Шевченко Т. В., Устинова Ю. В., Крюк Р. В., Иванов В. В., Чистяков А. М. Технологические особенности и теоретическое обоснование применения механически активированной воды в производстве мучных изделий	768	Нугманов А. Х.-Х., Мещерякова Г. С., Лебедев В. А., Бородулин Д. М., Алексанян И. Ю., Соколова Е. В. Теплофизические параметры арбузного полуфабриката как объекта влагоудаления	930
Дубцова Г. Н., Ломакин А. А., Кусова И. У., Буланникова Е. И.,			



CONTENTS



Editor's Column	653	Ekaterina I., Bystrov Dmitriy I. Biologically Active Substances from Powdered Barberry and Viburnum	779
Prosekov Alexander Yu., Altshuler Olga G., Kurbanova Marina G. Quality and Safety of Game Meat from the Biocenosis of the Beloosipovo Mercury Deposit (part 2)	654	Staatsenka Ekaterina S., Litvinenko Oksana V., Kodirova Galina A., Kubankova Galina V., Korneva Nadezhda Yu., Pokotilo Olesya V. Fermented Milk Beverages Fortified with Soy Protein	784
Bukharev Andrew G., Gavrilova Natalya B., Kriger Olga V., Chernopolskaya Natalya L. Fermented Cream for Curd Fortified with Probiotic Cultures: Biotechnological Aspects	664	Zenkova Mariya L., Melnikova Ludmila A. Microbiological Assessment of Wheat and Buckwheat Sprouting Process	795
Demchenko Elena A., Savenkova Tatiana V., Mizinchikova Inessa I. Effects of Oils and Fats on the Quality Characteristics, Nutritional Value, and Storage Capacity of Cookies	674	Asyakina Lyudmila K., Dyshlyuk Lyubov S., Prosekov Alexander Yu. Reclamation of Post-Technological Landscapes: International Experience	805
Ivanova Maria I., Yanchenko Elena V., Yanchenko Aleksey V., Virchenko Ivan I. Quality and Optimal Shelf Life of Late Season Green Cabbage	690	Kuzmina Svetlana S., Kozubaeva Lyudmila A., Egorova Elena Yu., Kulushsteyeva Botakoz M., Smolnikova Farida Kh. Effect of Berry Extracts on <i>Saccharomyces cerevisiae</i> Yeast	819
Kopylova Anastasiia V., Davydenko Nataliia I., Sapozhnikov Aleksandr N., Ulianova Galina S. Spicy Plant Raw Materials in Choux Dough	701	Shcherbakova Natalia A., Misteneva Svetlana Yu., Rudenko Oksana S., Kondrat'ev Nikolay B., Baskakov Andrew V. Effect of Oat-Based Ingredients on the Quality of Pastry Products	832
Kulikova Elena I., Makarov Sergey S., Kuznetsova Irina B., Chudetsky Anton I. Russian and Foreign Cultivars of Honeysuckle (<i>Lonicera edulis</i> Turcz.): cultivation studies in vitro	712	Plotnikova Liubov V., Plotnikov Igor B., Ivanov Pavel P., Semenov Andrey G., Plotnikova Irina O., Plotnikov Konstantin B. Extraction of Frozen Berry Raw Materials with a Vibration Tray Device	849
Oganesyants Lev A., Sevostianova Elena M., Kuzmina Elena I., Ganin Mikhail Yu., Chebykin Eugene P., Suturin Aleksandr N. Isotopic and Chemical Composition of the Deep Water of Lake Baikal	723	Slavyanskiy Anatoliy A., Gribkova Vera A., Nikolaeva Natalia V., Mitroshina Daria P. Granulated Sugar-Containing Functional Products in Jelly Fillings	859
Novikova Anastasiya E., Skrypnik Liubov N. Combined Surfactant and Enzyme-Assisted Extraction of Pectin from Hawthorn (<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.) Fruits	733	Fotina Natalya V., Emelianenko Vladislav P., Vorob'eva Ekaterina E., Burova Nadezhda V., Ostapova Elena V. Contemporary Biological Methods of Mine Reclamation in the Kemerovo Region – Kuzbass	869
Mizanbekova Salima K., Bogomolova Irina P., Vasilenko Irina N., Urazova Olga A. Innovative Wastewater Treatment Technologies for Resource-Saving Activities of Feed Mills	743	Fashutdinova Elizaveta R., Osintseva Maria A., Neverova Olga A. Prospects of Using Soil Microbiome of Mine Tips for Remediation of Anthropogenically Disturbed Ecosystems	883
Zakharenko Alexander M., Konstantin Yu. Kirichenko, Vakhniuk Igor A., Golokhvast Kirill S. Supercritical Extraction Technology of Obtaining Polyunsaturated Acids from Starfish (<i>Lysastrosoma anthosticta</i> Fisher, 9)	753	Titorenko Elena Yu., Trofimova Natalia B., Ermolaeva Evgenia O., Trofimov Ivan E., Breskin Leonid I., Surkov Igor V., Astakhova Natalia V. Developing New Software for Functional Food Production	905
Sadygova Madina K., Gaponov Sergei N., Shutareva Galina I., Tsetva Natalya M., Kirillova Tatyana V., Filina Darya K. Technological Potential of Saratov Spring Durum Wheat Grain	759	Tereschuk Lubov V., Zagorodnikov Konstantin A., Starovoitova Kseniya V., Viushinskiy Pavel A. Physical and Chemical Parameters of Emulsifiers and Their Effect on the Process of Food Emulsion Formation	915
Rudnev Sergey D., Shevchenko Tatyana V., Ustinova Yulia V., Kryuk Roman V., Ivanov Viktor V., Chistyakov Andrey M. Technology and Theory of Mechanically Activated Water in Bakery Industry	768	Nugmanov Albert H.-H., Meshcheryakova Galina S., Lebedev Viktor A., Borodulin Dmitry M., Aleksanian Igor Yu., Sokolova Ekaterina V. Thermophysical Parameters of a Semi-Finished Watermelon Product as an Object of Dehumidification	930
Dubtsova Galina N., Lomakin Alexander A., Kusova Irina U., Bulannikova			