

Том 54, № 1, 2024
Vol. 54, № 1, 2024

ISSN 2074-9414
ISSN 2313-1748

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Food Processing:
Techniques and Technology



1} Кемеровский
государственный
университет
Объединяем
знания и людей

Национальный, рецензируемый научный журнал, посвященный вопросам пищевой промышленности и смежных отраслей. Журнал включен в SCOPUS, RSCI, Перечень ВАК (категория K1).

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, краткие научные сообщения по направлениям: пищевые системы; биотехнология; технология пищевых производств; санитария и гигиена; экология; биобезопасность; частная зоотехния; электро-технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. Подробная информация для авторов и читателей представлена на сайте <https://fptt.ru>

Главный редактор:

А.Ю. Просеков, член-корр. РАН, д-р техн. наук, д-р биол. наук, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия.

Зам. главного редактора:

А.Н. Петров, академик РАН, д-р техн. наук, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия;

О.О. Бабич, д-р техн. наук, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия.

Редакционная коллегия:

Е.В. Абакумов, профессор РАН, д-р биол. наук, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

И.В. Алтухов, д-р техн. наук, ООО «Промышленные технологические инновации», Иркутск, Россия;

В.В. Бахарев, д-р хим. наук, Самарский государственный технический университет, Самара, Россия;

С.М. Бычкова, д-р экон. наук, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Пушкин, Россия;

А.Г. Галстян, академик РАН, д-р техн. наук, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия;

И.А. Ганиева, д-р экон. наук, АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс», Кемерово, Россия;

И.Ф. Горлов, академик РАН, д-р с.-х. наук, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясо-молочной продукции, Волгоград, Россия;

Г.М. Гриценко, д-р экон. наук, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск, Россия;

Н.И. Дунченко, д-р техн. наук, Российский государственный аграрный университет – МСХА К.А. Тимирязева, Москва, Россия;

И.А. Евдокимов, член-корр. РАН, д-р техн. наук, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия;

А.В. Заушинцева, д-р биол. наук, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия;

А.П. Каледин, д-р биол. наук, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия;

А.Б. Капранова, д-р физ.-мат. наук, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия;

Н.И. Кашеваров, академик РАН, д-р с.-х. наук, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск, Россия;

В.Г. Лобанов, д-р техн. наук, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия;

Г.О. Магомедов, д-р техн. наук, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия;

О.А. Неверова, д-р биол. наук, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия;

С.Л. Тихонов, д-р техн. наук, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия;

О.А. Фролова, д-р экон. наук, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия;

Г.Ш. Хайдаров, канд. техн. наук, Узбекско-Финский педагогический институт, г. Самарканд, Узбекистан;

В.Н. Хмелев, д-р техн. наук, Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета, Бийск, Россия;

Ю.С. Хотимченко, д-р биол. наук, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия;

С.В. Шахов, д-р техн. наук, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия;

И.В. Юдаев, д-р техн. наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия.

Материалы публикуются на условиях лицензии CC BY 4.0.

Выпускающий редактор: А.И. Лосева

Ответственный за выпуск: А.А. Кирыкова

Литературный редактор: А.Ю. Курникова

Литературный редактор (англ. язык): Н.В. Рабкина

Дизайн и компьютерная верстка: Е.В. Волкова

Редактор онлайн версии: Е.В. Дмитриева

Учредитель, издатель и редакция: Кемеровский государственный университет, 650000, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Кемерово, Красная, 6

тел.: +7 (3842) 58-80-24
e-mail: fptt98@gmail.com

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



Дата выхода в свет 29.03.24

Усл. п. л. 22,32. Тираж 500 экз.

Цена свободная. Выходит 4 раза в год

Подписной индекс по интернет-каталогу агентства «Книга-Сервис» – 41672

Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ № ФС77-72313 выдано Роскомнадзор

© Кемеровский государственный университет, 2024. © Авторы, 2024

Food Processing: Techniques and Technology is an open access, doubleblind peer-reviewed quarterly journal that encompasses a wide range in the food industry and agricultural science in Russia and neighboring regions.

The Journal is accepted by SCOPUS and Russian Science Citation Index. Our open access policy follows the Budapest Open Access Initiative (BOAI).

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.

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

The Journal publishes scientific articles, reviews, and research briefs in the following areas: food systems; biotechnology; food production technology; sanitation and health; ecology; biosecurity; zootechnics; electro-technologies, agro-industrial machines and equipment. For submission instructions, subscription and all other information visit this journal online at fptt.ru/en

Editor-in-Chief

Alexander Yu. Prosekov, Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Biol.), Kemerovo State University, Kemerovo, Russia.

Deputy Editor-in-Chief

Andrey N. Petrov, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), All-Russia Dairy Research Institute, Moscow, Russia;

Olga O. Babich, Dr. Sci. (Eng.), Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

Editorial Board Member

Evgeny V. Abakumov, Professor of the RAS, Dr. Sci. (Biol.), St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

Igor V. Altukhov, Dr. Sci. (Eng.), Industrial Technological Innovations LLC, Irkutsk, Russia;

Vladimir V. Bakharev, Dr. Sci. (Chem.), Samara State Technical University, Samara, Russia;

Svetlana M. Bychkova, Dr. Sci. (Econ.), St. Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Russia;

Aram G. Galstyan, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), All-Russia Dairy Research Institute, Moscow, Russia;

Irina A. Ganieva, Dr. Sci. (Econ.), Research and Academic Centre «Kuzbass», Kemerovo, Russia;

Ivan F. Gorlov, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Agr.), Povolzhsky Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products, Volgograd, Russia;

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

Nina I. Dunchenko, Dr. Sci. (Eng.), Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia;

Ivan A. Evdokimov, Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia;

Alexandra V. Zaushintsena, Dr. Sci. (Biol.), Kemerovo State University, Kemerovo, Russia;

Anatoly P. Kaledin, Dr. Sci. (Biol.), Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia;

Anna B. Kapranova, Dr. Sci. (Econ.), Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;

Nikolay I. Kashevarov, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Agr.), Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia;

Vladimir G. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia;

Gazibeg O. Magomedov, Dr. Sci. (Eng.), Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;

Olga A. Neverova, Dr. Sci. (Biol.), Kemerovo State University, Kemerovo, Russia;

Sergei L. Tikhonov, Dr. Sci. (Eng.), Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia;

Olga A. Frolova, Dr. Sci. (Econ.), Nizhni Novgorod Engineering-economic State University, Knyaginino, Russia;

Gayrat Sh. Haydarov, PhD (Eng.), Uzbek-Finnish Pedagogical Institute, Samarqand, Uzbekistan;

Vladimir N. Khmelev, Dr. Sci. (Eng.), Biysk Technological Institute, Altai State Technical University, Biysk, Russia;

Yuri S. Khotimchenko, Dr. Sci. (Biol.), Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia;

Sergey V. Shakhov, Dr. Sci. (Eng.), Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;

Igor V. Yudaev, Dr. Sci. (Eng.), Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia.

All articles are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Executive Editor: A.I. Loseva

Publishing Editor: A.A. Kiryakova

Editor and Proofreader: A.Yu. Kurnikova

English Editor: N.V. Rabkina

Computer layout design: E.V. Volkova

Website Editor: E.V. Dmitrieva

Founder, Publisher and Editorial: Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, Kemerovo region – Kuzbass, 650000, Russia
phone: +7(3842) 58-80-24
e-mail: fptt98@gmail.com

Printing Office: Kemerovo State University, Sovetskiy Ave. 73, Kemerovo, Kemerovo region – Kuzbass, 650000, Russia

Date of issue March 29, 2024

Printed sheet 22.32 conventional printed
Circulation 500 cop.

Open price. Issued 4 times a year

Full-texts are available online at fptt.ru/en,
elibrary.ru, e.lanbook.com, cyberleninka.ru

© 2024, Kemerovo State University

© 2024, Authors

Колонка главного редактора
<https://fpтт.ru>

Пищевая и перерабатывающая промышленность имеет стратегическое значение в решении вопроса обеспечения продовольственной безопасности страны. По итогам 2023 г. в России данная отрасль продемонстрировала высокую эффективность в текущих условиях и способность устойчиво развиваться и обеспечивать внутренний рынок необходимыми объемами качественной продукции. По оценке правительства, уровень продовольственной безопасности в России является одним из самых надежных в мире.

Молочная промышленность является одной из важных отраслей пищевой и перерабатывающей промышленности, которая круглогодично обеспечивает население качественной и полноценной продукцией. По данным аналитического центра BusinesStat, в 2023 г. в России было произведено 11,5 млн т молочной продукции (+ 2,6 % к 2022 г. и + 2,2 % к 2021 г.). Специалистами отмечается рост производства молокоемких категорий продукции: за одиннадцать месяцев 2023 г. увеличились показатели выпуска молока и сухих и сублимированных сливок – до 190,9 тыс. т (рост на 7,9 % в сравнении с аналогичным периодом 2022 г.), молочных сгущенных продуктов – до 657,1 муб (+ 1,1 %).

Производство консервированной молочной продукции остается перспективным направлением развития перерабатывающей отрасли. Современные технологии консервирования, основанные на базовых принципах био- и абиоза, а также их техническое оснащение позволяют максимально сохранять полезные свойства, качество и безопасность молока в течение длительного времени.

Основные виды молочных консервов (стерилизованное сгущенное молоко, сгущенное молоко с сахаром, сухое молоко) из-за высоких питательных свойств, длительного срока хранения и простоты транспортировки имеют социальное и стратегическое значение. В ряде регионов РФ из-за географических и климатических условий не всегда возможно снабжение населения жидкими молочными продуктами. Эта проблема решается за счет консервированной молочной продукции. Пищевые запасы, созданные с использованием данной продукции, обеспечивают продовольственную независимость страны, которая является одной из составляющих экономической безопасности. Цельное сгущенное молоко с сахаром, упакованное в металлические банки, входит в перечень продукции, предназначенной для госрезервирования. Сухое молоко используют для снабжения армии, создания стратегических пищевых запасов по линии МЧС, гуманитарной помощи и т. д.

Ректор, главный редактор,
член-корр. РАН, профессор,
Заслуженный работник высшей школы РФ,
Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники

Сгущенное молоко является востребованным продуктом молочной консервации среди потребителей различных возрастных категорий. Сухое молоко находит применение в различных отраслях пищевой промышленности для изготовления большого спектра кондитерской, мясной, хлебобулочной и другой продукции. Однако широким потребительским спросом сухие молочные консервы не пользуются, за исключением стерилизованных сухих молочных смесей для детского питания. Сухое молоко является одним из ключевых молочных продуктов в мировой торговле. На протяжении последних 5 лет Россия наращивает экспорт сухого молока: в 2023 г. он достиг рекордного уровня, превзойдя показатели предыдущего года в 4,7 раза в натуральном выражении и в 2,7 раза в стоимостном.

Российскими учеными ведутся исследования в области концентрирования молочного сырья с применением современных наукоемких и ресурсосберегающих технологий, способствующих формированию новых технологических свойств молочных консервов, сухой молочной сыворотки и т. д.

Значительный вклад в фундаментальные и прикладные исследования, связанные с глубокой переработкой молока, консервированием и хранением молочной продукции, а также научно-техническим обеспечением молочной отрасли, внес академик РАН, доктор технических наук Андрей Николаевич Петров. На протяжении многих лет под руководством Андрея Николаевича и при его участии ведутся исследования по продлению сроков годности продуктов питания, агрегативной и кинетической устойчивости пищевых эмульсий, созданию научных основ производства функциональных продуктов и развитию методологических принципов идентификации продуктов. Особое место в научной деятельности занимают исследования, направленные на развитие научных основ, формирование теоретических обоснований, совершенствование существующих и создание инновационно-технологических и конкурентоспособных решений консервированной молочной продукции. Новые технологии консервов на молочной основе освоены более чем на 60 предприятиях России и в странах ближнего зарубежья.

29 апреля 2024 г. академик РАН А. Н. Петров отмечает свой 70-летний юбилей. Редакция журнала «Техника и технология пищевых производств» искренне желает Андрею Николаевичу крепкого здоровья и благополучия, почета и уважения, выдающихся успехов в профессиональной и научной деятельности, неиссякаемой энергии для новых достижений!

А. Ю. Просеков

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2483>
<https://elibrary.ru/WRCYBG>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Исследование качества молодых игристых вин из крымских автохтонных сортов винограда



И. П. Лутков^{ORCID}, А. С. Макаров^{ORCID}, Н. А. Шмигельская*^{ORCID}

Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарах» РАН^{FOR}, Ялта, Россия

Поступила в редакцию: 09.03.2023

Принята после рецензирования: 18.04.2023

Принята к публикации: 02.05.2023

*Н. А. Шмигельская: nata-ganaj@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1244-8115>

И. П. Лутков: <https://orcid.org/0000-0001-9515-4341>

А. С. Макаров: <https://orcid.org/0000-0001-8497-5056>

© И. П. Лутков, А. С. Макаров, Н. А. Шмигельская, 2024



Аннотация.

Основную долю отечественных игристых вин составляют вина из распространенных шампанских сортов винограда. Для увеличения выпуска высококачественной оригинальной продукции можно использовать технологию производства молодых игристых вин из крымских автохтонных сортов винограда. Цель исследования заключалась в изучении физико-химических и органолептических показателей качества молодых игристых вин, выработанных из крымских автохтонных сортов винограда бутылочным способом.

Объектами исследования являлись молодые игристые вина из винограда сортов Солдайя, Шабаш, Кокур белый, Сары пандас, Кефесия, Джеват кара и Эким кара. Содержание органических кислот, сахаров, глицерина, фенольных веществ и этанола определяли методом ВЭЖХ, аминного азота – формольным титрованием, оптические характеристики – колориметрическим методом, пенные свойства – барботированием пробы вина воздухом в мерном цилиндре, игристые свойства – измерением скорости десорбции CO₂ из пробы игристого вина, содержание CO₂ – волюметрическим методом, вязкость – с помощью вискозиметра. Органолептическую оценку проводили по ГОСТ 32051-2013, ISO 5492:2008 и ISO 11035:1994.

Высокими дегустационными оценками ($\geq 9,0$ баллов) отмечены образцы игристых вин из белых сортов Кокур белый, Сары панда и Солдайя, а также из красного сорта Кефесия (8,95 баллов). Вина характеризовались чистым и ярким сортовым ароматом, гармоничным вкусом, хорошими пенными и игристыми свойствами. Показатель максимального объема пены коррелировал с содержанием аминного азота ($r = 0,762$), коэффициент игристых свойств – с массовой долей связанного CO₂ ($r = 0,977$). Красное игристое вино из сорта Кефесия имело темно-гранатовый цвет за счет высокого содержания антоцианов.

Перспективными для приготовления молодых игристых вин являются сорта винограда Кокур белый, Сары пандас, Солдайя и Кефесия. Для остальных сортов необходимо подбирать технологические приемы, которые будут способствовать сохранению типичных свойств и баланса между ароматом и вкусом. Технология позволяет получать уникальную высококачественную продукцию в год урожая винограда. Ее внедрение будет способствовать увеличению объема выпуска высококачественных игристых вин.

Ключевые слова. Вино, виноград, автохтонные сорта винограда, пенные и игристые свойства, дрожжи, дескрипторы, фенольные вещества, органические кислоты, аромат, вкус

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания № FNZM-2022-0003.

Для цитирования: Лутков И. П., Макаров А. С., Шмигельская Н. А. Исследование качества молодых игристых вин из крымских автохтонных сортов винограда // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 1–17. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2483>

Quality Assessment of Young Sparkling Wines of Crimean Indigenous Grape Varieties



Igor P. Lutkov^{ID}, Alexander S. Makarov^{ID},
Natalia A. Shmigelskaya*^{ID}

All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” of RAS^{ROR},
Yalta, Russia

Received: 09.03.2023
Revised: 18.04.2023
Accepted: 02.05.2023

*Natalia A. Shmigelskaya: nata-ganaj@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1244-8115>
Igor P. Lutkov: <https://orcid.org/0000-0001-9515-4341>
Alexander S. Makarov: <https://orcid.org/0000-0001-8497-5056>

© I.P. Lutkov, A.S. Makarov, N.A. Shmigelskaya, 2024



Abstract.

Most domestic sparkling wines are made of traditional champagne grape varieties. However, indigenous Crimean cultivars could increase the output of high-quality original beverages if a proper technology was introduced.

This research featured young sparkling wines from Crimean grape varieties, i.e., Soldaya, Shabash, Kokur Belyi, Sary Pandas, Kefesiya, Dzhevat Kara, and Ekim Kara. Organic acids, sugars, glycerin, phenolic substances, and ethanol were determined by high performance liquid chromatography; the content of amine nitrogen was measured by formalin titration. The optical profile of the wine samples was subjected to the colorimetric method while their foamy properties were studied by bubbling the samples in a measuring cylinder. The sparkling properties depended on the rate of CO₂ desorption; the volumetric method made it possible to define the CO₂ content; the viscosity was measured using a viscometer. The sensory assessment followed State Standard 32051-2013, ISO 5492:2008, and ISO 11035:1994.

The samples of Kokur Belyi, Sary Pandas, and Soldaya received high tasting ratings (≥ 9.0 points), as did the red variety of Kefesiya (8.95 points). They demonstrated a clear typical aroma and a harmonious taste, as well as good foamy and sparkling properties. The maximal foam volume correlated with amine nitrogen ($r = 0.762$) while the sparkling properties correlated with the mass fraction of bound CO₂ ($r = 0.977$). The red sparkling wine from the Kefesiya variety had a dark garnet color due to its high anthocyanins. It also contained quercetin and glycoside, which are known for their biological (P-vitamin) activity and powerful antioxidant properties. The early low-sugar (< 18 g/100 cm³) varieties of Dzhevat Kara and Ekim Kara had the same acidity but demonstrated a less diverse phenolic profile and were paler in color.

In this research, the indigenous Crimean grape cultivars of Kokur Belyi, Sary Pandas, Soldaya, and Kefesia showed good prospects for young sparkling wines. Other varieties needed special technologies to preserve their typical properties and the aroma/taste balance. The new technology makes it possible to obtain unique high-quality products right in the harvest year, thus increasing the range and volume of sparkling wine production.

Keywords. Wine, grapes, autochthonous grape varieties, foamy and sparkling properties, yeast, descriptors, phenolic substances, organic acids, aroma, taste

Funding. The research was part of State Assignment No. FNZM-2022-0003.

For citation: Lutkov IP, Makarov AS, Shmigelskaya NA. Quality Assessment of Young Sparkling Wines of Crimean Indigenous Grape Varieties. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):1–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2483>

Введение

Игристые вина занимают определенное место на рынке вина и представлены широким ассортиментом отечественной и импортной продукции. Согласно экспертам производство и потребление отечественных игристых вин в России в 2022 г. выросло примерно на 25 % по сравнению с предыдущим годом. В последнее время особый интерес вызывают молодые

игристые вина или т. н. «петнаты» (от фр. «petillant» и «naturel» – «игристое натуральное» вино; сокращение PetNat). Для потребителя данный вид винопродукции является привлекательным из-за яркого сортового аромата винограда, свежего гармоничного вкуса и демократичной цены. Для производителя выработка молодых игристых вин экономически более выгодна, чем традиционная шампанизация, т. к. сокращается

технологический цикл производства с 9 месяцев (для бутылочного способа) до 3, а готовая продукция выпускается в год урожая винограда. По прогнозам экспертов, в ближайшие несколько лет спрос на молодые игристые вина будет увеличиваться с ежегодным приростом предложения до 15 %.

Аналогичная ситуация наблюдается в ряде стран Европейского Союза, где молодые игристые вина производят по «методу предков» («Methode Ancestrale») [1]. Данный метод заключается в неполном сбраживании сусла на собственной микрофлоре винограда и остановке брожения холодом с дальнейшим проведением вторичного брожения в закупоренных бутылках. Производители данного вида продукции сталкиваются с трудностями, обусловленными сложностью контроля процесса вторичного брожения при использовании спонтанной микрофлоры винограда, в состав которой входят не только дрожжи рода *Saccharomyces*, но и другие микроорганизмы, включая бактерии. Это может способствовать остановке брожения и приводить к получению конечной продукции нестабильного качества. Потребитель ценит такие вина за их уникальность, связанную с использованием местных сортов винограда и дрожжей, свойственных данному терруару.

В связи с этим проводятся исследования по совершенствованию технологии производства молодых игристых вин. В. И. Ботнарь запатентовала способ производства игристых вин, при котором дображивание виноградного сусла происходит в акратофорах сразу на марку (патент ЕА025028В1). В результате этого получается молодое игристое вино, которое сохраняет аромат и вкус свежего винограда и поверхностно-активные вещества, способствующие формированию устойчивой пены и хороших игристых свойств. В. Е. Бурдой предложен способ (RU149922U1) получения молодых игристых вин путем купажирования виноматериалов, полученных брожением разных фракций сусла и криоконцентрата виноградного сусла с добавлением дрожжевой разводки, последующего брожения и реализации в сувенирной потребительской таре. Благодаря этому способу можно производить данный тип вина на протяжении всего года. Лабораторией игристых вин института «Магарач» был разработан способ производства вина игристого розового (патент РФ № 2747210), который позволяет получать молодые розовые игристые вина с ярким и чистым сортовым ароматом, гармоничным вкусом и хорошими типичными свойствами в год урожая. Также проводятся исследования в направлении подбора перспективных рас дрожжей для молодых игристых вин [2]. В России известен «старый казачий» способ, применяемый при производстве красного игристого вина «Цимлянское игристое», при котором используется недоброженное сусло для вторичного брожения в бутылках. Популярность «Цимлянскому игристому» придает развитый ароматический комплекс и вкус, формирующийся за счет использования донских автохтонных

сортов винограда Цимлянский черный, Плечистик и Красностоп Золотовский.

В последние годы внимание ученых и специалистов отечественных винодельческих предприятий приковано к оценке перспективности использования автохтонных сортов винограда для получения разного типа винопродукции с уникальными индивидуальными характеристиками.

Технологическая оценка автохтонных сортов винограда, проводимая в ряде стран (регионов), позволила выделить наиболее перспективные направления их использования. Для производства столовых вин рекомендуются сорта Кумшацкий белый, Белобуланный и Сыпун черный (Нижнее Придонье); Алы терский, Асыл кара, Гимра и Махбор цибил (Южный Дагестан); Горули мцване, Грубела и Александрюли (Грузия); Аvasирхва, Амлаху и Качичи (Абхазия); Мискет Врачански, Гамза, Мавруд, Широкий Мельник и Памид (Болгария); Кадарка (Венгрия); Карначаладес и Богияламадес (Греция); Ксинистеры и Маратефтико (Кипр); Каньокасо, Кастеллано, Мантуо де Пилас, Паломино Фино, Роме и Рим Тинто (Испания) [3–16]. Отдельные сорта возможно использовать в производстве вин с географическим статусом: Кумшацкий белый, Белобуланный и Сыпун черный (Нижнее Придонье); Фетяская нягрэ (Молдова); Воскеат (Харджи), Арени и Кахет (Армения) [3, 17–19]. Для направления игристых вин рекомендуются сорта Тельти Курук (Украина), Цицка, Чинури, Мцване и Ркацители (Грузия) [5, 20, 21]. Применение некоторых сортов закреплено в нормативной документации для производства игристых вин традиционного наименования (шампанского): Тельти курук (Украина), Кульджинский (Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Узбекистан) и Сояки (Узбекистан).

Кроме того, свои автохтонные сорта винограда имеются в Сербии, Хорватии, Черногории, Румынии, Израиле, Ливане и других странах Евразийского континента [22–28]. В некоторых странах проводятся генетические исследования автохтонных сортов винограда. В Испании определен характерный геном, присущий только испанским местным сортам, а в Армении и Крыму созданы базы данных паспортов аборигенных сортов винограда [26, 29].

Однако большинство отечественных и зарубежных автохтонных сортов винограда для выработки винопродукции, в том числе игристых вин, сегодня не используются по разным причинам. Среди причин выделяют малые площади посадок и недостаточную изученность их пригодности для приготовления данного вида продукции. В Крыму известно около 80 автохтонных сортов винограда, 73 из них – это крымские автохтонные сорта, которые произрастают в ампелографической коллекции ФГБУН «ВНИИВиВ «Магарач» РАН» [30]. В институте «Магарач» проводятся исследования физико-химического состава виноматериалов из крымских автохтонных сортов винограда, в частности фенольного комплекса [31, 32]. Сотрудники

лаборатории игристых вин института «Магарач» проводили исследования качества виноматериалов, выработанных из ряда крымских и донских автохтонных сортов винограда, а также типичных свойств игристых вин, полученных с использованием указанных сортов [33]. На основании полученных данных был сделан вывод о возможности использования автохтонных сортов винограда (Махроватчик, Цимлянский белый, Цимладар, Кефесия, Кокур красный и Черный крымский) для производства высококачественных игристых вин. Однако вопрос изучения качества молодых игристых вин из крымских автохтонных сортов винограда является малоизученным.

Рабочая гипотеза – изучение пригодности крымских автохтонных сортов винограда для приготовления молодых игристых вин позволит получить высококачественную продукцию с уникальными органолептическими характеристиками.

Цель исследования – изучение физико-химических и органолептических показателей качества молодых игристых вин, выработанных из крымских автохтонных сортов винограда бутылочным способом, для получения эксклюзивной высококачественной продукции.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований являлись молодые игристые вина, приготовленные в сезон виноделия из винограда крымских аборигенных сортов: белых – Солдайя и Шабаш (с. Вилино), Кокур белый и Сары пандас (с. Морское); красных – Кефесия, Джеват кара и Эким кара (с. Морское). Переработку винограда проводили по белому и красному способам в условиях микровиноделия с использованием 2 штаммов дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* из Коллекции микроорганизмов виноделия «Магарач». Для проведения брожения суслу по белому (п/б) способу использовали штамм дрожжей *S. cerevisiae* I-527 (47-К) с киллер-фактором, который увеличивает доминирование данного штамма при брожении [34]. Для проведения брожения по красному (п/к) способу использовали штамм дрожжей *S. cerevisiae* I-25 (Каберне 5), который способствует раскрытию сортовых особенностей аромата и вкуса в розовых и красных молодых игристых винах [35].

При переработке винограда по белому способу получали белое и розовое сусли путем прессования мезги на корзиночном прессе. Выход сусли составил 50 дал из 1 т винограда. Затем проводили его сульфитацию ($75 \text{ мг/дм}^3 \text{ SO}_2$), отстаивание при температуре 15°C и декантацию. Переработку винограда по красному способу осуществляли путем дробления винограда на валковой дробилке с отделением гребней. Провели сульфитацию мезги ($75 \text{ мг/дм}^3 \text{ SO}_2$). Брожение сусли и мезги проходило при температуре 15°C . Мезгу сбрасывали на 2/3 сахаров и прессовали. Полученное сусли дображивало в отдельных резервуарах. При значении показателя массовой концентрации остаточных сахаров $22\text{--}24 \text{ г/дм}^3$ недоброженное сусли отправляли

на шампанизацию. Для этого проводили розлив недоброженного сусли в бутылки и добавляли бентонит ($0,2 \text{ г/дм}^3$). Бутылки укупоривали и укладывали в штабели, хранили при температуре $12\text{--}14^\circ\text{C}$. По истечении 45 суток провели сведение осадка на горлышко (ремюаж) и его сброс (дегоржаж).

В полученных молодых игристых винах определили физико-химические показатели согласно действующей нормативной документации. Оптические характеристики – путем измерения оптической плотности в кювете толщиной 10 мм (белые и розовые вина) и толщиной 1 мм (красные вина) при различных длинах волн (от 310 до 800 нм). Динамическую вязкость измеряли при помощи вискозиметра. Пенные свойства (максимальный объем пены и время разрушения пены) определяли по СТО 01580301.015-2017. Согласно этой методике в мерный цилиндр вместимостью 1 дм^3 наливали 200 см^3 дегазированной пробы вина. С помощью портативного компрессора и распылителя, опущенного на дно мерного цилиндра, осуществляли барботаж вина воздухом. Происходило вспенивание напитка. Максимальный объем пены определяли визуально с помощью градуировки цилиндра, время разрушения пены – с помощью секундомера.

Содержание органических кислот, остаточных сахаров и этилового спирта определяли методом ВЭЖХ. Разделение пробы на индивидуальные вещества проводили на колонке Supelcogel C610H (Supelco®, Sigma-Aldrich, USA). Сорбент на основе сульфитированного дивинил-полистирола (размер колонки $300 \times 7,8$, зернение сорбента менее $10,0 \text{ мкм}$). Хроматограф Shimadzu LC 20AD (Япония) оснащен спектрофотометрическим детектором. В качестве элюента использовали водный раствор ортофосфорной кислоты (1 г/дм^3). Концентрацию веществ определяли с помощью детектора при 210 нм по времени выхода и величине сигнала. Качественный и количественный состав фенольных веществ определяли методом ВЭЖХ с использованием хроматографической системы Agilent Technologies (модель 1100), колонка Zorbax SB-C18 размером $2,1 \times 150 \text{ мм}$, заполненная силикагелем с привитой октадецилсилильной фазой с размером частиц сорбента $3,5 \text{ мкм}$ с диодно-матричным детектором. Состав элюента: раствор А – метанол, раствор В – водный раствор трифторуксусной кислоты массовой концентрации $0,6 \text{ г/100 см}^3$. Общее содержание диоксида углерода в игристых винах определяли согласно СТО 01580301.016-2017. По данной методике выделившийся из вина под действием ультразвука CO_2 вытеснял затворную жидкость из градуированной ёмкости. Объем вытесненной затворной жидкости соответствовал объему содержавшегося в бутылке с игристым вином диоксида углерода. Расчет содержания связанных форм диоксида углерода осуществляли по методу А. А. Мержаниана по разности между измеренным содержанием CO_2 и его растворимостью при определенном давлении и концентрации этанола [36]. Игристые

свойства определяли по методике СТО 01586301.040-2022: измеряли скорость десорбции CO_2 из пробы вина объемом 50 см³, налитой в дегустационный бокал из полной бутылки, открытой перед проведением измерений. Коэффициент десорбции CO_2 (коэффициент игристых свойств) определяли как отношение массы CO_2 , содержащегося в пробе игристого вина, к скорости десорбции CO_2 из этой пробы, измеренной на отрезке времени от 0 до 60 мин.

Органолептическую оценку виноматериалов и игристых вин осуществляли согласно ГОСТ 32051-2013, ISO 5492:2008 и ISO 11035:1994. Органолептическую оценку проводили с привлечением членов дегустационной комиссии ФГБУН «ВНИИВВиВ «Магарач» РАН» по 10-балльной системе (по шкале оценки игристых вин – от 8,8 до 9,2 баллов) и по количественному выражению вклада отдельных дескрипторов в сложение цвета, вкуса и аромата вин. Выбор дескрипторов осуществляли в соответствии с ISO 5492, ISO 11035 и [37].

Результаты и их обсуждение

На первом этапе работы в молодых игристых винах определяли содержание органических кислот, этанола, глицерина и остаточных сахаров – веществ, которые позволяют говорить о полноте прохождения процесса брожения. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Согласно полученным данным все образцы выбродили насухо. Наибольшее содержание (≈ 4 г/дм³) оста-

точных сахаров отмечено в образцах, приготовленных по белому способу (п/б) из винограда сортов Сары пандас и Кефесия. Это связано с высокой массовой концентрацией сахаров исходного сула (≈ 21 г/100 см³), т. к. из-за повышенного накопления диоксида углерода и этилового спирта, которые угнетают дрожжевую клетку, останавливалось брожение. Массовая концентрация глицерина также была выше в тех образцах, в которых накапливалось больше этанола ($r = 0,59$). Содержание лимонной кислоты в белых игристых винах находилось в пределах 0,284–0,465 г/дм³, а в красных винах в диапазоне 0,580–0,763 г/дм³. На примере сорта Кефесия можно заключить, что переработка винограда по красному способу (п/к) способствовала большему накоплению лимонной кислоты ($\approx$ в 2 раза). Схожая тенденция наблюдалась и для янтарной кислоты: в красных винах ее накапливалось больше (в среднем в 1,5 раза). Однако в этом случае это могло быть связано с влиянием штамма дрожжей, используемого для приготовления красных вин, поскольку основное количество янтарной кислоты вина образуется в процессе брожения. Во всех образцах, кроме игристого вина из сорта Кефесия п/к, соотношения массовых концентраций винной и яблочной кислот было больше 1,0, что положительно сказалось на вкусовых характеристиках. Общее содержание титруемых кислот в ряде образцов было ниже предельно допустимой величины (согласно ГОСТ 33336) – 5 г/дм³. Это не было связано с естественным процессом яблочно-молочного

Таблица 1. Содержание органических кислот, сахаров, глицерина и этанола в образцах игристых вин

Table 1. Organic acids, sugars, glycerin, and ethanol in sparkling wine samples

Наименование вина	Сумма титруемых кислот, г/дм ³	Сахароза, г/дм ³	Глюкоза, г/дм ³	Фруктоза, г/дм ³	Глицерин, г/дм ³	Этанол, %
Белые						
Солдайя п/б (с. Вилино)	6,20	0,45	0,89	1,99	4,63	10,9
Шабаш п/б (с. Вилино)	4,80	0,50	0,66	1,33	4,82	11,4
Кокур белый п/б (с. Морское)	7,40	0,45	1,07	1,99	5,77	10,5
Сары пандас п/б (с. Морское)	5,60	0,58	0,66	2,76	6,43	12,2
Розовые						
Кефесия п/б (с. Морское)	3,00	0,35	1,67	1,89	6,67	13,4
Красные						
Кефесия п/к (с. Морское)	5,00	0,97	1,67	0,66	7,16	13,0
Джеват кара п/к (с. Морское)	3,60	0,56	1,84	0,29	6,12	10,3
Эким кара п/к (с. Морское)	4,80	0,45	1,87	0,28	6,20	10,8

п/б – переработка винограда по белому способу; п/к – переработка винограда по красному способу.

п/б – white winemaking method; п/к – red winemaking method.

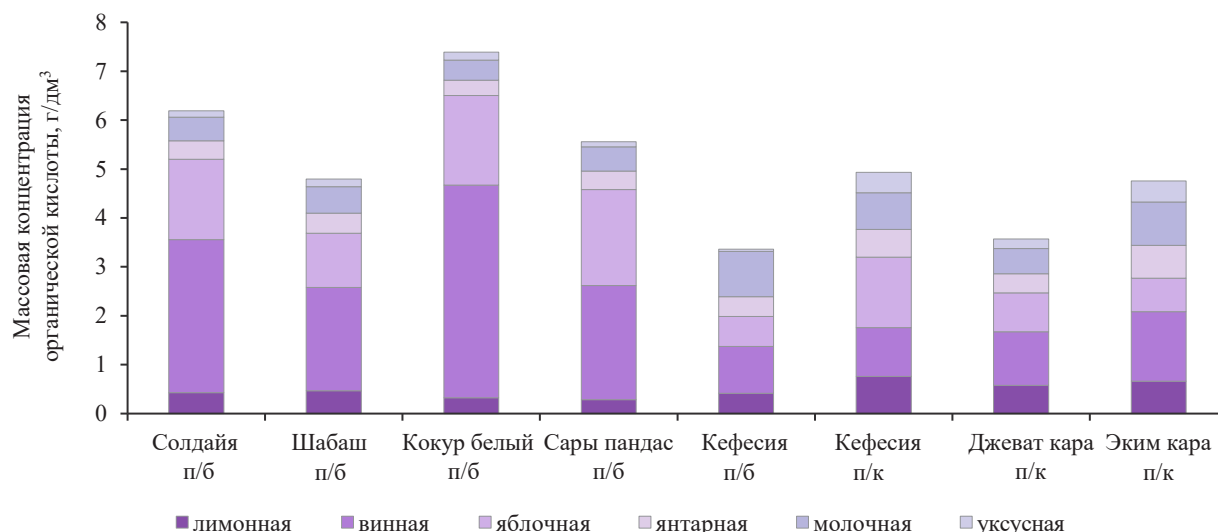


Рисунок 1. Содержание органических кислот в образцах игристых вин

Figure 1. Organic acids in sparkling wine samples

Таблица 2. Физико-химические показатели опытных образцов игристых вин

Table 2. Physical and chemical properties of experimental sparkling wines

Наименование вина	pH	Eh	$V_{\max}$, см ³	$t_{\text{раз}}$, с	B, мм ² /с	AA, мг/дм ³	И	T	G
Белые									
Солдайя п/б (с. Вилино)	3,1	232	210	8	1,518	192,5	–	–	17,92
Шабаш п/б (с. Вилино)	3,5	219	250	10	1,505	165,0	–	–	24,51
Кокур белый п/б (с. Морское)	3,0	237	> 1000	> 60	1,521	259,0	–	–	23,57
Сары пандас п/б (с. Морское)	3,3	222	600	39	1,614	294,0	–	–	8,42
Розовые									
Кефесия п/б (с. Морское)	3,9	186	300	12,5	1,674	182,0	0,405	1,470	22,72
Красные									
Кефесия п/к (с. Морское)	3,9	182	400	> 60	1,648	476,0	1,808	0,683	–
Джеват кара п/к (с. Морское)	3,8	188	330	18	1,515	249,2	0,241	0,868	–
Эким кара п/к (с. Морское)	3,8	193	500	> 60	1,548	249,2	0,552	0,658	–

pH – значение водородного показателя, Eh – значение окислительно-восстановительного потенциала, $V_{\max}$ – максимальный объем пены, $t_{\text{раз}}$ – время разрушения пены, B – значение динамической вязкости, AA – массовая концентрация аминного азота, И – значение интенсивности цвета ($D_{420} + D_{520}$), T – значение оттенка цвета (D_{420}/D_{520}), G – значение показателя желтизны;

п/б – переработка винограда по белому способу; п/к – переработка винограда по красному способу.

pH – pH value, Eh – redox potential, $V_{\max}$ – maximal foam volume, $t_{\text{раз}}$ – foam destruction time, B – dynamic viscosity, AA – amine nitrogen mass concentration, И – color intensity ($D_{420} + D_{520}$), T – color (D_{420}/D_{520}), G – yellowness index;

п/б – white winemaking method; п/к – red winemaking method.

брожения, поскольку во всех образцах яблочная кислота присутствовала, а концентрация молочной кислоты не превышала 1 г/дм³. Только в двух образцах (Кефесия п/б и Эким кара п/к) содержание молочной кислоты преобладало над яблочной ($\approx$ в 1,5 раза). Это может свидетельствовать о возможном частичном прохождении процесса яблочно-молочного брожения.

Можно сделать предварительный вывод о том, что для исследуемых красных сортов винограда и белого сорта Шабаш низкое содержание органических кислот является их природной особенностью.

Низкое содержание титруемых кислот в образцах, выработанных из красного винограда, отразилось на показателе pH ($r = -0,867$), значение которого поднималось до 3,9 ед. (табл. 2). Показатель Eh в красных винах был ниже, чем в белых, что может свидетельствовать об их меньшем окислении за счет большего содержания природных редуктонов. В образцах игристых вин, выработанных из винограда из с. Вилино, содержалось меньшее количество аминного азота, чем у образцов из с. Морское. Это связано с содержанием азота в почвах. Для вин, полученных путем

переработки винограда по белому способу, обнаружена корреляция между содержанием аминного азота и максимальным объемом пены ($r = 0,762$). Лучшими пенистыми свойствами характеризовались образцы из сортов Кокур белый ($V_{\max} \geq 1000 \text{ см}^3$) и Сары пандас ($V_{\max} = 600 \text{ см}^3$). Наибольшей динамической вязкостью среди исследуемых образцов характеризовались игристые вина из сортов Сары пандас и Кефесия. В данном случае вязкость зависела от содержания этилового спирта ($r = 0,933$) и глицерина ($r = 0,794$). Также в белых игристых винах из с. Морское максимальный объем пены был выше, чем в образцах из с. Вилино, в которых содержание суммы фенольных веществ было в 2 раза выше по сравнению с образцами из с. Морское. Корреляция между содержанием суммы фенольных веществ и максимальным объемом пены для белых игристых вин составила $r = -0,909$. Наибольшей интенсивностью цвета и показателем желтизны характеризовались белые вина из сортов винограда Шабаш и Кокур белый. Если для игристого вина из сорта Шабаш это было связано с большим содержанием полифенолов (полимерных проантоцианидинов) (табл. 3), то для образца из сорта Кокур белый, склонного к окислительному покоричневению, это могло быть связано с прохождением процессов окисления фенольных веществ, а также меланоидинообразования за счет взаимодействия остаточных сахаров и аминокислот. Среди красных вин наибольшая интенсивность цвета была в образце из сорта Кефесия, что зависело от содержания антоцианов ($r = 0,997$). Показатель оттенка цвета Т, характеризующий вклад желто-коричневых пигментов в окраску вина, в красных винах был наибольшим в образце из сорта Джеват кара. Это связано с наименьшим содержанием антоцианов в этом образце.

В связи с повышенным интересом к фенольному комплексу растительного сырья и продуктов его переработки, обуславливающему широкий спектр лечебно-профилактических свойств, проведены исследова-

ния компонентного состава фенольных соединений в молодых игристых винах [38, 39]. В ходе анализа состава фенольных веществ белых игристых вин было установлено, что полимерные проантоцианидины составляли от 2/3 до 3/4 от суммы фенольных веществ. Исключением являлся образец из сорта Солдайя, в котором доля полимерных проантоцианидинов составляла 40 %. В то же время в данном образце определена высокая концентрация кафтаровой кислоты. В образцах из винограда сортов Солдайя и Шабаш (с. Вилино) содержание оксикоричных кислот (кафтаровой и коутаровой), а также флаван-3-олов ((+)-D-катехина и (-)-эпикатехина) превышало их содержание в игристых винах из винограда сортов Кокур белый и Сары пандас (с. Морское). Это может быть связано, помимо сортовых особенностей, с условиями терруара. В то же время 2-S-глутатионил кафтаровой кислоты, который образуется в процессе окисления данной кислоты, больше содержался в образце из сорта Сары пандас.

В ходе анализа состава фенольных веществ игристых вин из красных сортов винограда было установлено, что полимерные проантоцианидины составляли 62–75 % от суммы фенольных веществ (табл. 4). Больше всех оксикоричных кислот (кафтаровой и коутаровой) содержалось в образце красного игристого вина из сорта Кефесия, хотя в розовом игристом вине из этого же сорта этих веществ содержалось меньше. Содержание 2-S-глутатионил кафтаровой кислоты преобладало в образцах из сорта Кефесия. По содержанию флаван-3-олов ((+)-D-катехина и (-)-эпикатехина) и оксibenзойных кислот (галловой и сиреневой) образцы отличались незначительно. Кверцетин и его гликозилированной формы больше всего находилось в образце красного игристого вина из сорта Кефесия. Кверцетин и его гликозиды обладают биологической активностью. Их относят к витаминным препаратам группы Р, которые обладают мощным антиоксидантным

Таблица 3. Состав фенольных веществ белых игристых вин

Table 3. Phenolics in white sparkling wines

Наименование показателя, мг/дм ³	Солдайя п/б	Шабаш п/б	Кокур белый п/б	Сары пандас п/б
Галловая кислота	1,5	1,0	–	0,7
(+)-D-катехин	–	9,6	–	2,8
(-)-эпикатехин	9,9	3,7	3,0	5,5
Сиреневая кислота	0,5	0,3	–	–
Кафтаровая кислота	161,9	31,2	4,3	10,7
Коутаровая кислота	5,1	4,3	0,6	1,3
2-S-глутатионил кафтаровая кислота	11,6	15,4	1,5	17,3
Олигомерные проантоцианидины	23,7	67,7	21,4	13,3
Полимерные проантоцианидины	144,3	228,6	108,6	101,4
Сумма фенольных веществ ВЭЖХ	360,0	360,0	140,0	150,0

п/б – переработка винограда по белому способу; п/к – переработка винограда по красному способу.

п/б – white winemaking method; п/к – red winemaking method.

Таблица 4. Состав фенольных веществ розового и красных игристых вин

Table 4. Phenolics in rose and red sparkling wines

Наименование показателя, мг/дм ³	Кефесия п/б	Кефесия п/к	Джеват кара п/к	Эким кара п/к
Галловая кислота	–	3,2	3,3	2,8
(+)-D-катехин	–	5,5	7,1	6,3
(-)-эпикатехин	3,8	12,1	10,9	7,9
Сиреневая кислота	1,1	2,7	0,7	3,1
Каftarовая кислота	4,4	96,1	86,9	36,5
Коутаровая кислота	–	17,1	8,1	5,3
Кофейная кислота	1,4	–	–	–
2-S-глутатионил каftarовая кислота	18,0	21,8	10,8	5,3
п-кумаровая кислота	–	–	–	0,4
Кверцетин-3-O-глюкозид	–	12,5	1,8	2,6
Кверцетин	–	1,6	1,1	0,4
Дельфинидин-3-O-глюкозид	–	13,6	2,8	1,9
Цианидин-3-O-глюкозид	–	1,9	1,8	–
Петунидин-3-O-глюкозид	–	21,4	4,8	7,4
Пеонидин-3-O-глюкозид	–	56,5	7,5	1,4
Мальвидин-3-O-глюкозид	5,0	170,6	45,2	134,7
Дельфинидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид	–	8,2	–	1,8
Цианидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид	–	3,1	–	0,4
Петунидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид	–	3,8	0,5	0,9
Дельфинидин-3-O-(6-O-п-кумароил)-глюкозид	–	7,2	0,8	0,6
Пеонидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид	–	24,9	2,2	0,8
Мальвидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид	–	66,5	9,5	9,3
Цианидин-3-O-(6-O-п-кумароил)-глюкозид	–	1,4	1,2	0,7
Петунидин-3-O-(6-O-п-кумароил)-глюкозид	–	1,3	0,5	0,8
Мальвидин-3-O-(6-O-п-кумароил)-глюкозид	–	15,8	8,6	10,9
Олигомерные проантоцианидины	23,5	118,6	56,2	48,9
Полимерные проантоцианидины	173,9	1555,3	535,0	475,7
Сумма красящих веществ ВЭЖХ	5,0	396,2	85,4	171,6
Сумма фенольных веществ ВЭЖХ	230,0	2240,0	810,0	770,0

п/б – переработка винограда по белому способу; п/к – переработка винограда по красному способу.

п/б – white winemaking method; п/к – red winemaking method.

эффектом. Основным красящим веществом розового игристого вина из сорта Кефесия был мальвидин-3-O-глюкозид. В красном игристом вине из этого сорта доля красящих веществ распределилась следующим образом: мальвидин-3-O-глюкозид – 43 %, мальвидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид – 16,8 %, пеонидин-3-O-глюкозид – 14,3 %, пеонидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид – 6,3 %, петунидин-3-O-глюкозид – 5,4 %. В образце игристого вина из винограда сорта Джеват кара доля красящих веществ распределилась следующим образом: мальвидин-3-O-глюкозид – 52,9 %, мальвидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид – 11,1 %, мальвидин-3-O-(6-O-п-кумароил)-глюкозид – 10,1 %, пеонидин-3-O-глюкозид – 8,8 %, петунидин-3-O-глюкозид – 5,6 %. В образце из винограда сорта Эким кара доля красящих веществ распределилась следующим образом: мальвидин-3-O-глюкозид – 78,5 %, мальвидин-3-O-(6-O-п-кумароил)-глюкозид – 6,4 %, мальвидин-3-O-(6-O-ацетил)-глюкозид – 5,4 %. Доля антоцианов в сумме фенольных веществ составила в образцах

Кефесия п/б – 2,2 %, Кефесия п/к – 17,7 %, Джеват кара п/к – 10,5 %, Эким кара п/к – 22,3 %.

На следующем этапе проанализировали спектры оптических плотностей игристых вин на разных длинах волн (рис. 2).

Анализ спектров белых вин показал, что наибольшая высота пиков в районе 340–360 нм отмечена у образцов игристых вин из сортов Солдаия и Шабаш (с. Вилино). Это связано с высоким содержанием в них фенольных веществ. У образцов Сары пандас и Кокур белый (с. Морское) пики в районе 340–360 нм практически накладывались друг на друга, что связано с близкими концентрациями суммы фенольных веществ в них. Отличия наблюдались в виде небольшой «ступеньки» в районе 380 нм, которая была на разной высоте (у образца игристого вина из Кокура белого выше). Установлена корреляция между содержанием полимерных проантоцианидинов и значением оптической плотности при 380 нм ($r = 0,603$), которая считается средней. График розового игристого вина из

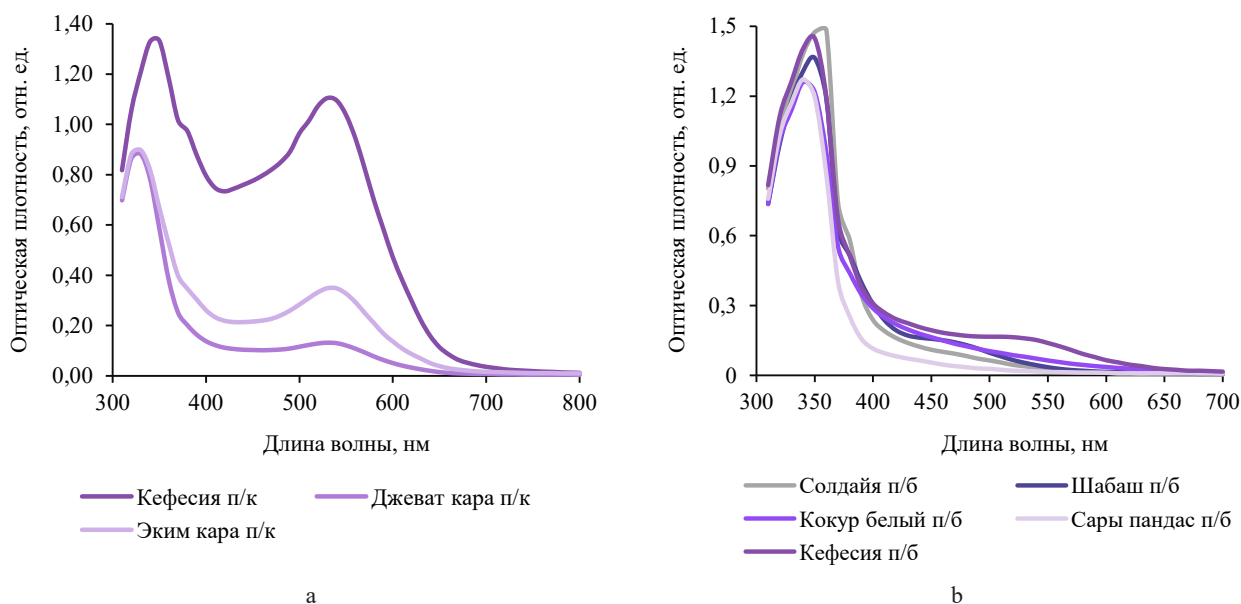


Рисунок 2. Спектры оптических плотностей игристых вин: а – переработка винограда по красному способу; б – переработка винограда по белому способу

Figure 2. Optical density of sparkling wines: a – red winemaking method; b – white winemaking method

сорта Кефесия отличался тем, что имел небольшое возвышение в районе 520–540 нм. Это связано с наличием в его составе определенного количества антоцианов, которые придавали ему розовый оттенок.

В ходе анализа спектров красных игристых вин установлено, что образцы из сортов Джеват кара и Эким кара имели близкие по высоте пики в районе 320–340 нм, как и близкое содержание суммы фенольных веществ. Однако в районе 520–540 нм пик образца из сорта Эким кара был выше образца из сорта Джеват кара. График спектра оптической плотности красного образца игристого вина из сорта Кефесия был выше образцов из сортов Эким кара и Джеват кара на всем диапазоне волн. Это связано с большим содержанием фенольных веществ и антоцианов. Корреляция между оптической плотностью при длине волны 520 нм и массовой концентрацией суммы антоцианов составила $r = 0,998$. Такая разница в концентрации фенольных и красящих веществ между образцом из Кефесии и образцами из сортов Джеват кара и Эким кара свидетельствует о том, что желательно сбор винограда из сортов Джеват кара и Эким кара проводить при более высокой массовой концентрации сахаров, чем 18 г/100 см^3 , чтобы в них накапливался достаточный технологический запас фенольных и красящих веществ для обеспечения интенсивной окраски готовой продукции.

На следующем этапе провели органолептическую оценку молодых игристых вин.

В таблице 5 представлены общие характеристики аромата и вкуса, а также оценки, выставленные дегустационной комиссией по 10-балльной системе (минимально допустимая оценка 8,8 баллов).

Из белых игристых вин высокие дегустационные оценки ($\geq 9,0$ баллов) получили образцы из сортов Коккур белый, Сары пандас и Солдайка за чистый и яркий сортовой аромат и гармоничный вкус. Оценка образца из сорта Шабаш была ниже из-за легкой дрожжевой «задушки» в букете и полного, но не достаточно сбалансированного, вкуса. Оценка розового игристого вина из сорта Кефесия, которое имело яркий сортовой аромат, была снижена из-за несбалансированного и плоского вкуса, связанного с низким содержанием кислот. Из красных игристых вин наибольшую дегустационную оценку получил образец, выработанный из сорта Кефесия, который имел насыщенный темно-гранатовый цвет, чистый сортовой аромат и гармоничный вкус с легкой горчинкой, появившейся из-за относительно высокого содержания полифенолов.

Также было проведено тестирование по основным дескрипторам, которые объединили в подгруппы по направлению восприятия букета и вкуса (рис. 3–10).

Основу ароматического профиля 3 белых игристых вин, получивших высокие дегустационные оценки, составляли цветочные и плодово-фруктовые дескрипторы с различными оттенками. В ароматическом комплексе игристого вина из сорта Шабаш цветочные дескрипторы не были обнаружены, но были сильно развиты травянистые и сенные оттенки. Основу ароматического комплекса розового вина из сорта Кефесия составили фруктовые и ягодные дескрипторы с легкими цветочными, сухофруктовыми, пряными и карамельными оттенками. Основу ароматического комплекса красного вина из сорта Кефесия составили ягодные, сухофруктовые, пряные и фруктовые дескрипторы

Таблица 5. Органолептическая характеристика опытных образцов игристых вин

Table 5. Sensory profile of experimental sparkling wines

Наименование вина	Характеристика	Балл
Шабаш п/б, с. Вилино	Пенообразование в бокале хорошее. Пена среднедисперсная и быстропроходящая. Время существования 15,1 с. «Игра» хорошая с образованием «четок». Прозрачный. Цвет соломенный. Букет плодового направления с травянисто-сенными оттенками, присутствует легкая окисленность и проходящая «задушка». Вкус полный и экстрактивный, хорошая насыщенность CO ₂ .	8,88
Солдайка п/б, с. Вилино	Пенообразование в бокале хорошее. Пена мелкодисперсная. Время существования 9,0 с. «Игра» интенсивная с образованием мелких четок и «фонтанчика». Прозрачный. Цвет соломенный. Букет цветочно-плодового направления с пряно-растительно-сенными оттенками и дюшесными нотками. Вкус свежий и гармоничный, с пикантной горчинкой, хорошая насыщенность CO ₂ .	9,00
Кокур белый п/б, с. Морское	Пенообразование в бокале хорошее. Пена мелкодисперсная и устойчивая с образованием венчика и островков в бокале. Время существования 26,0 с. «Игра» интенсивная с образованием мелких четок и «фонтанчика». Прозрачный. Цвет соломенный. Букет тонкий, цветочно-фруктово-леденцового направления с дюшесными нотками. Вкус свежий, полный и гармоничный, хорошая насыщенность CO ₂ .	9,08
Сары пандас п/б, с. Морское	Пенообразование в бокале хорошее. Пена среднедисперсная. Время существования 24,2 с. «Игра» продолжительная и интенсивная с образованием мелких четок и «фонтанчика». Прозрачный. Цвет светло-соломенный. Букет сложный, цветочно-фруктового направления с леденцовыми оттенками, нотками персика и сухофруктов. Вкус гармоничный и полный, фруктовый (персик, манго), хорошая насыщенность CO ₂ .	9,06
Кефесия п/б, с. Морское	Пенообразование в бокале хорошее. Пена крупнодисперсная и быстропроходящая. Время существования 8,8 с. «Игра» хорошая с образованием мелких четок и «фонтанчика». Прозрачный. Цвет бледно-розовый. Букет сложный, ягодно-фруктового направления с пряными нотками, оттенками карамели и ореха. Вкус плоский, полный и мягкий.	8,90
Джеват кара п/к, с. Морское	Пенообразование в бокале хорошее. Пена среднедисперсная. Время существования 16,0 с. «Игра» средняя с образованием мелких четок. Прозрачный. Цвет светло-рубиновый. Букет не выраженный, ягодно-фруктового направления с травянистыми оттенками, проходящая «задушка». Вкус плоский, облегченный и пропадающий.	8,82
Эким кара п/к, с. Морское	Пенообразование в бокале хорошее. Пена среднедисперсная. Время существования 64 с. «Игра» продолжительная с образованием мелких четок и «фонтанчика». Прозрачный. Цвет рубиновый. Букет ягодно-травянистого направления с оттенками вишни, проходящая «задушка». Вкус ягодный и облегченный.	8,86
Кефесия п/к, с. Морское	Пенообразование в бокале хорошее. Пена мелкодисперсная. Время существования 24 с. «Игра» продолжительная с образованием мелких четок и «фонтанчика». Прозрачный. Цвет насыщенный, темно-гранатовый. Букет ягодно-пряного направления с нотками сухофруктов, черники и смородины, с дымно-копченными оттенками. Вкус полный, с горчинкой в послевкусии.	8,95

п/б – переработка винограда по белому способу; п/к – переработка винограда по красному способу.

п/б – white winemaking method; п/к – red winemaking method.

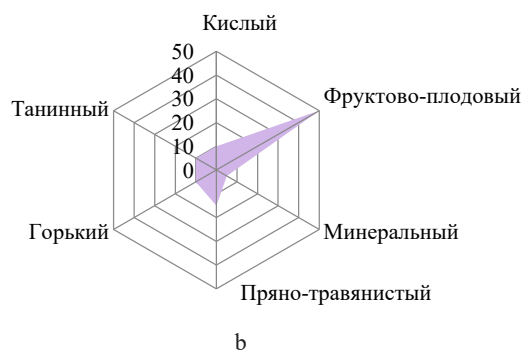
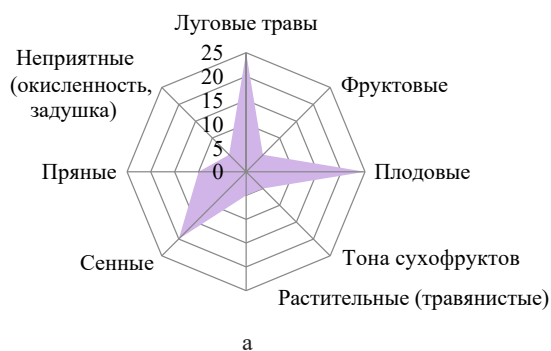


Рисунок 3. Ароматический (a) и вкусовой (b) профили молодого игристого вина Шабаш

Figure 3. Aroma (a) and flavor (b): Shabash

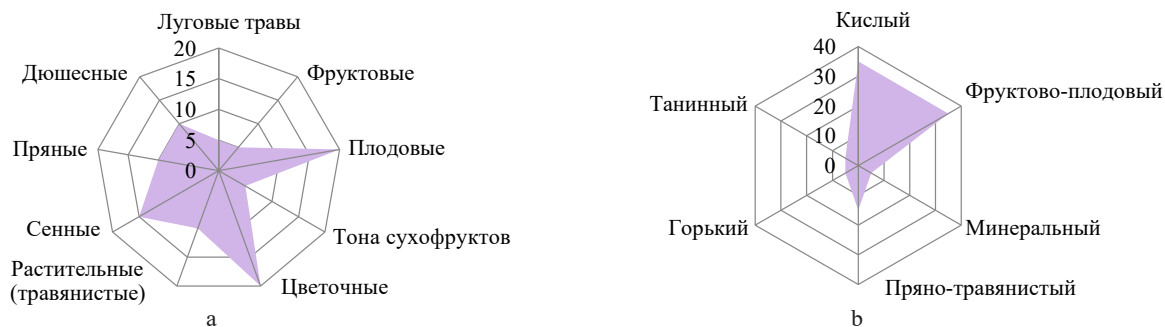


Рисунок 4. Ароматический (а) и вкусовой (b) профили молодого игристого вина Солдайя

Figure 4. Aroma (a) and flavor (b): Soldaya

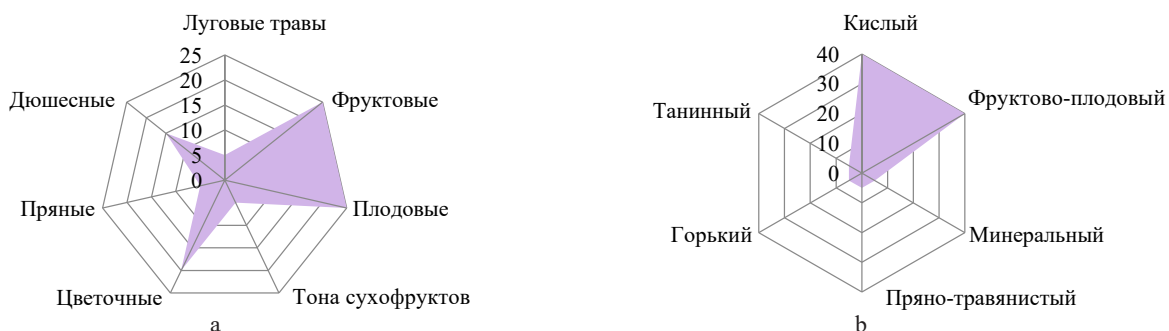


Рисунок 5. Ароматический (а) и вкусовой (b) профили молодого игристого вина Кокур белый

Figure 5. Aroma (a) and flavor (b): Kokur Belyi

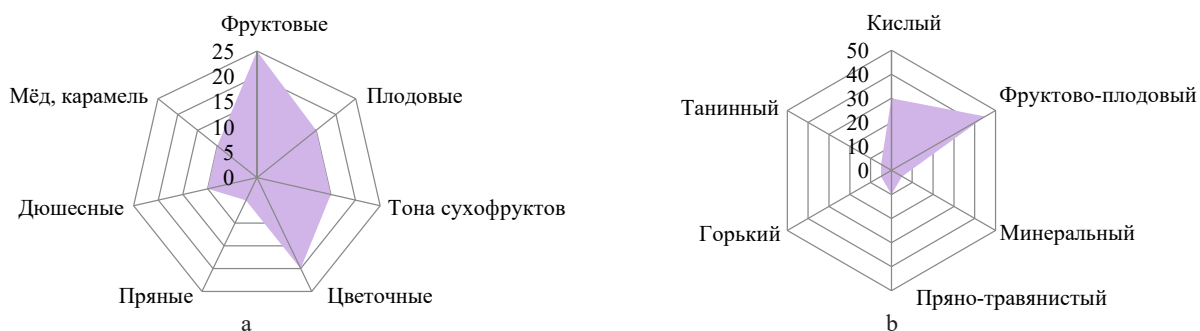


Рисунок 6. Ароматический (а) и вкусовой (b) профили молодого игристого вина Сары пандас

Figure 6. Aroma (a) and flavor (b): Sarah Pandas

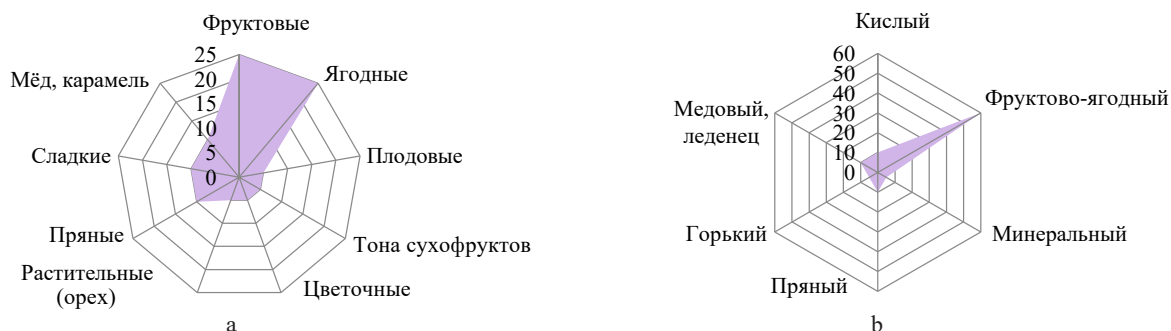


Рисунок 7. Ароматический (а) и вкусовой (b) профили молодого игристого вина Кефесия (по белому)

Figure 7. Aroma (a) and flavor (b): Kefesiya (white winemaking method)

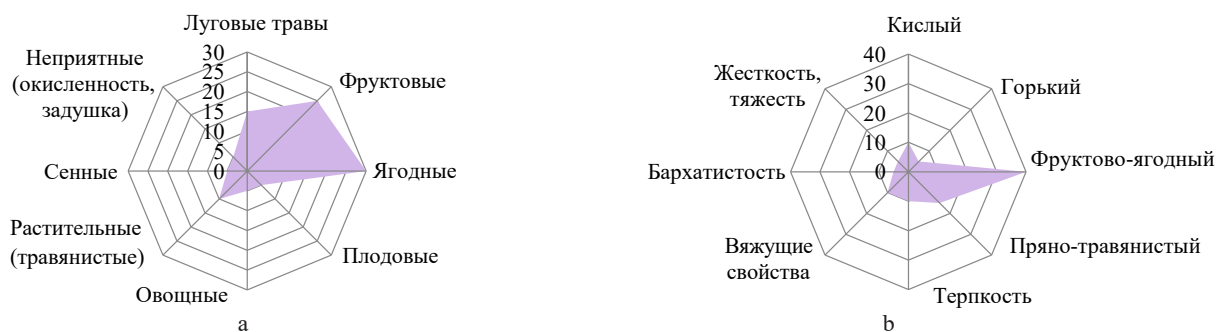


Рисунок 8. Ароматический (а) и вкусовой (b) профили молодого игристого вина Джеват кара (по красному)

Figure 8. Aromatic (a) and flavor (b): Dzhevat Kara (red winemaking method)

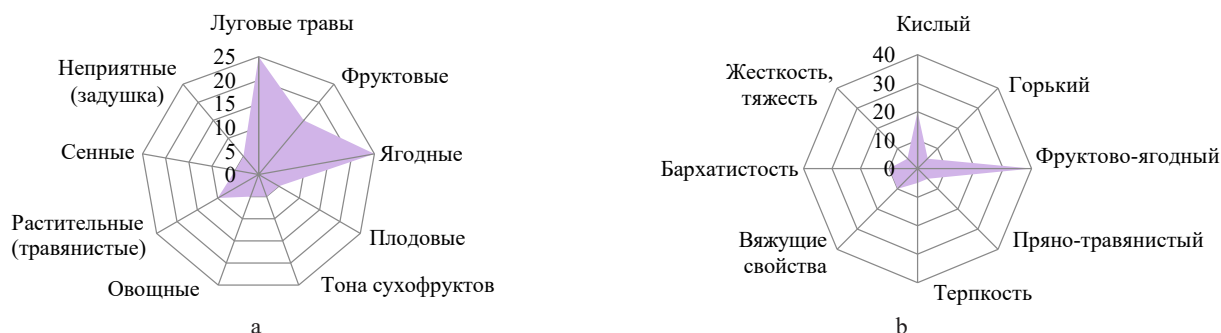


Рисунок 9. Ароматический (а) и вкусовой (b) профили молодого игристого вина Эким кара (по красному)

Figure 9. Aroma (a) and flavor (b): Ekim Kara (red winemaking method)

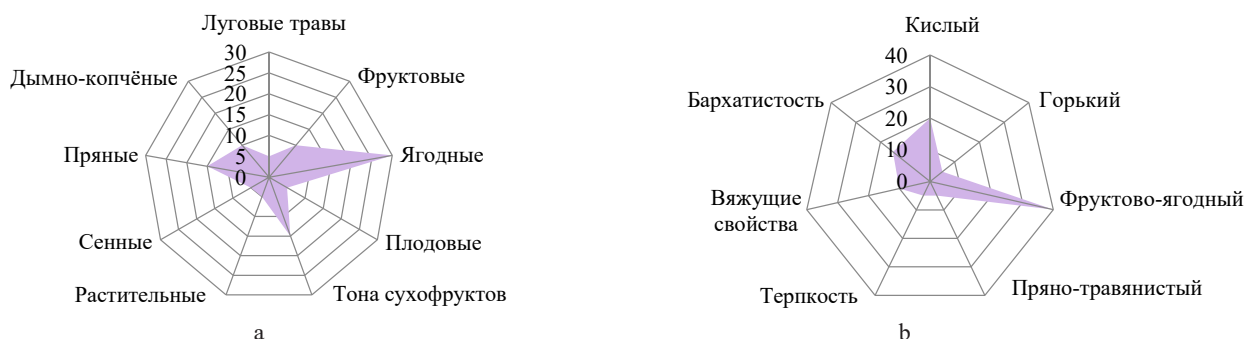


Рисунок 10. Ароматический (а) и вкусовой (b) профили молодого игристого вина Кефесия (по красному)

Figure 10. Aroma (a) and flavor (b): Kefesiya (red winemaking method)

с дымно-копчеными оттенками. В ароматическом комплексе красного игристого вина из сорта Джеват кара обнаружены ягодные, фруктовые и различные травянистые дескрипторы с плодовыми и овощными оттенками, а также легкая дрожжевая «задушка». В ароматическом комплексе красного игристого вина из сорта Эким кара обнаружены ягодные и травянистые оттенки с фруктовыми и плодовыми оттенками, тонами сухофруктов и легкой дрожжевой «задушкой». Травянистые оттенки красных игристых вин из сортов Эким кара и Джеват кара свидетельствовали о недостаточно развитом ароматическом комплексе,

не позволившем раскрыться сортовым особенностям, связанным с ранним сбором винограда при сахаристости менее 18 г/100 см³.

Основу вкусового профиля белых игристых вин составили фруктово-плодовый и кислый дескрипторы с пряно-травянистым и танинными оттенками. В игристом вине из сорта Шабаш доминировали фруктово-плодовый и пряно-травянистый дескрипторы с более сильным танинным оттенком и менее сильным кислым дескриптором, что делало вкус менее сбалансированным. Во вкусовом профиле розового вина из сорта Кефесия доминировал фруктово-ягодный дескриптор

с легкими пряными и леденцовыми оттенками, а также слабым кислым дескриптором. В результате вкус был разбалансированным и плоским. Вкусовой профиль красного игристого вина Джеват кара состоял из фруктово-ягодного, пряно-травянистого и вяжущего дескрипторов, а также слабых бархатистого и кислого дескрипторов, что нарушало гармонию вкуса. Вкусовой профиль красного игристого вина Эким кара состоял из фруктово-ягодного, кислого, вяжущего и бархатистого дескрипторов, а также слабых пряно-травянистого, горького и терпкого, что способствовало более сбалансированному вкусу, чем в образце из Джеват кары. Вкусовой профиль красного игристого вина из сорта Кефесия состоял из фруктово-ягодного, кислого, вяжущего и бархатистого дескрипторов, а также слабых горького и терпкого. Вкус этого вина был еще больше сбалансирован за счет большей кислотности, придавшей гармонию данному образцу.

В полученных молодых игристых винах определили показатели типичных свойств (табл. 6, рис. 11 и 12).

Согласно полученным данным насыщенность диоксидом углерода всех образцов была высокой, равновесное избыточное давление CO_2 в бутылке находи-

лось в диапазоне 600–1000 кПа. Содержание диоксида углерода в бутылке составило 8,004–12,807 г. Это связано не с сортовыми особенностями, а с содержанием CO_2 и остаточных сахаров в тиражной смеси в момент закладки тиража. По показателю массовой доли связанных форм CO_2 игристые вина из красных сортов винограда превосходили образцы из белых сортов. Исключением являлся образец из сорта Солдайя из-за большого содержания веществ экстракта, способных связывать при повышении давления диоксид углерода. Это природные полимеры и их комплексы (полисахариды, белково-полифенольные комплексы и т. п.). Кроме того, накоплению связанных форм CO_2 способствует медленная скорость сбраживания сахаров в ходе вторичного брожения в бутылке при отсутствии перепадов температуры и лишних механических воздействий.

Анализ игристых свойств образцов (рис. 11 и 12) показал, что среди белых игристых вин лучшими игристыми свойствами (высокий коэффициент десорбции, низкая скорость десорбции CO_2 , меньшая величина угла наклона кривой десорбции CO_2) обладал образец из винограда сорта Солдайя. Среди игристых вин, выработанных из красных сортов винограда, лучшими

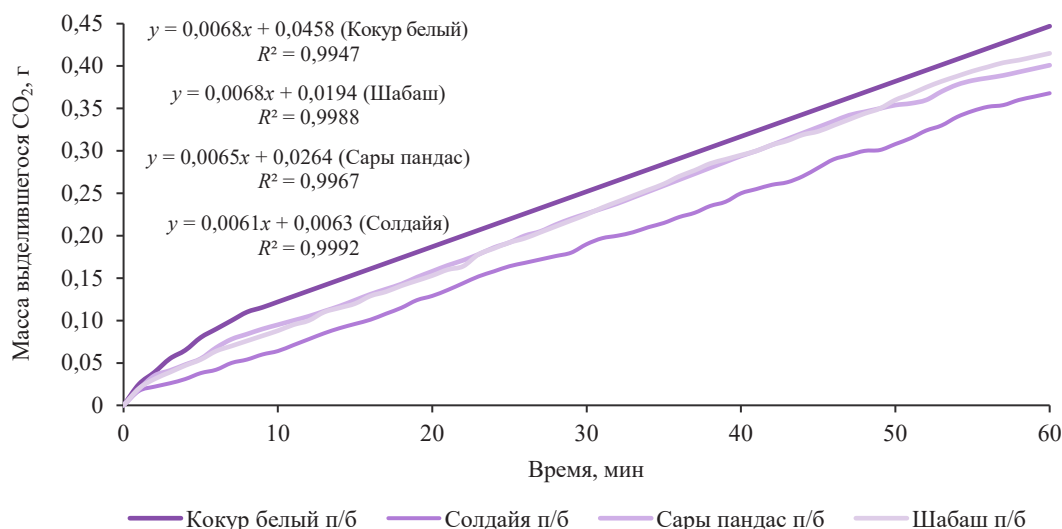
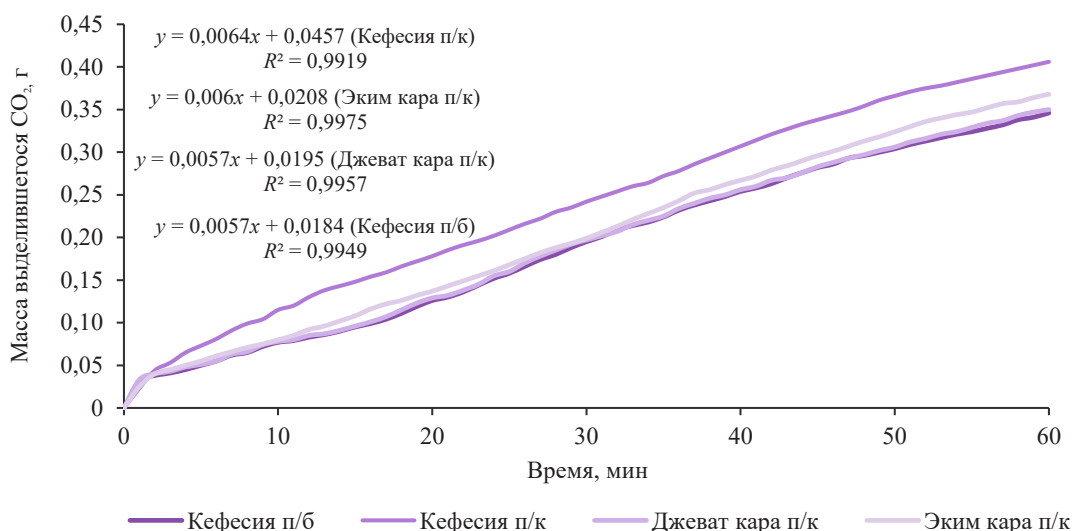
Таблица 6. Содержание различных форм диоксида углерода в молодых игристых винах и их игристые свойства

Table 6. CO_2 forms in young sparkling wines and their sparkling properties

Наименование вина	Равновесное избыточное давление CO ₂ , кПа	Содержание CO ₂ в бутылке (0,75 дм ³), г				Массовая доля связанного CO ₂ , %	Игристые свойства		
		Всего в бутылке	Газообразного	Растворенного	Связанного		Скорость десорбции CO ₂ , мг/мин	Угол наклона кривой десорбции CO ₂ , °	Коэффициент десорбции CO ₂
Белые									
Солдайя п/б (с. Вилино)	750	10,154	0,305	8,229	1,620	15,953	6,133	0,3514	82,174
Шабаш п/б (с. Вилино)	780	10,154	0,275	8,544	1,336	13,154	6,917	0,3963	78,940
Кокур белый п/б (с. Морское)	600	8,004	0,251	7,023	0,730	9,122	7,450	0,4268	69,664
Сары пандас п/б (с. Морское)	620	8,233	0,259	7,045	0,929	11,282	6,683	0,3829	74,065
Розовые									
Кефесия п/б (с. Морское)	1000	12,807	0,312	10,087	2,407	18,798	5,767	0,330	89,306
Красные									
Кефесия п/к (с. Морское)	720	9,605	0,326	7,827	1,453	15,124	6,767	0,388	81,133
Джеват кара п/к (с. Морское)	600	8,599	0,199	7,087	1,313	15,267	5,833	0,334	85,029
Эким кара п/к (с. Морское)	760	10,292	0,268	8,471	1,552	15,078	6,133	0,351	83,152

п/б – переработка винограда по белому способу; п/к – переработка винограда по красному способу.

п/б – white winemaking method; п/к – red winemaking method.

Рисунок 11. Динамика десорбции CO_2 из белых молодых игристых винFigure 11. CO_2 desorption in young white sparkling winesРисунок 12. Динамика десорбции CO_2 из розового и красных молодых игристых винFigure 12. CO_2 desorption in rose and red young sparkling wines

игристыми свойствами обладали образец розового вина из сорта Кефесия и образец красного игристого вина из сорта Джеват кара.

Корреляция между скоростью десорбции CO_2 и массовой долей связанных форм CO_2 составила $r = -0,862$, между углом наклона кривой десорбции CO_2 и массовой долей связанных форм CO_2 – $r = -0,861$, между коэффициентом десорбции CO_2 и массовой долей связанных форм CO_2 – $r = 0,977$.

Выводы

Из крымских аборигенных сортов винограда можно вырабатывать высококачественные молодые игри-

стые вина с оригинальными органолептическими показателями и хорошими типичными свойствами. Особенностью крымских аборигенных сортов является высокое содержание фенольных веществ при низкой концентрации органических кислот. Ранний сбор при минимально допустимой массовой концентрации сахаров не всегда способствует увеличению массовой концентрации титруемых кислот, но может привести к ослаблению сортовых особенностей аромата и вкуса. По совокупности различных показателей качества наиболее перспективными из исследуемых сортов винограда для приготовления игристых вин являются Кокур белый, Сары пандас, Солдайя и Кефесия.

Для остальных сортов необходимо подбирать технологические приемы, способствующие сохранению баланса между веществами ароматического комплекса, органическими кислотами и фенольными веществами. Технология приготовления молодых игристых вин бутылочным способом из недоброжеленного сула позволяет получать высококачественную продукцию с ярким сортовым ароматом. Внедрение этой технологии увеличит выпуск высококачественных отечественных игристых вин в год урожая винограда, в том числе в условиях малых фермерских хозяйств без использования сложного технологического оборудования. Поэтому необходимо внести данный вид продукции в нормативную документацию. Исследования этого направления планируется продолжить.

Критерии авторства

И. П. Лутков – постановка научной гипотезы, формулирование цели, проведение исследований и подготовка статьи. А. С. Макаров – осуществление общего руководства исследованиями. Н. А. Шмигельская – редактирование статьи и формулирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Евгению Сластьеву, Веронике Олейниковой, Георгию Зайцеву, Екатерине Тимошенко.

Contribution

I.P. Lutkov developed the hypothesis, designed the research, conducted the experiments, and wrote the manuscript. A.S. Makarov supervised the research. N.A. Shmigelskaya edited the article and formulated the conclusions.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to Evgeniy Slastyev, Veronica Oleynikova, Georgy Zaitsev, and Ekaterina Timoshenko.

References

1. Jeandet P, Vasserot Y, Liger-Belair G, Marchal R. Sparkling wine production. In: Joshi VK, editor. Handbook of enology: Principles, practices and recent innovations. Vol. 3. Asiatech Publishers; 2011. pp. 1–52.
2. Lutkov IP, Yermolin DV, Zadorozhnaya DS, Lutkova NYu. Perspective yeast races for young sparkling wines with a muscat aroma. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):312–322. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-312-322>
3. Ganich VA, Naumova LG, Matveyeva NV. Don autochthonous grapevine varieties for expanding the assortment of vineyards in the lower Don region. Fruit Growing and Viticulture of South Russia. 2020;(63):30–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2020-3-63-30-44>
4. Mukailov MD, Isrigova TA, Salmanov MM, Magomedov MG, Makuev GA. Technological features of autochthon technical varieties of grapes in the conditions of South Dagestan. Daghestan GAU Proceedings. 2021;12(4):35–40. (In Russ.). [Технологические особенности автохтонных технических сортов винограда в условиях Южного Дагестана / М. Д. Мукайлов [и др.] // Известия Дагестанского ГАУ. 2021. Т. 12. № 4. С. 35–40.]. <https://www.elibrary.ru/KPRCRE>
5. Ganich VA. Autochthonous grapevine varieties of Georgia as sources for breeding. Russian grapes. 2022;19:10–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.32904/2712-8245-2022-19-10-16>
6. Ilnitskaya E, Makarkina M, Stepanov I, Avidzba M, Malandzia V. Study of the unknown vine genotype found in Abkhazia. BIO Web of Conferences. 2020;25. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202502008>
7. Iliev A, Yankova P. The local grape varieties of Bulgaria. Viticulture Studies. 2021;1(1):21–28. <https://doi.org/10.52001/vis.2021.3>
8. Yoncheva T, Kantor A, Ivanišova E, Nikolaieva N. Chemical, sensory and antioxidant characteristics of Bulgarian wines from native cultivars. Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology and Nutrition. 2019;14(1–2):53–59. <https://doi.org/10.31895/hcptbn.14.1-2.1>
9. Hajdu E. Viticulture of Hungary. Acta Agraria Debreceniensis. 2018;150:175–182. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/150/1713>
10. Miliordos DE, Merkouropoulos G, Kogkou C, Arseniou S, Alatzas A, Proxenia N, *et al.* Explore the rare – Molecular identification and wine evaluation of two autochthonous greek varieties: “Karnachalades” and “Bogialamades”. Plants. 2021;10(8). <https://doi.org/10.3390/plants10081556>
11. Copper AW, Collins C, Bastian S, Johnson T, Koundouras S, Karaolis C, *et al.* Vine performance benchmarking of indigenous Cypriot grape varieties Xynisteri and Maratheftiko. OENO One. 2020;54(4):935–954. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.3863>

12. De Michele R, La Bella F, Gristina AS, Fontana I, Pacifico D, Garfi G, et al. Phylogenetic relationship among wild and cultivated grapevine in Sicily: A hotspot in the middle of the Mediterranean basin. *Frontiers in Plant Science*. 2019;(10). <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01506>
13. Sancho-Galán P, Amores-Arrocha A, Palacios V, Jiménez-Cantizano A. Identification and characterization of white grape varieties autochthonous of a warm climate region (Andalusia, Spain). *Agronomy*. 2020;10(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy10020205>
14. Sancho-Galán P, Amores-Arrocha A, Palacios V, Jiménez-Cantizano A. Preliminary study of somatic variants of Palomino Fino (*Vitis vinifera* L.) grown in a warm climate region (Andalusia, Spain). *Agronomy*. 2020;10(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy10050654>
15. Sancho-Galán P, Amores-Arrocha A, Palacios V, Jiménez-Cantizano A. Genetical, morphological and physicochemical characterization of the autochthonous cultivar “Uva Rey” (*Vitis vinifera* L.). *Agronomy*. 2019;9(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy9090563>
16. Jiménez-Cantizano A, Amores-Arrocha A, Gutiérrez-Escobar R, Palacios V. Identification and relationship of the autochthonous “Romé” and “Rome Tinto” grapevine cultivars. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2018;16(4).
17. Wang F, Yao M, Breahna E, Arpentin G. Sensory evaluation of Fetească Neagră wine in Republic Moldova. *Magarach. Viticulture and Vinemaking*. 2022;24(1):90–94. <https://doi.org/10.35547/IM.2022.38.66.014>
18. Margaryan K, Maul E, Muradyan Z, Hovhannisyan A, Devejian H, Melyan G, et al. Armenian national grapevine collection: Conservation, characterization and prospects. *BIO Web of Conferences*. 2019;12. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191201002>
19. Margaryan K, Kuchukyan E, Melyan G. Strategy of preservation and revival of vanishing native grape varieties in Armenia. *Viticulture and Winemaking*. 2020;49:65–67.
20. Tkachenko OB, Trinkal OV. The aroma peculiarities of some white wines from autochthonous grapes varieties from Western Europe and Ukraine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015;2(10):40–45. (In Russ.).
21. Iukuridze EhZh. Results of examinations of Shabo terroir wines physical chemical properties. *Technology Audit and Production Reserves*. 2015;2(4):19–22. (In Russ.).
22. Natic M, Dabi Zagorac D, Gašić U, Dojčinović B, Ćirić I, Relić D, et al. Autochthonous and international grape varieties grown in Serbia – Phenolic and elemental composition. *Food Bioscience*. 2021;40. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100889>
23. Lakićević SH, Karabegović IT, Cvetković DJ, Lazić ML, Jančić R, Popović-Djordjević JB. Insight into the aroma profile and sensory characteristics of “Prokupac” Red wine aromatised with medicinal herbs. *Horticulturae*. 2022;8(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040277>
24. Pavlešić T, Martinović LS, Peršurić Ž, Maletić E, Mihaljević MŽ, Stupić D, et al. From the autochthonous grape varieties of the Kastav region (Croatia) to the Belica wine. *Food Technology and Biotechnology*. 2022;60(1):11–20. <https://doi.org/10.17113/ftb.60.01.22.7264>
25. Maraš V, Tello J, Gazivoda A, Mugoša M, Perišić M, Raičević J, et al. Population genetic analysis in old Montenegrin vineyards reveals ancient ways currently active to generate diversity in *Vitis vinifera*. *Scientific Reports*. 2020;10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71918-7>
26. Ilina Dumitru AM, Manolescu AE, Sumedrea DI, Popescu CF, Cosmulescu S. Genetic diversity of some autochthonous white grape varieties from Romanian germplasm collections. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2023;59(2): 55–66. <https://doi.org/10.17221/45/2022-CJGPB>
27. Shecori S, Kher MM, Tyagi K, Lerno L, Netzer Y, Lichter A, et al. A field collection of indigenous grapevines as a valuable repository for applied research. *Plants*. 2022;11(19). <https://doi.org/10.3390/plants11192563>
28. Ayoub M-J, Legras J-L, Abi-Nakhoul P, Nguyen H-V, Saliba R, Gaillardin C. Lebanon’s native oenological *Saccharomyces cerevisiae* flora: Assessment of different aspects of genetic diversity and evaluation of winemaking potential. *Journal of Fungi*. 2021;7(8). <https://doi.org/10.3390/jof7080678>
29. Marsal G, Méndez JJ, Mateo JM, Ferrer S, Canals JM, Zamora F, et al. Molecular characterization of *Vitis vinifera* L. local cultivars from volcanic areas (Canary Islands and Madeira) using SSR markers. *OENO One*. 2019;53(4). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.4.2404>
30. Volynkin V, Polulyakh A, Levchenko S, Vasylyk I, Likhovskoi V. Autochthonous grape species, varieties and cultivars of Crimea. *Acta Horticulturae*. 2019;259:91–98. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1259.16>
31. Levchenko S, Likhovskoi V, Vasylyk I, Volynkin V. Phenolic compounds in the Crimean autochthonous grape cultivars. *Acta Horticulturae*. 2021;1308:181–188. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1308.26>
32. Ostroukhova E, Levchenko S, Vasylyk I, Volynkin V, Lutkova N, Boyko V. Comparison of the phenolic complex of Crimean autochthonous and classic white-berry grape cultivars. *E3S Web of Conferences*. 2020;161. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101059>

33. Makarov A, Lutkov I, Shmigelskaya N, Maksimovskaia V, Sivochoub G. Using of autochthonous grape varieties in the production of sparkling wines. BIO Web of Conferences. 2021;39. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213907001>
34. Velázquez R, Zamora E, Álvarez ML, Ramírez M. Using *Torulaspora delbrueckii* killer yeasts in the elaboration of base wine and traditional sparkling wine. International Journal of Food Microbiology. 2019;289:134–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.09.010>
35. Makarov AS, Lutkov IP. Yeast race effect on the quality of base and young sparkling wines. Foods and Raw Materials. 2021;9(2):290–301. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-290-301>
36. Merzhanian AA. Physics and chemistry of sparkling wines. Moscow: Pishchevaya promyshlennost'; 1979. 271 p. (In Russ.). [Мержаниан А. А. Физико-химия игристых вин. М.: Пищевая промышленность, 1979. 271 с.].
37. Niimi J, Boss PK, Bastian SEP. Sensory profiling and quality assessment of research Cabernet Sauvignon and Chardonnay wines; quality discrimination depends on greater differences in multiple modalities. Food Research International. 2018;106:304–316. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.060>
38. Batçioğlu K, Küçükbay F, Alagöz MA, Günel S, Yilmaztekin Y. Antioxidant and antithrombotic properties of fruit, leaf, and seed extracts of the Halhalı olive (*Olea europaea* L.) native to the Hatay region in Turkey. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):84–93. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-557>
39. Büyükkormaz Ç, Küçükbay FZ. Kumquat fruit and leaves extracted with different solvents: phenolic content and antioxidant activity. Foods and Raw Materials. 2022;10(1):51–66. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-1-51-66>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2484>
<https://elibrary.ru/WSJYHL>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Влияние винных и виноградных спиртов на качество напитков из виноградного сырья



О. Н. Шелудько^{1,*}, А. В. Прах¹,
Л. Э. Чемисова¹, Р. Н. Бахметов²

¹ Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия
Краснодар, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия
имени Я. И. Потапенко , Новочеркасск, Россия

Поступила в редакцию: 28.02.2023

Принята после рецензирования: 25.04.2023

Принята к публикации: 02.05.2023

*О. Н. Шелудько: scheludcko.olga@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8655-3375>

А. В. Прах: <https://orcid.org/0000-0003-4256-9898>

Л. Э. Чемисова: <https://orcid.org/0000-0001-9377-5515>

Р. Н. Бахметов: <https://orcid.org/0000-0001-8174-3225>

© О. Н. Шелудько, А. В. Прах, Л. Э. Чемисова,
Р. Н. Бахметов, 2024



Аннотация.

В виноделии потерявший товарный вид столовый виноград является отходом производства. Однако его технологические свойства позволяют рассматривать ягоды такого вида и качества как сырье для винных и виноградных спиртов. Цель работы заключалась в исследовании влияния состава и технологии спиртов на легколетучие соединения и органолептические показатели напитков.

Объектами исследования являлись напитки из виноградного сырья 6 белых и 6 красных сортов. Остановку брожения осуществляли внесением в опытные напитки винных и виноградных спиртов, полученных ректификацией дистиллятов из столового винограда, а в контрольные – зернового спирта-ректификата. Нормируемые показатели качества спиртов и напитков определяли по стандартным методикам, легколетучие соединения – газохроматографически. Дегустацию проводила дегустационная комиссия ФГБНУ СКФНЦСВВ.

Винный и виноградный спирты из столовых сортов винограда не оказали значимого влияния на нормируемые показатели и содержание летучих кислот и ацетона в напитках. Они увеличили массовые концентрации легколетучих соединений в ряду: напитки с зерновым спиртом < напитки с винным спиртом < напитки с виноградным спиртом. Содержание в напитках ацетальдегида увеличилось на 10–14 %, этилацетата – на 25–35 %, сложных эфиров – на 4,5–8,5 %, высших спиртов – на 15 %. Содержание фурфурола увеличилось в напитках с виноградным спиртом на 0,4–1,4 мг/дм³. В аромате напитков из белоягодных сортов винограда усилилось восприятие цветочно-медовых оттенков, а в аромате напитков из темнойягодных сортов винограда – лесного ореха и меда.

Винные и виноградные спирты привели к повышению содержания легколетучих соединений в напитках и оказали положительный эффект на их сенсорное восприятие. Это свидетельствует о целесообразности применения в технологии напитков спиртов, произведенных из столового винограда.

Ключевые слова. Виноделие, напитки, столовые сорта винограда, винные спирты, виноградные спирты, летучие соединения, сенсорные характеристики

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научно-инновационного проекта № НИП-20.1/22.25.

Для цитирования: Влияние винных и виноградных спиртов на качество напитков из виноградного сырья / О. Н. Шелудько [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 18–26. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2484>

Effect of Wine and Grape Spirits from Table Grape Varieties on Sensory Profile of Grape Beverages



Olga N. Sheludko^{1,*}, Anton V. Prakh¹,
Larisa E. Chemisova¹, Roman N. Bakhmetov²

¹ North-Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture and Winemaking^{ROR}, Krasnodar, Russia

² Ya.I. Potapenko All-Russian Scientific Research Institute of Viticulture and Winemaking^{ROR}, Novocherkassk, Russia

Received: 28.02.2023

Revised: 25.04.2023

Accepted: 02.05.2023

*Olga N. Sheludko: scheludcko.olga@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8655-3375>

Anton V. Prakh: <https://orcid.org/0000-0003-4256-9898>

Larisa E. Chemisova: <https://orcid.org/0000-0001-9377-5515>

Roman N. Bakhmetov: <https://orcid.org/0000-0001-8174-3225>

© O.N. Sheludko, A.V. Prakh, L.E. Chemisova, R.N. Bakhmetov, 2024



Abstract.

Table grapes that have lost their marketable appearance are considered waste products. However, such grapes still possess some technological properties that make it possible to use them as a raw material for wine and grape spirits. This research featured the effect of the composition and technology of table grape alcohols on the volatile compounds and sensory profile of grape beverages.

The study involved six white and six red grape beverages. In the test samples, the fermentation process was stopped by adding wine spirits and grape spirits obtained by rectification of distillates from table grapes. In the control samples, the procedure involved rectified grain alcohol. The physicochemical parameters of drinks and spirits were defined by standard methods. The highly volatile compounds were determined by gas chromatography. The sensory assessment was conducted by panelists from the Winemaking Research Center of the North-Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, and Winemaking.

In this study, the wine spirits and the grape spirits obtained from table grapes had no effect on the standard indicators, e.g., volatile acids and acetoin. However, they increased the mass concentrations of highly volatile compounds in the following manner: drinks with grain alcohol < drinks with wine alcohol < drinks with grape alcohol. The content of acetaldehyde increased by 10–14% while the contents of ethyl acetate, esters, and higher alcohols increased by 25–35, 4.5–8.5, and 15%, respectively. The furfural content increased by 0.4–1.4 mg/L in the samples with grape alcohol. The samples with white grape varieties acquired a more prominent floral-honey flavor whereas those with black grapes acquired hints of hazelnut and honey.

As a result of the study, it was found that wine alcohol and grape alcohol moderately increased the content of volatile compounds in drinks and had a positive effect on their sensory perception, which proves the expediency of their use in beverage technology.

Keywords. Winemaking, beverages, table grape varieties, wine spirits, grape spirits, volatile compounds, sensory characteristics

Funding. The study was supported by the Kuban Science Foundation as part of research and innovation project Num. NIP-20.1/22.25.

For citation: Sheludko ON, Prakh AV, Chemisova LE, Bakhmetov RN. Effect of Wine and Grape Spirits from Table Grape Varieties on Sensory Profile of Grape Beverages. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):18–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2484>

Введение

Виноградарство и виноделие являются одними из ключевых отраслей агропромышленного комплекса Краснодарского края. Столовый виноград относится к основной продукции виноградарства, предназначенной для потребления населением в свежем виде [1, 2]. Однако из-за зависимости виноградного растения от условий внешней среды, технологических приемов возделывания, условий сбора и транспортировки появляется высокий процент нестандартной продукции [3–6].

Потерявший товарный вид, нереализованный столовый виноград является отходом производства. В то же время по важным качественным показателям урожая (массовая концентрация сахаров и титруемых кислот, низкий процент гнили) столовые сорта винограда близки к техническим сортам [1, 2, 7]. Следовательно, его технологические признаки и свойства позволяют рассматривать столовый виноград как полноценное технологическое сырье [8]. Переработка такого винограда при существующем уровне техники и

технологии может позволить максимально полно использовать его ценные компоненты в качестве сырья для производства винных и виноградных спиртов, тем самым снижая количество отходов производства и способствуя гармоничному переходу с линейной модели экономики к циркулярной, а также к устойчивому развитию АПК Российской Федерации [9–14].

Федеральный закон «О виноградарстве и виноделии в Российской Федерации» ввел новые виды винодельческой продукции, такие как виноградосодержащие напитки из виноградного сырья, включая ароматизированные напитки из данного сырья. Технология их производства предусматривает использование зернового этилового спирта. Целесообразность замены зернового этилового спирта на виноградный или винный спирты, произведенные из столовых сортов винограда, для реализации полного цикла производства на одном предприятии требует проведения дополнительных исследований.

Цель работы – оценить влияние винных и виноградных спиртов, полученных из столовых сортов винограда, на органолептические показатели и легколетучие соединения напитков из виноградного сырья.

Объекты и методы исследования

В работе использовали винные и виноградные спирты, полученные путем ректификации дистиллятов из столовых сортов винограда.

Для производства винных и виноградных спиртов использовали сортосмесь свежего винограда столового направления урожая 2018 г., не соответствующего по внешнему виду и массовой доли нецелых гроздей стандартизованным характеристикам товарного сорта. Массовая концентрация сахаров данного винограда составила 187,0 г/дм³, титруемых кислот в пересчете на винную кислоту – 7,0 г/дм³. Винный спирт готовили путем перегонки вина наливом с последующей ректификацией дистиллятов, виноградный спирт – путем сбраживания пикета сладкой виноградной выжимки, отделения жидкой фракции и ее перегонки на дистиллят с последующей ректификацией. Первую дистилляцию и вторую с ректификацией проводили на установке ЛУММАРК, включающей дистиллятор и ректификационную колонну. Дистиллят с объемной долей этилового спирта 30–32 % получали на дистилляторе DV-3. Перегонку дистиллята проводили на малой ректификационной установке РУМ-3. В процессе вторичной перегонки (ректификации) проводили отбор головной фракции 1–1,5 % от объема дистиллята и хвостовой фракции 9–15 %. Отбор основной фракции 15–30 % от объема дистиллята вели до снижения объемной доли этилового спирта и появления сивушного оттенка в аромате [15].

Напитки из виноградного сырья производили из формы винограда Тана-74 (СВ-12-309 × Мускат кубанский) и сортов винограда Рислинг рейнский, Курчанский (Мускат кубанский × Саперави северный) и Каберне Со-

виньон. Виноград был выращен в Анапском районе Краснодарского края, урожай 2021 и 2022 гг.

Для производства напитков из виноградного сырья свежий виноград перерабатывали с отделением гребней. Полученное виноградное сусло настаивали на мезге в течение 10 ч при температуре 10–12 °С. Затем виноградное сусло отделяли от мезги, вносили чистую культуру дрожжей и проводили спиртовое брожение при температуре 20–25 °С. После достижения требуемых кондиций напитков из виноградного сырья по массовой концентрации сахаров проводили остановку брожения дробным спиртованием винными и виноградными спиртами, а также спиртом этиловым ректифицированным из пищевого сырья (далее по тексту зерновой спирт).

Физико-химические нормируемые показатели винных и виноградных спиртов, а также напитков из виноградного сырья определяли по стандартизованным методикам с применением лабораторного оборудования Центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием ФГБНУ СКФНЦСВВ. Легколетучие соединения напитков из виноградного сырья определяли методом высокоэффективной газовой хроматографии (Кристалл-2000М, Россия). Исследования проводили в условиях повторяемости. Дегустация опытных образцов напитков из виноградного сырья была проведена дегустационной комиссией научного центра «Виноделие» ФГБНУ СКФНЦСВВ по 10-балльной системе (проходной балл 7,3 балла).

Результаты и их обсуждение

Подобранные режимы переработки столовых сортов винограда для производства винных и виноградных спиртов позволили получить прозрачные и без осадка спирты с типичными ароматом и вкусом, высокой объемной долей этилового спирта и умеренным содержанием основных нормируемых групп летучих соединений (табл. 1). В виноградных спиртах массовые концентрации альдегидов, высших спиртов и средних эфиров были выше, чем в винных спиртах. Это можно объяснить особенностями виноградного сырья. Кроме того, массовые концентрации легколетучих соединений в спиртах, приготовленных из столовых сортов винограда, были близки по значениям массовым концентрациям легколетучих соединений в спиртах, приготовленных из технических сортов винограда (традиционное сырье).

Напитки из виноградного сырья имели близкие значения нормируемых физико-химических показателей (табл. 2). В зависимости от сорта винограда и типа спиртующего агента расхождения значений показателей объемной доли этилового спирта не превышали 4,3 % (для одного сорта 3,7 %); массовой концентрации сахаров – 4,8 % (для одного сорта 3,0 %); массовой концентрации титруемых кислот в пересчете на винную кислоту – 15,8 % (для одного сорта 5,3 %); массовой концентрации летучих кислот

Таблица 1. Содержание легколетучих соединений спиртов из столовых и технических сортов винограда (средние значения)

Table 1. Highly volatile compounds in alcohols from table and technical grape varieties, mean values

Показатель	Виноград столовый		Виноград технический (сорт Кристалл)
	Спирт винный	Спирт виноградный	Спирт винный
Объемная доля этилового спирта, %	94,3	94,6	94,6
Альдегиды, мг/дм ³ б.с.	7,0	9,4	8,0
Сумма высших спиртов, мг/дм ³ б.с.	48,7	95,0	32,0
Сумма средних эфиров, мг/дм ³ б.с.	47,0	59,0	25,5
Сумма летучих кислот, мг/дм ³ б.с.	5,0	12,7	18,0
Массовая концентрация метилового спирта, г/дм ³ б.с.	0,3	менее 2,0	0,2
Этилацетат, мг/дм ³ б.с.	33,9	51,0	27,1
1-пропанол, мг/дм ³ б.с.	17,4	28,3	16,2
Изобутанол, мг/дм ³ б.с.	12,7	18,3	8,7
Изопентанол, мг/дм ³ б.с.	следы	5,0	2,0
Гексанол, мг/дм ³ б.с.	следы	следы	5,0
Фурфурол, мг/дм ³ б.с.	0,1	1,0	0,1
β -фенилэтанол, мг/дм ³ б.с.	следы	следы	0,4

Таблица 2. Физико-химические показатели напитков из виноградного сырья

Table 2. Physical and chemical parameters of grape drinks

Сорт (форма) винограда	Общая доля этилового спирта, % об.	Массовая концентрация				
		Сахаров, г/дм ³	Титруемых кислот, г/дм ³	Летучих кислот, г/дм ³	Приведенного экстракта, г/дм ³	Диоксида серы, мг/дм ³
Рислинг рейнский	16,0–16,4	156,4–161,2	5,5–5,7	0,37–0,38	22,9–23,3	110–120
ТАНА-74	15,7–16,2	162,2–164,3	4,8–5,1	0,42–0,43	22,6–22,9	105–116
Каберне Совиньон	16,0–16,3	157,0–161,8	5,0–5,2	0,58–0,60	25,6–26,4	76–88
Курчанский	15,8–16,4	156,5–159,8	5,3–5,6	0,44–0,46	30,2–31,7	76–86

в пересчете на уксусную кислоту – 38 % (для одного сорта 3,3 %); массовой концентрации приведенного экстракта – 28,7 % (для одного сорта 4,5 %); массовой концентрации диоксида серы – 33,3 % (для одного сорта 13,6 %). Варьирование значений нормируемых показателей напитков из виноградного сырья для одного сорта (формы) винограда доказало, что используемые в технологии винные и виноградные спирты не оказали существенного влияния на данные показатели.

Аромат винодельческой продукции обуславливает широкий спектр легколетучих соединений (спирты, альдегиды, кетоны, ацетали, сложные эфиры, летучие органические кислоты, терпены, углеводороды и гетероциклические соединения) [16]. Для сравнительного анализа влияния виноградного и винного спиртов на органолептические показатели напитков из виноградного сырья летучие соединения напитков разделили на следующие составляющие: ацетальдегид, этилацетат, ацетоин, высшие спирты, сложные эфиры, летучие кислоты и фурфурол. Выбранные индивидуальные соединения и группы веществ относятся к фоновым компонентам аромата, которые могут влиять на сложение аромата напитков в зави-

симости от концентраций, в том числе при их внесении спиртующими агентами [17].

Ацетальдегид, этилацетат и ацетоин характеризуют степень окисленности винодельческой продукции и вносят вклад в ее аромат. Ацетальдегид и этилацетат в концентрациях, превышающих пороговое распознавание, считаются побочным окисленным тоном и могут отрицательно повлиять на ароматические свойства напитков из виноградного сырья и быть причиной органолептических дефектов. Ацетоин обладает сильным маслянисто-сливочным запахом и имеет низкий порог восприятия. Ацетоин является естественным продуктом спиртового брожения. Его образование в винодельческой продукции может происходить из разных источников в результате микробной активности дрожжей и бактерий, в том числе вызывающих порчу продукции. Аэробные условия, которые способствуют высокому накоплению ацетоина, способствуют образованию таких высших спиртов, как изобутиловый спирт и изоамиловый спирт в низкой концентрации, обладающих резкими запахами [18].

При производстве виноградных спиртов в процессе сбраживания пикета создаются благоприятные условия для образования рассмотренных соединений

в повышенных концентрациях, обладающих отрицательными эффектами, в том числе высокого образования ацетона, который при дистилляции легко переходит в виноградный спирт [19–21]. Фурфурол, который образуется при нагревании и окислении пентоз, особенно интенсивно во время дистилляции, в концентрации, превышающей пороговое восприятие, является нежелательным компонентом аромата винодельческой продукции [22]. В связи с этим представляло интерес определение концентрации вышеперечисленных соединений в напитках из виноградного сырья. Количественный состав этих компонентов позволяет составить качественную характеристику как напитка, так и используемого в его технологии спирта.

В таблице 3 приведены результаты исследований легколетучих соединений 12 напитков из виноградного сырья: 6 белых напитков, произведенных из формы винограда ТАНА-74 и сорта винограда Рислинг рейнский, и 6 красных напитков, произведенных из винограда сортов Курчанский и Каберне Совиньон.

Анализ легколетучих соединений напитков из белоягодных сортов (форм) винограда показал, что в напитках из винограда сорта Рислинг рейнский с зерновым спиртом ацетальдегид идентифицирован в бо-

лее низких массовых концентрациях, чем в напитках из формы винограда ТАНА-74, – 9,6 против 37,4 мг/дм³. Содержание этилацетата было выше в напитках из формы винограда ТАНА-76 (16,2 мг/дм³), чем в напитках из винограда сорта Рислинг рейнский (21,5 мг/дм³). Использование в технологии напитков винного и виноградного спиртов увеличило массовые концентрации ацетальдегида ~ на 10 и 14 % соответственно по сравнению с внесением зернового спирта. Концентрации этилацетата увеличились при внесении винного спирта ~ на 25 %, при внесении виноградного спирта ~ на 35 % по сравнению с применением зернового спирта.

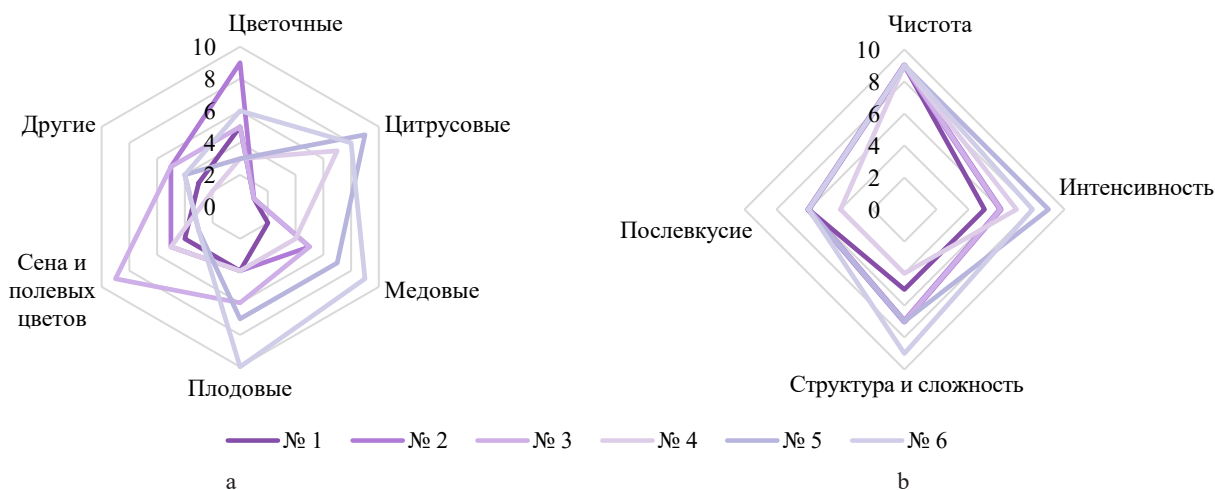
Содержание летучих кислот в напитках из белоягодных сортов (форм) винограда с использованием винного и виноградного спиртов осталось практически без изменений по сравнению с содержанием летучих кислот в напитках из соответственного винограда с использованием зернового спирта (табл. 3). Это объясняется низкой концентрацией летучих кислот в спиртующих агентах (табл. 1).

В результате анализа массовых концентраций сложных эфиров в напитках из белоягодных сортов

Таблица 3. Массовые концентрации легколетучих соединений напитков из виноградного сырья, мг/дм³ (средние значения)

Table 3. Mass concentrations of highly volatile compounds in grape drinks, mg/L (mean values)

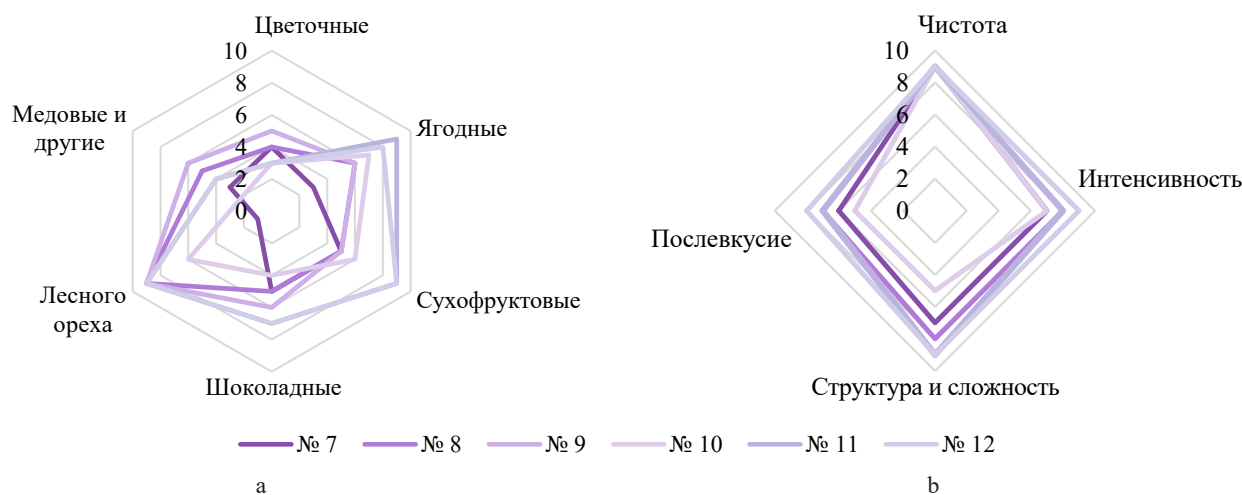
№ образца	Наименование напитка	Ацетальдегид	Этилацетат	Сумма высших спиртов	Сумма сложных эфиров	Сумма летучих кислот	Фурфурол	Ацетонин
Напитки из белоягодных сортов (форм) винограда								
1	Рислинг рейнский (зерновой спирт)	9,6	21,5	193,8	42,6	360,1	1,1	0,2
2	Рислинг рейнский (винный спирт)	10,4	25,5	219,6	47,0	362,0	1,1	0,2
3	Рислинг рейнский (виноградный спирт)	10,6	28,1	223,6	49,4	365,1	1,6	0,3
4	ТАНА-74 (зерновой спирт)	37,4	16,2	235,4	92,7	422,8	1,3	0,3
5	ТАНА-74 (винный спирт)	41,2	20,4	243,9	98,2	422,6	1,4	0,3
6	ТАНА-74 (виноградный спирт)	42,8	21,9	258,4	101,2	427,7	1,7	0,4
Напитки из темнаягодных сортов винограда								
7	Каберне Совиньон (зерновой спирт)	30,1	23,8	290,1	64,2	588,4	1,6	1,8
8	Каберне Совиньон (винный спирт)	33,7	28,8	295,9	68,6	590,2	1,7	1,8
9	Каберне Совиньон (виноградный спирт)	34,0	30,4	319,9	72,0	600,8	2,6	1,9
10	Курчанский (зерновой спирт)	40,2	42,8	275,8	99,4	442,7	22,6	2,6
11	Курчанский (винный спирт)	42,2	48,3	296,4	105,1	445,5	22,9	2,7
12	Курчанский (виноградный спирт)	44,1	52,3	327,2	123,2	448,8	24,0	2,8



Примечание: образец № 1 – Рислинг рейнский (зерновой спирт); № 2 – Рислинг рейнский (винный спирт); № 3 – Рислинг рейнский (виноградный спирт); № 4 – ТАНА-74 (зерновой спиртом); № 5 – ТАНА-74 (винный спирт); № 6 – ТАНА-74 (виноградный спирт)

Рисунок 1. Органолептические показатели белых напитков из виноградного сырья (а – аромат, б – вкус)

Figure 1. Sensory profile of white grape drinks made (a – aroma, b – taste)



Примечание: образец № 7 – Каберне Совиньон (зерновой спирт); № 8 – Каберне Совиньон (винный спирт); № 9 – Каберне Совиньон (виноградный спирт); № 10 – Курчанский (зерновой спиртом); № 11 – Курчанский (винный спирт); № 12 – Курчанский (виноградный спирт)

Рисунок 2. Органолептические показатели красных напитков из виноградного сырья (а – аромат, б – вкус)

Figure 2. Sensory profile of red grape drinks (a – aroma, b – taste)

(форм) винограда выявлено, что их сумма в напитках из формы винограда ТАНА-74 была более чем в 2 раза выше по сравнению с напитками из Рислинга рейнского. Внесение винного и виноградного спиртов увеличило содержание сложных эфиров ~ на 4,5 и 8,5 % соответственно. Сопоставив увеличение содержания сложных эфиров и этилацетата в напитках с внесением винного и виноградного спиртов (табл. 3), можно сделать вывод о том, что сумма эфиров в спиртах представлена более чем на 90 % этилацетатом.

Массовые концентрации высших спиртов, фурфура и ацетоина были выше в напитках ТАНА-74, что можно объяснить сортовыми особенностями винограда. При использовании зернового, винного и виноградного спиртов массовые концентрации высших спиртов увеличивались в ряду: напитки с зерновым спиртом < напитки с винным спиртом < напитки с виноградным спиртом. Максимальное увеличение массовой концентрации высших спиртов составило ~ 15 % (Рислинг рейнский с виноградным спиртом). Умеренное увеличение содержания высших спиртов

положительно отразилось на органолептических характеристиках напитков из виноградного сырья, придав им сложность и интенсивность в аромате (рис. 1 и 2). Содержание фурфурола и ацетоина в напитках с использованием зернового и винного спиртов было на одном уровне, а в напитках с внесением виноградного спирта было выше. Это можно объяснить особенностями сырья и технологией производства виноградного спирта.

Анализ легколетучих соединений напитков из темнойгодных сортов винограда показал, что содержание выбранных легколетучих соединений в них выше, чем в напитках из белаягодных сортов (форм) винограда. Наибольшая разница отмечена по массовым концентрациям летучих кислот, фурфурола и ацетоина. Содержание летучих кислот в напитках из Каберне Совиньон до 70 % выше, чем в напитках Рислинг рейнский. Содержание фурфурола и ацетоина в напитках Курчанский выше в 14 и 7 раз соответственно, чем в напитках Рислинг рейнский. Однако в напитках из темнойгодных сортов винограда выявлена аналогичная зависимость изменения массовых концентраций при использовании винного и виноградного спиртов. Массовые концентрации ацетальдегида, этилацетата, высших спиртов, сложных эфиров, фурфурола и ацетоина увеличивались в ряду: напитки с зерновым спиртом < напитки с винным спиртом < напитки с виноградным спиртом. Более значимая разница отмечена, как и в напитках из белаягодных сортов, при внесении виноградного спирта для этилацетата – увеличение содержания до 28 % по сравнению с содержанием этилацетата в напитках с зерновым спиртом.

Анализ органолептических показателей показал, что применение винных и виноградных спиртов для остановки спиртового брожения оказало положительный эффект на сенсорное восприятие напитков из виноградного сырья (рис. 1 и 2). Все напитки из виноградного сырья имели высокие органолептические характеристики и отличались в зависимости от сорта винограда и спиртующего агента. Однако дегустаторы характеризовали аромат напитков, в технологии которых были винные и виноградные спирты, как более сложный по сравнению с ароматами напитков с зерновым спиртом. Применение в технологии напитков из виноградного сырья винных и виноградных спиртов усилило цветочно-медовые оттенки в аромате напитков из белаягодных сортов (форм) винограда, а в аромате напитков из темнойгодных сортов винограда лесного ореха и меда.

Из белаягодных напитков наибольший балл набрал образец ТАНА-74 с внесением винного спирта. Напиток характеризовался золотистым цветом, цитронным ароматом с плодовыми оттенками, нотами айвы и меда, а также чистым с медово-плодовыми нотами вкусом (7,9 балла).

Из темнойгодных напитков наивысшую оценку получил образец из винограда сорта Курчанский с внесением виноградного спирта. Напиток отличался руби-

новым цветом, сложным сортовым ароматом с тонами ягод, сухофруктов и лесного ореха, а также полным и гармоничным с мягкой бархатистостью вкусом с оттенками сухофруктов, шоколада и лесного ореха.

Сравнивая результаты спиртования зерновым, винными и виноградными спиртами, следует отметить, что образцы, приготовленные с использованием виноградного спирта, по органолептическим показателям практически не уступали образцам, приготовленным с использованием винных спиртов. Сенсорные характеристики напитка из винограда сорта Курчанский с виноградным спиртом были оценены выше остальных.

Результаты исследований подтверждают, что в технологии производства напитков из виноградного сырья вместо зерновых спиртов целесообразно использовать винные и виноградные спирты, полученные ректификацией.

Выводы

Органолептические показатели напитков из виноградного сырья зависят как от сортовых особенностей винограда, так и от спиртующего агента.

Установлено, что применение винных и виноградных спиртов, приготовленных из столового винограда, для остановки спиртового брожения увеличивает в напитках из виноградного сырья массовые концентрации ацетальдегида (до 14 %), этилацетата (до 35 %), высших спиртов (до 15 %) и сложных эфиров (до 8,5 %) и практически не влияет на массовые концентрации летучих кислот и ацетоина. Содержание фурфурола в напитках при внесении виноградного спирта увеличивается на 0,4 мг/дм³ в белых напитках и на 1,0–1,4 мг/дм³ в красных напитках. Это можно объяснить особенностями сырья и технологией производства виноградного спирта.

Использование в технологии напитков винного и виноградного спиртов, приготовленных из столового винограда, оказало положительный эффект на их сенсорное восприятие. В аромате напитков из белаягодных сортов (форм) винограда усиливается восприятие цветочно-медовых оттенков, а в аромате напитков из темнойгодных сортов винограда лесного ореха и меда.

Таким образом, результаты исследования показали целесообразность применения в технологии напитков из виноградного сырья винных и виноградных спиртов, произведенных из сортосмеси столовых сортов винограда.

Критерии авторства

Все авторы внесли равный вклад в исследование и несут равную ответственность за информацию, опубликованную в данной статье.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НЦ «Виноделие» и Центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием ФГБНУ СКФНЦСВВ за оказанную помощь при производстве напитков и проведении анализов.

Contribution

All authors have contributed equally to the study and are equally responsible for the information published in this article.

Conflict of interest

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

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the staff of the Winemaking Research Center and the Center for the Collective Use of High-Tech Equipment of the North-Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, and Winemaking for their assistance in the production and analysis.

References

1. Levchenko SV, Boyko VA, Belash DYU. Directed formation of commercial quality of table grapes based on the use of foliar dressing with microfertilizers. *Magarach. Viticulture and Vinemaking*. 2020;22(3):225–229. (In Russ.). <https://doi.org/10.35547/IM.2020.22.3.008>
2. Khalil U, Rajwana IA, Razzaq K, Farooq U, Saleem BA, Brecht JK. Quality attributes and biochemical changes in white and colored table grapes as influenced by harvest maturity and ambient postharvest storage. *South African Journal of Botany*. 2023;154:273–281. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.044>
3. Ricardo-Rodrigues S, Laranjo M, Coelho R, Martins P, Rato EA, Vaz M, *et al.* *Terroir* influence on quality of “Crimson” table grapes. *Scientia Horticulturae*. 2019;245:244–249. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.035>
4. Batukaev A, Levchenko S, Ostroukhova E, Boyko V, Peskova I, Probeigolova P, *et al.* The effect of foliar fertilizing on ecological optimization of the application of fungicides on the productivity and phenolic complex composition of grapes. *BIO Web of Conferences*. 2019;15. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20191501012>
5. Mansour AEM, El-Shammaa M-S, Cimpoeis G, Malaka S, Nagwa Z. Improved method of nitrogen application in the vineyards. *Stiinta Agricola*. 2011;(2):28–33.
6. Abd El-Razed E, Treutter D, Saleh MMS, El-Shammaa M, Fouad AA, Abdel-Hamid N. Effect of nitrogen and potassium fertilization on productive and fruit quality of “Crimson seedless” grape. *Agricultural and Biology Journal of North America*. 2011;2(2):330–340. <https://doi.org/10.5251/abjna.2011.2.2.330.340>
7. Gallo V, Mastrorilli P, Cafagna I, Nitti GI, Latronico M, Longobard F, *et al.* Effects of agronomical practices on chemical composition of table grapes evaluated by NMR spectroscopy. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2014;35(1):44–52. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.04.004>
8. Troshin LP, Kravchenko RV, Matuzok NV, Kufanova RN. Improvement of the assortment to optimize grape production technology in the Anapo-Taman zone. *Magarach. Viticulture and Vinemaking*. 2021;23(2):120–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.35547/IM.2021.23.2.003>
9. Bordiga M, Travaglia F, Locatelli M. Valorisation of grape pomace: An approach that is increasingly reaching its maturity – A review. *International Journal of Food Science and Technology*. 2019;54(4):933–942. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14118>
10. Ferri M, Vannin M, Ehrnell M, Eliasson L, Xanthakis E, Monari S, *et al.* From winery waste to bioactive compounds and new polymeric biocomposites: A contribution to the circular economy concept. *Journal of Advanced Research*. 2020;24:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.02.015>
11. Tikhonova A, Ageeva N, Globa E. Grape pomace as a promising source of biologically valuable components. *BIO Web of Conferences*. 2021;34. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213406002>
12. Coelho MC, Pereira RN, Rodrigues AS, Teixeira JA, Pintado ME. The use of emergent technologies to extract added value compounds from grape by-products. *Trends in Food Science and Technology*. 2020;106:182–197. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.028>
13. Rajković MB, Popović-Minić D, Milinčić D, Zdravković M. Circular economy in food industry. *Zastita Materijala*. 2020;61(3):229–250. (In Serb.). <https://doi.org/10.5937/zasmat2003229r6>
14. Pakhomova NV, Richter KK, Vetrova MA. Transition to circular economy and closed-loop supply chains as driver of sustainable development. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*. 2017;33(2):244–268. (In Russ.). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2017.203>
15. Bakhmetov RN, Shelud'ko ON. Comparative analysis of physico-chemical indicators of distillates from yeast sediments and bulk wine. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2022;(73):321–335. (In Russ.). <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-1-73-321-335>

16. Ferreira V, Lopez R. The actual and potential aroma of winemaking grapes. *Biomolecules*. 2019;9(12). <https://doi.org/10.3390/biom9120818>
17. Renault P, Coulon J, Moine V, Thibon C, Bely M. Enhanced 3-sulfanylhexas-1-ol production in sequential mixed fermentation with *Torulaspora delbrueckii*/*Saccharomyces cerevisiae* reveals a situation of synergistic interaction between two industrial strains. *Frontiers in Microbiology*. 2016;7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00293>
18. Wang D, Zhou J, Chen C, Wei D, Shi J, Jiang B, et al. R-acetoin accumulation and dissimilation in *Klebsiella pneumoniae*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2015;42(8):1105–1115. <https://doi.org/10.1007/s10295-015-1638-1>
19. Bovo B, Fontana F, Giacomini A, Corich V. Effects of yeast inoculation on volatile compound production by grape marcs. *Annals of Microbiology*. 2011;61:117–124. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0106-4>
20. Xiang X-F, Lan Y-B, Gao X-T, Xie H, An Z-Y, Lv Z-H, et al. Characterization of odor-active compounds in the head, heart, and tail fractions of freshly distilled spirit from Spine grape (*Vitis davidii* Foex) wine by gas chromatography-olfactometry and gas chromatography-mass spectrometry. *Food Research International*. 2020;137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109388>
21. Perra M, Bacchetta G, Muntoni A, De Gioannis G, Castangia I, Rajha HN, et al. An outlook on modern and sustainable approaches to the management of grape pomace by integrating green processes, biotechnologies and advanced biomedical approaches. *Journal of Functional Foods*. 2022;98. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105276>
22. Gong M, Zhou Z, Liu S, Zhu S, Li G, Zhong F, et al. Formation pathways and precursors of furfural during Zhenjiang aromatic vinegar production. *Food Chemistry*. 2021;354. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129503>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2486>
<https://elibrary.ru/LMLTQJ>

Оригинальная статья
<https://fppt.ru>

Гидролиз и окисление трудноразлагаемых субстратов микробными изолятами термальных источников

А. И. Дмитриева¹, Е. Р. Фасхутдинова^{1,*}, Т. А. Ларичев¹,
Н. С. Величкович¹, В. Ю. Богер¹, Л. М. Аксенова²



¹ Кемеровский государственный университет , Кемерово, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности , Москва, Россия

Поступила в редакцию: 04.02.2023

Принята после рецензирования: 18.05.2023

Принята к публикации: 04.06.2023

*Е. Р. Фасхутдинова: faskhutdinovae.98@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-9711-2145>

А. И. Дмитриева: <https://orcid.org/0000-0002-8764-4049>

Т. А. Ларичев: <https://orcid.org/0000-0002-3801-0023>

Н. С. Величкович: <https://orcid.org/0000-0002-9061-1256>

© А. И. Дмитриева, Е. Р. Фасхутдинова, Т. А. Ларичев,
Н. С. Величкович, В. Ю. Богер, Л. М. Аксенова, 2024



Аннотация.

Традиционные источники энергии загрязняют окружающую среду. Для снижения экологической нагрузки предлагается использовать альтернативный источник энергии на основе микроорганизмов – микробные топливные элементы. Еще одним полезным применением микробного топливного элемента является очистка сточных вод от трудноразлагаемых отходов. Целью исследования являлось изучение ферментативной способности изолятов термального источника Абаканский Аржан.

Объектами исследования служили изоляты родов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*. Исследование кератинолитической активности осуществляли по ГОСТ Р 55987-2014. Определение хитинолитической активности проводили путем посева бактериальной суспензии уколом на чашки Петри со средой, содержащей хитин. Оценку липолитической активности осуществляли выращиванием изолятов в бульоне Штерна. Изучение способности изолятов к гидролизу ксилана проводили путем анализа скорости образования восстанавливающих сахаров. Целлюлазную активность изолятов измеряли по стандартной методике IUPAC. Каталазную активность оценивали на средах, содержащих 1 % бензин. Активность определяли газометрическим способом. Оптимальные параметры культивирования консорциумов определяли по количеству генерируемого напряжения.

Максимальной кератинолитической активностью обладал изолят *Geobacter*. Однако для изолята *Thermomonas* отмечена максимальная степень гидролиза белка – $80,1 \pm 1,5$ %. Изоляты *Geobacter* и *Rhodopseudomonas* проявляли большую литическую активность в отношении хитина – зоны лизиса превышали 3 мм. Изолят *Geobacter* достигал 350 ед. ксиланазной активности и 365 ед. целлюлазной активности; *Thermomonas* – 350 ед. ксиланазной активности и 360 ед. целлюлазной активности; *Rhodopseudomonas* – 310 ед. ксиланазной активности и 304 ед. целлюлазной активности. Максимальной каталазной активностью отличаются изоляты *Geobacter* и *Thermomonas* – 1,40 и 1,38 ед. активности соответственно. Максимальное генерирование энергии консорциумами изолятов осуществлялось при pH 8, температуре 45 °C и продолжительности культивирования 48 ч.

Изоляты *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*, выделенные из термального источника Абаканский Аржан, способны удалять трудноразлагаемые компоненты. Это делает перспективным их применение в биологической очистке сточных вод.

Ключевые слова. Экологически чистая энергия, экстремофильные микроорганизмы, ферментативная активность, микробный топливный элемент, трудноразлагаемые субстраты

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Минобрнауки России)  (стипендия Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2021–2023 гг., приказ Минобрнауки России от 26.01.2021 № 54, тема проекта «Энергоэффективная экологически чистая технология получения электроэнергии с использованием биомассы термальных источников»).

Для цитирования: Гидролиз и окисление трудноразлагаемых субстратов микробными изолятами термальных источников / А. И. Дмитриева [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 27–36. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2486>

Hydrolysis and Oxidation of Recalcitrant Substrates by Microbial Isolates from Hot Springs



Anastasiya I. Dmitrieva¹, Elizaveta R. Faskhutdinova^{1,*},
Timothy A. Larichev¹, Natalia S. Velichkovich¹,
Veronika Yu. Boger¹, Larisa M. Aksenova²

¹ Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

² All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 04.04.2023

Revised: 18.05.2023

Accepted: 04.06.2023

*Elizaveta R. Faskhutdinova: faskhutdinovae.98@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-9711-2145>

Anastasiya I. Dmitrieva: <https://orcid.org/0000-0002-8764-4049>

Timothy A. Larichev: <https://orcid.org/0000-0002-3801-0023>

Natalia S. Velichkovich: <https://orcid.org/0000-0002-9061-1256>

© A.I. Dmitrieva, E.R. Faskhutdinova, T.A. Larichev,
N.S. Velichkovich, V.Yu. Boger, L.M. Aksenova, 2024



Abstract.

Traditional energy sources pollute the environment. Microbial fuel cells are an alternative energy source that can reduce the environmental burden. Microbial fuel cells also remove recalcitrant wastes from wastewater. This research featured the enzymatic potential of microbial isolates obtained from the Abakan Arzhan thermal spring.

The study involved isolates of the genera *Geobacter*, *Thermomonas*, and *Rhodopseudomonas*. The keratinolytic analysis was in line with State Standard R 55987-2014. The chitinolytic activity was determined by injecting a bacterial suspension on Petri dishes with a chitin-containing medium. The lipolytic analysis involved cultivating the isolates in Stern's glycerol fuchsin broth. The xylan hydrolysis depended on the reducing sugars. The cellulase activity was measured according to the standard method recommended by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The catalase potential was evaluated by the gasometric method on 1% gasoline media. The optimal parameters of consortium cultivation were determined by the voltage generated.

The *Geobacter* isolate had the maximal keratinolytic activity while the *Thermomonas* isolate demonstrated the maximal protein hydrolysis ($80.1 \pm 1.5\%$). Both *Geobacter* and *Rhodopseudomonas* showed good lytic activity against chitin with the lysis zone of ≥ 3 mm. The *Geobacter* isolate demonstrated as many as 350 units of xylanase activity and 365 units of cellulase activity; *Thermomonas* had 350 units of xylanase activity and 360 units of cellulase activity; *Rhodopseudomonas* showed 310 units of xylanase activity and 304 units of cellulase activity. The maximal catalase properties belonged to *Geobacter* (1.40 units) and *Thermomonas* (1.38 units). The maximal energy generation by bacterial consortia occurred at pH 8 and 45°C after 48 h of cultivation.

In this research, isolates of the genera *Geobacter*, *Thermomonas*, and *Rhodopseudomonas* from the Abakan Arzhan thermal spring were able to remove recalcitrant components, thus demonstrating good prospects for biological treatment of industrial wastewater.

Keywords. Environmentally friendly energy, extremophilic microorganisms, enzymatic activity, microbial fuel cell, hard-to-decompose substrates

Funding. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka)^{ROR} as part of the Grant of the President of the Russian Federation for young scientists and postgraduate students working in priority areas of modernization of the Russian economy (SP 2021–2023), project topic: Energy-efficient environmentally friendly technology for generating electricity from thermal spring biomass.

For citation: Dmitrieva AI, Faskhutdinova ER, Larichev TA, Velichkovich NS, Boger VYu, Aksenova LM. Hydrolysis and Oxidation of Recalcitrant Substrates by Microbial Isolates from Hot Springs. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):27–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2486>

Введение

Для удовлетворения основных потребностей человеку нужна энергия. Это необходимо для здоровья, повседневной жизни, коммуникаций и мобильности, а также социального и экономического развития [1].

Согласно прогнозам ученых к середине XXI столетия численность населения увеличится до 9 млрд. Закономерно, что вырастет и потребление энергии. Данные, полученные Управлением энергетической информации, свидетельствуют о том, что в период

с 2018 по 2050 гг. мировое потребление энергии вырастет почти вдвое [2].

Растущий мировой спрос на энергию стал причиной злоупотребления запасов ископаемого топлива. Это привело к большим объемам выбросов парниковых газов в атмосферу и загрязнению сточных вод другими токсичными отходами [3]. В 2019 г. на энергетический сектор приходилось около 40 % мирового выброса углекислого газа, что составляет около 13 Гт [4]. Такие большие объемы выбросов создают угрозу глобального потепления – острой уже сегодня экологической проблемы [5].

Одной из основных мер по предотвращению вышеуказанной проблемы является поиск возобновляемых альтернативных источников энергии [6]. Не возобновляемые источники энергии обладают высокой стоимостью, что делает переход на альтернативную энергию важным этапом для обеспечения энергетической безопасности и удовлетворения высокого спроса на энергию [2].

Перспективным способом получения альтернативной энергии является использование технологии микробного топливного элемента, т. е. бактериальный метаболизм для получения электроэнергии. Данная технология предполагает использование ячейки, разделенной ионообменной мембраной на две камеры. Микробный топливный элемент представляет собой биоэлектрохимическую систему, способную преобразовывать химическую энергию в электрическую путем микробного катализа [7]. Источником энергии служат жидкие органические отходы промышленных предприятий. В результате их переработки происходит высвобождение энергии [8]. Преимуществами использования микробного топливного элемента являются преобразование субстрата в энергию, возможность эксплуатации при различных температурах и pH, отсутствие затрат энергии на аэрацию [9]. Плюсом данной технологии является не только получение возобновляемой энергии, но и очистка сточных вод, используемых в качестве подложки для биомассы микроорганизмов.

Особое внимание в технологии получения экологически чистого топлива уделяется используемому биокатализатору – экстремофильным микроорганизмам. Экстремофильными называют микроорганизмы, которые способны к существованию в средах с экстремальными факторами – температурой, pH, давлением и соленостью [10, 11]. В результате деятельности человека некоторые экстремофилы приспособились к существованию в загрязненных средах. Например, в сточных водах либо в загрязненных пестицидами или тяжелыми металлами почвах [12].

Очистка сточных вод является перспективным применением микробного топливного элемента [13]. Существуют исследования, которые посвящены использованию сточных вод различных отраслей промышленности в качестве субстрата. Особое внимание

уделяется сточным водам сельского хозяйства и пищевой промышленности. Сельскохозяйственные отходы образуются во время предуборочной, уборочной и послепосевной деятельности [14]. Такие сточные воды могут легко подвергаться биодegradации из-за наличия в своем составе большого количества органических отходов, а также макро- и микроэлементов.

Свойства агроотходов различны в зависимости от местоположения их источников, климатических условий и др. [14]. Отходы птицеводства являются одними из легкодоступных и дешевых в обрабатываемой промышленности [15]. Однако отходы птицефабрик содержат такой трудноразлагаемый компонент, как кератин – фибриллярный белок, который входит в состав перьев. Традиционные методы утилизации кератиновых отходов (сжигание, захоронение, химический гидролиз и карбонизация) приводят к выбросам углекислого газа, твердых частиц или сажи (в случае сжигания), загрязнению сточных вод (в случае захоронения) и использованию дополнительных методов очистки от нежелательных продуктов реакций (в случае химического гидролиза агрессивными веществами) [16–18].

Хитин (полимер N-ацетилглюкозамина) является вторым по распространенности биоматериалом в природе после целлюлозы [19]. Данный полимер содержится в водорослях, клеточных стенках грибкового мицелия, раковинах моллюсков и ракообразных и т. д., оболочки которых содержат 20–30 % хитина в дополнение к минералам (30–50 %), белкам (20–40 %) и липидам (0–14 %) [20]. Обильное употребление в пищу морских организмов является причиной большого количества пищевых отходов с высоким содержанием хитина. Хитин является практически не разлагаемым компонентом пищевых отходов. Распространен химический способ degradation хитина как наиболее быстрый по времени. Его недостатком является экологическая вредность, т. к. в процессе используются кислоты, щелочи и непригодные к дальнейшему использованию побочные продукты [21].

Растительные масла также являются трудноудаляемым компонентом отходов. Масла часто сбрасываются в канализационную систему, что увеличивает расходы очистных станций на их удаление [22]. Богатые липидами отходы препятствуют очистке сточных вод по нескольким причинам. Во-первых, из-за накопления жирных кислот происходит процесс пенообразования. Во-вторых, из-за адсорбции липидов на биомассе происходит флотация осадка и проблемы массообмена. В-третьих, длинноцепочечные жирные кислоты вызывают ингибирование микробных сообществ.

Сточные воды бумажной промышленности имеют высокое содержание целлюлозы и гемицеллюлозы – веществ, которые не могут быть эффективно удалены традиционными видами очистки сточных вод [23]. Также в сточных водах могут содержаться токсичные углеводороды, которые трудно поддаются разложению.

Для загрязнений подобного рода анаэробные условия являются предпочтительными и эффективными. Поэтому технология микробного топливного элемента может внести вклад в очистку сточных вод от углеводородов [24].

Целью исследования являлось изучение способности экстремофильных микроорганизмов, выделенных из термального источника Абаканский Аржан, к гидролизу и окислению труднорастворимых субстратов, а также подбор параметров их культивирования.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись изоляты экстремофильных микроорганизмов родов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*, выделенные в рамках предыдущих исследований по изучению микробного сообщества образцов воды и ила термального источника Абаканский Аржан (Россия, Республика Хакасия, Таштыпский район, 51°47'53.9» N 88°15'01.1»E) [25]. Схема отбора образцов представлена в таблице 1.

Образцы воды и ила собирали в августе – сентябре 2020 г. Объем проб воды составил 25 мл, масса проб ила – 25 г. Образцы хранили при $4,0 \pm 0,5$ °C в стерильных контейнерах.

Накопительные культуры получали путем приготовления 10 % суспензии образцов и ее посева на минимальные питательные среды. Донором электронов в минимальной питательной среде являлся 10 мМ ацетат, акцептором электронов – 40 мМ фумарат. Морфологию микроорганизмов, наличие пилей и чехла определяли микрокопированием с помощью электронного микроскопа (Carl Zeiss, Германия). Использовали люминесцентную микроскопию при помощи инверсионного микроскопа AxioVert.A1 (Carl Zeiss, Германия) с применением красителя акридинового оранжевого.

Для выявления термотолерантных и экстремофильных изолятов чашки Петри инкубировали при температуре 30–60 °C с шагом 5 °C. Оптимум pH для изолятов определяли по методике измерения удельной скорости роста изолята.

Метагеномный анализ выделенных микроорганизмов проводили путем экстрагирования нуклеиновых кислот с использованием наборов DNEasy PowerSoil Kit и RNeasy PowerSoil Total RNA Kit (Qia-

gen, Германия) согласно протоколам производителя. Качество выделенных нуклеиновых кислот и оценку целостности РНК определяли на системе капиллярного электрофореза с автосемплером на 8 образцов Qsep1 (Bioptic, Тайвань).

Амплификацию выделенных фрагментов проводили прямым методом по протоколу, описанному G. Muyizer с коллегами [26]. Амплификация 16S РНК проводилась с использованием праймеров 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG) и 1525R (5'-AAGGAGGTGWTCCARCC) [27, 28].

Полимеразно цепную реакцию проводили на амплификаторе АНК-32 (Синтол, Россия) в режиме реального времени при следующих условиях: цикл при 94 °C для денатурации двуцепочечной молекулы ДНК продолжительностью 5 мин, затем 30 циклов при 95 °C в течение 0,5 мин, 55 °C в течение 0,5 мин, 72 °C в течение 1,5 мин, заключительный этап удлинения при 72 °C в течение 10 мин. Рестрикцию проводили с помощью ферментов HaeIII, HhaI, MnlI, Sau3AI и TaqI.

Секвенирование нуклеотидных последовательностей проводили на платформе MiSeq (Illumina, США) с применением NGS технологий. Для работы использовали готовый набор реагентов от производителя Reagent Kit v3 (Illumina, США). Работу вели по протоколам прибора с незначительными модификациями.

Биоинформатический анализ нуклеотидных последовательностей 16S рРНК проводили по базе данных NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>), используя алгоритм BLAST (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov>).

Для анализа 16S РНК микробиотического сообщества использовали библиотеку Silva (<https://www.arb-silva.de>), где представлены комплексные и проверенные на качество и регулярно обновляемые наборы данных выровненных последовательностей малых (16S/18S, SSU) и больших субъединиц (23S/28S, LSU) рибосомных РНК (рРНК) для трех доменов: бактерии, археи и эукариоты [29]. Филогенетический анализ проводили с использованием программы MEGA11 (<https://www.megasoftware.net>).

Исследование кератинолитической активности вышеупомянутых изолятов осуществляли по ГОСТ Р 55987-2014.

Определение хитинолитической активности экстремофильных микроорганизмов проводилось путем

Таблица 1. Схема отбора проб из источника Абаканский Аржан

Table 1. Sampling scheme, Abakan Arzhan hot springs

Тип образца	Объем/масса	Глубина отбора (для ила от уровня донных отложений), см	pH	Температура, °C
Вода	25 мл	30	6,8	26,5
Вода	25 мл	100	6,9	37,8
Вода	25 мл	300	7,2	40,0
Ил	25 г	10	7,1	25,5
Ил	25 г	20	7,2	30,0
Ил	25 г	30	7,5	31,7

посева бактериальной суспензии уколом на чашки Петри со средой, содержащей в своем составе хитин. Состав питательной среды, г/л: KH_2PO_4 – 1,0; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,3; CaCl_2 – 0,2; пептон – 4,0; дрожжевой экстракт – 4,0; коллоидный хитин – 6,0; агар – 18,0; pH среды 6–6,5. Чашки Петри инкубировали при температуре 37 °С в течение 24 ч. По прошествии указанного времени отмечали проявление зон лизиса и осветление питательной среды в месте ввода бактериальной суспензии. Наличие зон лизиса свидетельствовало о хитинолитической активности изолятов экстремофильных микроорганизмов.

Для оценки способности изолятов к гидролизу липидов использовали метод, основанный на выращивании микроорганизмов в бульоне Штерна. Бульон Штерна содержит растительные масла в качестве единственного источника углерода, необходимого для роста изолятов. Концентрация масла составляла 1 %. В случае положительного результата изоляты будут окислять среду в ходе процесса гидролиза и выработки альдегидов. В ходе эксперимента в стерильные 10 мл пробирки вносили 100 мкл суспензии исследуемого изолята, инкубировали при 37 °С в течение 120 ч. По прошествии отведенного времени отмечали изменение pH среды. Контролем служил стерильный бульон Штерна.

Оценку способности изолятов экстремофильных микроорганизмов к гидролизу ксилана проводили путем изучения скорости образования восстанавливающих сахаров. За единицу активности принимали количество фермента, необходимое для деструкции ксилана с образованием 1 мкмоль восстанавливающих сахаров за единицу времени (1 мин) при температуре 50 °С. Эксперимент проводили на водяной бане ПЭ-4310 (ЭКРОС, Россия) при pH 5,0 [30].

Целлюлазную активность изолятов измеряли согласно стандартной методике IUPAC [31]. Каталазную активность (способность к гидролизу углеводов) оценивали на средах, где в качестве единственного источника углеводов был 1 % бензин. Активность определяли газометрическим способом (по А. Ш. Галстяну) [32]. Контролем служили стерильные среды.

Для проведения электрохимических исследований составили консорциумы изолятов Абаканского Аржана *Geobacter*:*Thermomonas*:*Rhodopseudomonas* в различных соотношениях:

- культура № 1 – 1:1:1;
- культура № 2 – 1:2:1;
- культура № 3 – 1:1:2;
- культура № 4 – 2:1:1;
- культура № 5 – 2:1:2.

В качестве прототипа однокамерного безмембранного микробного топливного элемента использовали пластиковую камеру вместимостью 1 л. В данной камере осуществлялся ряд исследований по подбору оптимальных условий культивирования консорциумов.

Для подбора оптимального значения pH в камеру заливали 750 мл мясо-пептонного бульона, вносили суспензии консорциумов (1 % от объема питательной среды) и культивировали при 25 °С в течение 24 ч. Показатели pH варьировали с помощью лимонной кислоты концентрации 1 М и раствора NaOH той же концентрации. По прошествии указанного времени проводили измерение генерируемого консорциумами напряжения с помощью мультиметра DT-832 (ТЕК, Швейцария).

Для подбора оптимального значения температуры в камеру заливали 750 мл среды мясо-пептонного бульона с подобранным ранее значением pH, вносили консорциумы в количестве 1 % от объема среды и ставили в термостат при температурах 20, 25, 30, 37, 40, 45 и 50 °С. Через 24 ч проводили измерение сгенерированного напряжения.

Для определения оптимальной продолжительности культивирования консорциумы вносили в камеру с 750 мл мясо-пептонного бульона (в объеме 1 % от количества питательной среды) с оптимальным значением pH и температуры, затем ставили в термостат. Измерение напряжения осуществляли через 18, 24, 36, 48 и 72 ч. Все измерения генерируемого напряжения проводились в режиме разомкнутой электрической цепи.

Все исследования проводились в 3-кратной повторяемости. Статистическую обработку данных проводили по стандартным методикам с использованием программного пакета Microsoft Excel 2010 для Windows 7. Для полученных данных рассчитали среднее значение и стандартное отклонение.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования кератинолитической активности изолятов представлены в таблице 2.

При оценке кератинолитической активности изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*

Таблица 2. Кератинолитическая активность изолятов термального источника Абаканский Аржан

Table 2. Keratinolytic activity of isolates from Abakan Arzhan hot springs

Изолят	Кератинолитическая активность, Е/мг белка	Концентрация биомассы, КОЕ/г·дм ³	Степень гидролиза кератина, %
<i>Geobacter</i>	38,1 ± 0,6	387,0 ± 10,2	72,1 ± 3,0
<i>Thermomonas</i>	36,0 ± 1,8	370,4 ± 22,1	80,1 ± 1,5
<i>Rhodopseudomonas</i>	37,7 ± 1,7	451,3 ± 25,6	79,4 ± 0,9

установлено, что каждый образец проявляет активность в отношении кератиназ: $38,1 \pm 0,6$, $36,0 \pm 1,8$ и $37,7 \pm 1,7$ Е/мг белка соответственно. Максимальную активность показал изолят *Geobacter*. Однако для изолята *Thermomonas* отмечена максимальная степень гидролиза белка – $80,1 \pm 1,5$ %. Не наблюдалось прямой зависимости между кератинолитической активностью, концентрацией биомассы и степенью гидролиза кератина. На кератинолитическую активность бактерий влияет продолжительность культивирования, но более долгий период может негативно сказаться на ферментативной активности из-за возрастающего значения pH, вызванного реакциями дезаминирования в продуктах гидролиза субстратов [33].

На основании диаметров зон лизиса питательной среды, содержащей в составе гидролизованый хитин, исследовали хитинолитическую активность изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*. Наибольшей хитинолитической активностью обладают изоляты родов *Geobacter* и *Rhodopseudomonas*. Зона лизиса данных экстремофильных микроорганизмов составила $3,10 \pm 0,01$ и $3,20 \pm 0,01$ мм соответственно, изолята *Thermomonas* – $2,40 \pm 0,01$ мм. Бактерии, продуцирующие хитиназу, могут использоваться в микробных топливных элементах в качестве продуцентов биотоплива. Например, биоводорода [34]. Газообразный водород в качестве формы энергии выделяется при обработке хитинсодержащих отходов бактерией *Clostridium paraputrificum* M-21 [35].

На рисунке 1 представлены результаты оценки липолитической активности изолятов экстремофильных микроорганизмов.

Все изоляты термального источника Абаканский Аржан снижают кислотность среды с течением времени. Изолят *Geobacter* снижает pH с 5,5 до 3,0, *Thermo-*

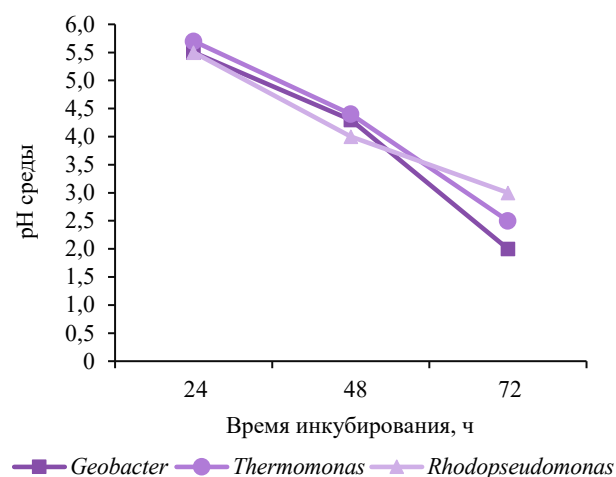


Рисунок 1. Липолитическая активность изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*

Figure 1. Lipolytic activity of *Geobacter*, *Thermomonas*, and *Rhodopseudomonas* isolates

monas – с 5,7 до 2,5, *Rhodopseudomonas* – с 5,5 до 3,5. Из рисунка 1 видно, что максимальной активностью в отношении липидов обладают изоляты родов *Geobacter* и *Thermomonas*. Снижение pH среды происходит за счет расщепления растительных масел, входящих в состав бульона Штерна, биомассы исследуемых изолятов термального источника и образования жирных кислот и альдегидов [36]. В процессе культивирования микроорганизмов наблюдалось изменение цвета питательной среды, т. к. в ее составе присутствует краситель фуксин.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты исследования гидролиза ксилана и целлюлозы.

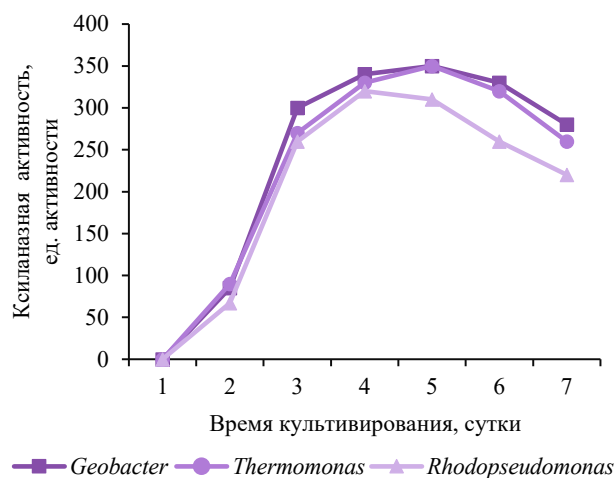


Рисунок 2. Ксиланазная активность изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*

Figure 2. Xylanase activity of *Geobacter*, *Thermomonas*, and *Rhodopseudomonas* isolates

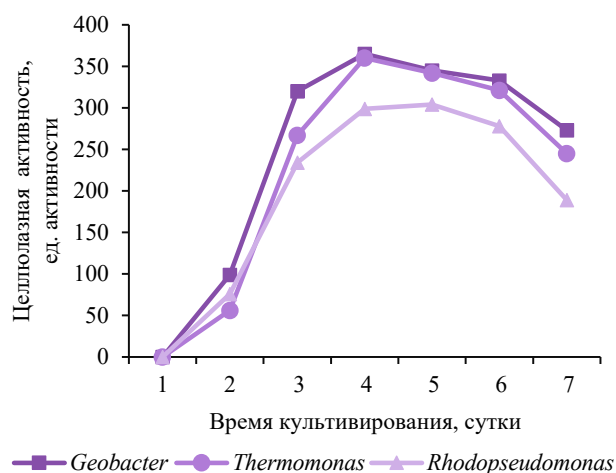


Рисунок 3. Целлюлазная активность изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*

Figure 3. Cellulase activity of *Geobacter*, *Thermomonas*, and *Rhodopseudomonas* isolates

На основании данных их рисунков 2 и 3 можно сделать вывод о том, что изоляты достигают максимальных значений ферментативной активности на 4 сутки культивирования. Изолят *Geobacter* – 350 ед. ксиланазной активности и 365 ед. целлюлазной активности; *Thermomonas* – 350 ед. ксиланазной активности и 360 ед. целлюлазной активности; *Rhodopseudomonas* – 310 ед. ксиланазной активности и 304 ед. целлюлазной активности. Ксиланазная активность становилась выше в среднем на 41 %, целлюлазная – на 35 %. Это происходит из-за доступности растворенных веществ и их проникновения в клетки изолятов термального источника Абаканский Аржан, что обеспечивает их питательными веществами и факторами роста.

В таблице 3 представлены результаты определения восстанавливающих сахаров в экспериментах изучения ксиланазной и целлюлазной активностей изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*.

Как видно из таблицы 3, количество редуцирующих сахаров снижалось в течение 7 суток и достигло минимального значения на 7 сутки наблюдений.

Данные таблицы 4 демонстрируют результаты исследования каталазной активности изолятов на питательных средах, содержащих в качестве источника углерода бензин.

На основе данных из таблицы 4 можно сделать вывод о том, что наибольшей каталазной активностью обладают изоляты *Geobacter* и *Thermomonas*.

На рисунке 4 приведены результаты исследования по подбору оптимальных параметров культивирования консорциумов изолятов Абаканского Аржана.

Таблица 3. Восстанавливающие сахара в экспериментах по определению ксиланазной и целлюлазной активностей изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*

Table 3. Reducing sugars in xylanase and cellulase experiments: *Geobacter*, *Thermomonas*, and *Rhodopseudomonas* isolates

Сутки	<i>Geobacter</i>	<i>Thermomonas</i>	<i>Rhodopseudomonas</i>
1	6,6 ± 0,3	6,6 ± 0,3	6,5 ± 0,2
2	6,2 ± 0,2	6,5 ± 0,1	6,5 ± 0,5
3	6,0 ± 0,4	6,0 ± 0,5	6,3 ± 0,6
4	5,4 ± 0,6	5,5 ± 0,2	5,8 ± 0,3
5	4,4 ± 0,3	4,5 ± 0,2	5,5 ± 0,1
6	3,2 ± 0,8	3,8 ± 0,4	4,5 ± 0,4
7	2,1 ± 0,1	2,5 ± 0,1	3,1 ± 0,2

Таблица 4. Каталазная активность изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*

Table 4. Catalase activity of *Geobacter*, *Thermomonas*, and *Rhodopseudomonas* isolates

Время культивирования, ч	<i>Geobacter</i>	<i>Thermomonas</i>	<i>Rhodopseudomonas</i>
0	1,40 ± 0,90	1,38 ± 0,50	1,23 ± 0,50
14	1,21 ± 1,10	1,27 ± 0,50	1,03 ± 0,30
28	0,93 ± 0,20	0,87 ± 0,10	0,87 ± 0,40
42	0,74 ± 0,10	0,65 ± 0,10	0,64 ± 0,30

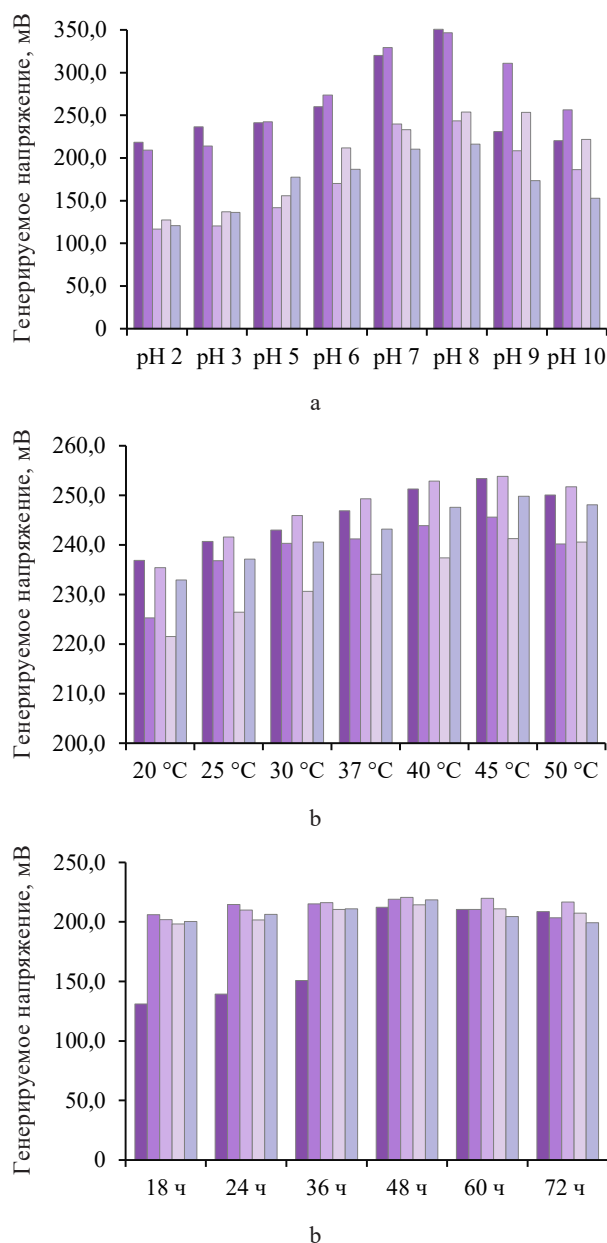


Рисунок 4. Рабочие параметры совместного культивирования изолятов: а) pH среды; б) температура культивирования; в) время культивирования

Figure 4. Variables for consortium cultivation: a) pH; b) temperature; c) cultivation time

Согласно результатам из рисунка 4 оптимальными параметрами культивирования изолятов являются: pH среды 8 (изоляты демонстрировали максимальное генерирование энергии в сравнении с другими значениями (от 216,2 до 350,7 мВ)); температура культивирования 45 °С (генерирование напряжения изолятами составило от 241,3 до 253,4 мВ); продолжительность культивирования 48 ч (генерирование напряжения составило от 212,3 до 220,6 мВ).

Выводы

Сточные воды различных отраслей промышленности бывают загрязнены различными отходами. Нередко в их состав входят трудноразлагаемые компоненты, удаление которых требует больших затрат и энергии. К таким компонентам относят кератин, хитин, липиды, ксилан, целлюлозу и углеводороды. Заменой химическим методом очистки может стать биологический. Технология микробного топливного элемента, в которой предусматривается использование биомассы экстремофильных микроорганизмов, позволяет решить две проблемы: эффективно очищать сточные воды одновременно с накоплением экологически чистой энергии.

В ходе работы достигнуты следующие результаты:

1. Провели анализ кератинолитической активности изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*. Каждый образец проявляет активность в отношении кератиназ: $38,1 \pm 0,6$, $36,0 \pm 1,8$ и $37,7 \pm 1,7$ Е/мг белка соответственно. Максимальную активность показал изолят *Geobacter*, но для изолята *Thermomonas* отмечена максимальная степень гидролиза белка – $80,1 \pm 1,5$ %;

2. Провели анализ хитинолитической активности изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*. Изоляты родов *Geobacter* и *Rhodopseudomonas* проявляют большую литическую активность в отношении хитина: зоны лизиса на хитинсодержащей среде $3,10 \pm 0,01$ и $3,20 \pm 0,01$ мм соответственно;

3. Провели оценку липолитической активности изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*. Все изоляты снижают кислотность среды с течением времени: *Geobacter* с 5,5 до 3; *Thermomonas* с 5,7 до 2,5; *Rhodopseudomonas* с 5,5 до 3. Максимальной активностью в отношении липидов обладают изоляты *Geobacter* и *Thermomonas*;

4. Исследовали динамику изменения ксиланазной и целлюлазной активностей изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*. Максимальных значений все изоляты достигают на 4 сутки культивирования: *Geobacter* – 350 ед. ксиланазной активности и 365 ед. целлюлазной активности; *Thermomonas* – 350 ед. ксиланазной активности и 360 ед. целлюлазной активности; *Rhodopseudomonas* – 310 ед. ксиланазной активности и 304 ед. целлюлазной активности. Ксиланазная активность была выше в среднем на 41 %, целлюлазная – на 35 %;

5. Исследовали каталазную активность изолятов. Изоляты *Geobacter* и *Thermomonas* отличаются максимальной каталазной активностью – 1,40 и 1,38 ед. активности соответственно;

6. Установили оптимальные параметры культивирования консорциумов изолятов Абаканского Аржана по количеству генерируемого напряжения. Максимальное напряжение консорциумы изолятов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas* генерировали при pH среды 8, температуре 45 °С и продолжительности культивирования 48 ч. При данных параметрах зафиксировано наибольшее генерирование напряжения.

Таким образом, изоляты родов *Geobacter*, *Thermomonas* и *Rhodopseudomonas*, выделенные из термального источника Абаканский Аржан, способны применяться в создании безотходных производств путем очистки окружающей среды и в генерировании экологически чистой энергии.

Критерии авторства

Все авторы в равной степени несут ответственность за полученные результаты исследований и рукопись.

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 declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

References

1. Owusu PA, Asumadu-Sarkodie S. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. Cogent Engineering. 2016;3. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.3381454>
2. Halkos GE, Gkampoura E-C. Reviewing usage, potentials, and limitations of renewable energy sources. Energies. 2020;13(11). <https://doi.org/10.3390/en13112906>
3. Elhenawy S, Khraisheh M, AlMomani F, Al-Ghouti M, Hassan MK. From waste to watts: Updates on key applications of microbial fuel cells in wastewater treatment and energy production. Sustainability. 2022;14(2). <https://doi.org/10.3390/su14020955>

4. Kurniawan TA, Othman MHD, Singh D, Avtar R, Goh HH, Setiadi T, *et al.* Technological solutions for long-term management of partially used nuclear fuel: A critical review. *Annals of Nuclear Energy*. 2022;166. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108736>
5. Ivanova S, Vesnina A, Fotina N, Prosekov A. An overview of carbon footprint of coal mining to curtail greenhouse gas emissions. *Sustainability*. 2022;14(22). <https://doi.org/10.3390/su142215135>
6. Levitan O, Dinamarca J, Hochman G, Falkowski PG. Diatoms: A fossil fuel of the future. *Trends in Biotechnology*. 2014;32(3):117–124. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.01.004>
7. Guo Y, Wang J, Shinde S, Wang X, Li Y, Dai Y, *et al.* Simultaneous wastewater treatment and energy harvesting in microbial fuel cells: An update on the biocatalysts. *RSC Advances*. 2020;10:25874–25887. <https://doi.org/10.1039/D0RA05234E>
8. Din MI, Nabi AG, Hussain Z, Khalid R, Iqbal M, Arshad M, *et al.* Microbial fuel cells – A preferred technology to prevail energy crisis. *International Journal of Energy Research*. 2021;45(6):8370–8388. <https://doi.org/10.1002/er.6403>
9. He L, Du P, Chen Y, Lu H, Cheng X, Chang B, *et al.* Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;71:388–403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.069>
10. Chettri D, Verma AK, Sarkar L, Verma AK. Role of extremophiles and their extremozymes in biorefinery process of lignocellulose degradation. *Extremophiles*. 2021;25:203–219. <https://doi.org/10.1007/s00792-021-01225-0>
11. Faskhutdinova ER, Fotina NV, Neverova OA, Golubtsova YuV, Mudgal G, Asyakina LK, *et al.* Extremophilic bacteria as biofertilizer for agricultural wheat. *Foods and Raw Materials*. 2024;12(2):348–360. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-613>
12. Gallo G, Puopolo R, Carbonaro M, Maresca E, Fiorentino G. Extremophiles, a nifty tool to face environmental pollution: From exploitation of metabolism to genome engineering. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph18105228>
13. Breheny M, Bowman K, Farahmand N, Gomaa O, Keshavarz T, Kyazze G. Biocatalytic electrode improvement strategies in microbial fuel cell systems. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2019;94(7):2081–2091. <https://doi.org/10.1002/jctb.5916>
14. Pandit S, Savla N, Sonawane JM, Sani AM, Gupta PK, Mathuriya AS, *et al.* Agricultural waste and wastewater as feedstock for bioelectricity generation using microbial fuel cells: Recent advances. *Fermentation*. 2021;7(3). <https://doi.org/10.3390/fermentation7030169>
15. Shestakova A, Timorshina S, Osmolovskiy A. Biodegradation of keratin-rich husbandry waste as a path to sustainable agriculture. *Sustainability*. 2021;13(16). <https://doi.org/10.3390/su13168691>
16. Stingone JA, Wing S. Poultry litter incineration as a source of energy: Reviewing the potential impacts on environmental health and justice. *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*. 2011;21(1):27–42. <https://doi.org/10.2190/NS.21.1.g>
17. Tesfaye T, Sithole B, Ramjugernath D. Valorisation of chicken feathers: a review on recycling and recovery route – current status and future prospects. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017;19:2363–2378. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1443-9>
18. Pahua-Ramos ME, Hernández-Melchor DJ, Camacho-Pérez B, Quezada-Cruz M. Degradation of chicken feathers: A review. *BioTechnology: An Indian Journal*. 2017;13(6):1–24.
19. Gasmi M, Kitouni M, Carro L, Pujic P, Normand P, Boubakri H. Chitinolytic actinobacteria isolated from an Algerian semi-arid soil: Development of an antifungal chitinase-dependent assay and GH18 chitinase gene identification. *Annals of Microbiology*. 2019;69:395–405. <https://doi.org/10.1007/s13213-018-1426-z>
20. Borić M, Puliyalil H, Novak U, Likozar B. An intensified atmospheric plasma-based process for the isolation of the chitin biopolymer from waste crustacean biomass. *Green Chemistry*. 2018;20:1199–1204. <https://doi.org/10.1039/c7gc03735j>
21. Sharma S, Kaur N, Kaur R, Ramande K. A review on valorization of chitinous waste. *Journal of Polymer Research*. 2021;28. <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02759-9>
22. Lopes M, Miranda SM, Alves JM, Pereira AS, Belo I. Waste cooking oils as feedstock for lipase and lipid-rich biomass production. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2019;121(1). <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800188>
23. Kumar R, Singh L, Zularisam AW, Hai FI. Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: A review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances. *International Journal of Energy Research*. 2018;42(2):369–394. <https://doi.org/10.1002/er.3780>
24. Mukherjee A, Patel R, Zaveri P, Shah MT, Munshi NS. Microbial fuel cell performance for aromatic hydrocarbon bioremediation and common effluent treatment plant wastewater treatment with bioelectricity generation through series-parallel connection. *Letters in Applied Microbiology*. 2022;75(4):785–795. <https://doi.org/10.1111/lam.13612>
25. Dmitrieva AI, Faskhutdinova ER, Drozdova MYu, Kutuzov SS, Proskuryakova LA. Phylogenetic diversity of microorganisms from the Abakan Arzhan thermal spring: Potential producers of microbial energy. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(3):458–468. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2384>

26. Muyizer G, de Waal EC, Uitterlinden AG. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. *Applied and Environmental Microbiology*. 1993;59(3):695–700. <https://doi.org/10.1128/aem.59.3.695-700.1993>
27. Andreeva A, Budenkova E, Babich O, Sukhikh S, Ulrikh E, Ivanova S, et al. Production, purification, and study of the amino acid composition of microalgae proteins. *Molecules*. 2021;26(9).
28. Prosekov AY, Babich OO, Bespomestnykh KV. Identification of industrially important lactic acid bacteria in foodstuffs. *Foods and Raw Materials*. 2013;1(2):42–45. <https://doi.org/10.12737/2053>
29. Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, Gerken J, Schweer T, Yarza P, et al. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. *Nucleic Acids Research*. 2013;41(D1):D590–D596. <https://doi.org/10.1093/nar/gks1219>
30. König J, Grasser R, Pikor H, Vogel K. Determination of xylanase, β -glucanase, and cellulase activity. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2002;374:80–87. <https://doi.org/10.1007/s00216-002-1379-7>
31. Ghose TK. Measurement of cellulase activities. *Pure and Applied Chemistry*. 1987;59(2):257–268.
32. Galstyan AS. Unified methods for studying soil enzymes. *Eurasian Soil Science*. 1978;(2):107–113. (In Russ.). [Галстян А. Ш. Унификация методов исследования активности ферментов почв // Почвоведение. 1978. № 2. С. 107–113.]
33. Cavello I, Urbietta MS, Cavalitto S, Donati E. *Bacillus cytotoxicus* isolated from a pristine natural geothermal area reveals high keratinolytic activity. *Microorganisms*. 2020;8(6). <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060796>
34. Dhole NP, Dar MA, Pandit RS. Recent advances in the bioprospection and applications of chitinolytic bacteria for valorization of waste chitin. *Archives of Microbiology*. 2021;203:1953–1969. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02234-5>
35. Evvyernie D, Morimoto K, Karita S, Kimura T, Sakka K, Ohmiya K. Conversion of chitinous wastes to hydrogen gas by *Clostridium paraputrificum* M-21. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2001;91(4):339–343. [https://doi.org/10.1016/s1389-1723\(01\)80148-1](https://doi.org/10.1016/s1389-1723(01)80148-1)
36. Kolotova OV, Sokolova IV, Vladimtseva IV, Belen'kova TV, Shevtsova VS. Isolation and study of lipid-oxidizing microorganisms from the northern Caspian Sea. *Bulletin of the Technological University*. 2017;20(6):135–138. (In Russ.). [Выделение и изучение липидоокисляющих микроорганизмов – обитателей северного Каспия / О. В. Колотова [и др.] // Вестник Технологического Университета. 2017. Т. 20. № 6. С. 135–138.]. <https://elibrary.ru/YIXKJP>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2485>
<https://elibrary.ru/WAEZCG>

Original article
Available online at <https://fppt.ru/en>

Enzymatic Liquefaction and Characterization of *Mangifera laurina* Blume



Lejaniya Abdul Kalam Saleena^{ORCID}, Kelly Yie Lin Tan,
Lee Sin Chang^{ORCID}, Liew Phing Pui*^{ORCID}

UCSI University^{ORCID}, Kuala Lumpur, Malaysia

Received: 20.04.2023
Revised: 10.08.2023
Accepted: 05.09.2023

*Liew Phing Pui: zoepui123@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-5305-4334>
Lejaniya Abdul Kalam Saleena: <https://orcid.org/0000-0001-7852-8073>
Lee Sin Chang: <https://orcid.org/0000-0002-5694-3943>

© L.A.K. Saleena, K.Y.L. Tan, L.S. Chang, L.P. Pui, 2024



Abstract.

The fruit *Mangifera laurina* Blume lacks sufficient research attention, with no literature available on its physicochemical properties, proximate nutritional composition, carotenoid content, or enzyme liquefaction process. Therefore, we aimed to optimize the parameters for enzymatic liquefaction of *M. laurina* puree and comprehensively analyze its characteristics.

Homogenized pulp of *M. laurina* was treated with different enzymes (Pectinex Ultra SPL, Celluclast, Fungamyl, and Termamyl). Pectinex Ultra SPL was selected as the most effective enzyme as it significantly decreased viscosity and increased juice yield. Pectinex Ultra SPL was then used to treat the homogenized pulp at different concentrations (0–4.0%), different incubation times (0–2.5 h), and different incubation temperatures (25–60°C). We considered these parameters as independent variables and studied their effects on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color to establish optimum conditions for the enzymatic liquefaction of *M. laurina* pulp.

The recommended enzymatic liquefaction conditions were set as 2.0% Pectinex Ultra SPL at 45°C for 2.0 h. The optimized enzyme-liquefied mango puree showed a noteworthy decrease in total carotenoids ($174.15 \pm 0.04 \mu\text{g}/100 \text{ g}$), crude protein, crude fat, and crude fiber, compared to fresh mango puree. However, enzymatic liquefaction provided the mango puree with higher contents of moisture and ash, better water activity, and higher juice yield, compared to fresh mango puree.

Enzymatic liquefaction of fruit juice provides advantages in terms of improved digestion, increased yield, and enhanced economic profit. Its ability to enhance nutrient availability, increase extraction rates, and optimize production processes makes it a valuable technique in various food industries.

Keywords. *Mangifera laurina*, mango, enzymatic, enzymatic liquefaction, fruit juice

For citation: Saleena LAK, Tan KYL, Chang LS, Pui LP. Enzymatic Liquefaction and Characterization of *Mangifera laurina* Blume. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):37–47. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2485>

Ферментативное разжижение и характеристика пюре из плодов *Mangifera laurina* Blume

Л. А. К. Салена^{ORCID}, К. И. А. Тан, А. С. Чанг^{ORCID}, А. П. Пуи*^{ORCID}Университет UCSF^{ORCID}, Куала-Лампур, Малайзия

Поступила в редакцию: 20.04.2023

Принята после рецензирования: 10.08.2023

Принята к публикации: 05.09.2023

*А. П. Пуи: zoepui123@gmail.com,<https://orcid.org/0000-0001-5305-4334>Л. А. К. Салена: <https://orcid.org/0000-0001-7852-8073>А. С. Чанг: <https://orcid.org/0000-0002-5694-3943>

© Л. А. К. Салена, К. И. А. Тан, А. С. Чанг, А. П. Пуи, 2024



Аннотация.

Свойства плодов манго *Mangifera laurina* Blume не достаточно изучены: отсутствуют данные о его физико-химических свойствах, питательном составе, содержании каротиноидов и процессе ферментативного разжижения. Целью исследования стала оптимизация параметров ферментативного разжижения пюре плодов *M. laurina* и анализ этого продукта.

Гомогенизированную мякоть плодов *M. laurina* обрабатывали различными ферментами (Pectinex Ultra SPL, Celluclast, Fungamyl и Termamyl). Pectinex Ultra SPL был выбран как наиболее эффективный фермент, т. к. он снижает вязкость и увеличивает выход сока. Pectinex Ultra SPL использовался для обработки гомогенизированной мякоти при различных концентрациях (0–4,0 %), времени инкубации (0–2,5 ч) и температуре инкубации (25–60 °C). Эти параметры рассматривались как независимые переменные. Изучали их влияние на вязкость, выход сока, общее количество растворимых сухих веществ, pH и цвет.

Экспериментальным путем установили оптимальные условия ферментативного разжижения мякоти плодов *M. laurina*: 2,0 % Pectinex Ultra SPL при 45 °C в течение 2,0 ч. По сравнению со свежим пюре оптимизированный образец показал снижение общего количества каротиноидов ($174,15 \pm 0,04$ мкг/100 г), сырого белка, неочищенного жира и сырой клетчатки. Однако ферментативное разжижение привело к повышению содержания влаги и золы, активности воды и выходу сока по сравнению со свежим пюре.

Ферментативное сжижение пюре плодов манго повышает доступность питательных веществ, увеличивает выход фруктового сока и повышает экономическую прибыль. Следовательно, ферментативное сжижение может применяться в различных пищевых отраслях, т. к. оно повышает доступность питательных веществ, увеличивает скорость экстракции и оптимизирует производственные процессы.

Ключевые слова. *Mangifera laurina*, манго, фермент, ферментативное разжижение, фруктовый сок

Для цитирования: Ферментативное разжижение и характеристика пюре из плодов *Mangifera laurina* Blume / Л. А. К. Салена [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 37–47. (На англ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2485>

Introduction

There have been extensive studies of vast varieties of plants. However, a substantial number of plant species are still understudied. One of such species is *Mangifera*, whose fruits, commonly known as mango, have been underutilized. While *Mangifera indica* L. has been widely studied and considered superior to other mangoes, *Mangifera foetida* L., *Mangifera odorata* Griff., *Mangifera pajang* Kosterm., and *Mangifera laurina* Blume are examples of underutilized *Mangifera* fruits [1].

Originating from Southeast Asia, mangoes are available in more than 110 countries where they grow in tropical and subtropical areas. In terms of production, marketing, and consumption, mangoes are considered one of the most important commercial crops worldwide.

They are an excellent source of vitamin C, vitamin A, and copper, as well as a good source of B vitamins. Mangoes also possess high concentrations of various phytochemicals [2]. They can be processed and used at multiples stages of their growth. Unripe mangoes are mainly used to produce chutneys and pickles, or in fruit salads. Puree made from ripe mangoes is widely utilized in various products, such as nectars, squashes, jams, beverages, and fruit leathers [3]. *M. laurina* is an evergreen tree, native to tropical Asian countries, such as Malaysia, Indonesia, and Philippines. It grows in moist forests at low altitudes. *M. laurina* starts flowering when it becomes about 15 m tall and can grow up to a height of 36 m. Compared to the common mango, its flowers are smaller and its petals have a different

shape and color. With the introduction of *M. indica*, *M. laurina* has been used less frequently.

Many tropical fruits, such as papaya, apricot, plum, and mango, have flavors that are too strong or acidic. They are also less pressable than other fruits. Due to these characteristics, they are unsuitable for ready-to-serve beverages without blending, dilution, or both. Therefore, they are converted into puree, which is a cream-like substance or a thick liquid [4]. Puree is usually made by blending until a uniform pulp is achieved. However, blending alone produces a low juice yield due to the retention of juice in the pulp, especially in fruits high in polysaccharides. It also damages certain properties in fruits [5]. Thus, enzymes are introduced in puree production to maintain texture, nutrient composition, taste, and aroma, while increasing juice yield and decreasing viscosity. This process is called enzymatic liquefaction. In juice extraction, macerating enzymes are commonly used, such as pectinase and cellulase [6].

Although a wide variety of the *Mangifera* species have been studied, there is no published literature on the characterization of *M. laurina* in terms of its physicochemical properties, proximate nutritional composition, or carotenoid content. Neither do we know of any research into the enzyme liquefaction of its fruit. Therefore, we aimed to characterize *M. laurina* and optimize its enzymatic liquefaction parameters.

Study objects and methods

Materials. We used *Mangifera laurina* Blume, a type of mango fruit, in our experiment. The fruits were purchased from a market in Serdang, a town in Selangor, Malaysia. After washing and peeling each fruit, we removed its seed by slicing the pulp into smaller pieces. The seed was then thrown away, while the pieces of pulp were vacuum-packed and stored in the freezer at -18°C . The enzymes Pectinex Ultra SPL, Celluclast, Termamyl, and Fungamyl (Novozymes, Denmark) were used for liquefaction. All chemicals and solvents used in analyses were of analytical grade, unless specified otherwise.

Preparation of mango puree. In preparation for enzymatic liquefaction, the mango pulp was homogenized into puree using a hand blender at high speed for 1 min. After homogenization, the mango puree was poured into five separate beakers, each containing 100 g of the puree. The beakers were labeled according to the enzyme type – Pectinase Ultra SPL, Celluclast, Fungamyl, and Termamyl. One beaker served as a control sample. Each of the enzyme types was used at 1% v/w. The enzymes were then added according to the labels on the beakers with mango puree. The control sample contained no added enzyme.

The mixtures of mango puree and enzymes were stirred using a glass rod for 30 s each. Then, the beakers were placed into a water bath at 45°C for 1 h. To ensure even mixing and enzymatic liquefaction, constant

shaking was applied using the water bath shaker at medium speed. After 1 h, the beakers were removed from the water bath and placed into another water bath at 80°C for 5 min to inactivate the enzymes. Then, they were transferred into an ice water bath to cool down for another 5 min.

Enzymatic liquefaction depends on several important parameters, namely the type of enzyme, its concentration, as well as incubation time and temperature. Different types of enzymes exhibit different degrees of activity when utilized in enzymatic liquefaction to reduce the viscosity of fruit pulp [6].

Effects of different concentrations of pectinase on mango puree. Pectinex Ultra SPL was selected as the most suitable enzyme, and the process of enzymatic liquefaction was repeated. For this, the mango fruit pulp was homogenized into puree with a hand blender at high speed for 1 min. After homogenization, the puree was poured into nine separate beakers, each containing 100 g of the puree. The beakers were labeled according to the concentrations of Pectinex Ultra SPL to be used (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, and 4.0% v/w). The enzyme Pectinex Ultra SPL in the concentrated liquid form was then added into the beakers according to the labeled concentrations.

The mixtures of mango puree and Pectinex Ultra SPL were stirred using a glass rod for 30 s each. Then, the beakers were placed into a water bath at 45°C for 1 h. To ensure even mixing and enzymatic liquefaction, constant shaking was applied using the water bath shaker at medium speed. After 1 h, the beakers containing the mixture were removed from the water bath and placed into another water bath at 80°C for 5 min to inactivate the enzyme. Then, they were transferred into an ice water bath to cool down for another 5 min.

Effects of incubation time on mango puree liquefied with the optimized enzyme concentration. The optimum concentration of Pectinex Ultra SPL was determined at 2% v/w. After that, enzymatic liquefaction was repeated with different incubation times. The mango fruit pulp was homogenized into puree using a hand blender at high speed for 1 min. Then, the mango puree was poured into six separate beakers, each containing 100 g of the puree. The beakers were labeled according to different incubation times (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 h). After that, 2% v/w Pectinex Ultra SPL was added into each of the beakers.

The mixtures of mango puree and Pectinex Ultra SPL were stirred using a glass rod for 30 s each. Then, the beakers were placed into a water bath at 45°C , except for the beaker labeled “0 h”, whose viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color were measured immediately after 30 s of stirring. To ensure even mixing and enzymatic liquefaction, constant shaking was applied using the water bath shaker at medium speed. At the end of each incubation time (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 h), the beakers were removed from the water bath according

to their respective labels and placed into another water bath at 80°C for 5 min to inactivate the enzyme. Then, they were transferred into an ice water bath to cool down for another 5 min.

Effects of incubation temperature on mango puree liquefied during the optimized incubation time. Having determined the optimum incubation time (2 h), we aimed to determine the optimum temperature for the enzymatic liquefaction of mango puree. For this, enzymatic liquefaction was repeated at different incubation temperatures. The mango fruit pulp was homogenized into puree using a hand blender at high speed for 1 min. After homogenization, the puree was poured into six separate beakers, each containing 100 g of the puree. The beakers were labeled according to different incubation temperatures (25, 40, 45, 50, 55, and 60°C). Then, 2% v/w of Pectinex Ultra SPL was added into each of the beakers.

The mixtures of mango puree and Pectinex Ultra SPL were stirred using a glass rod for 30 s each. Then, the beakers labeled with differing incubation temperatures (25, 40, 45, 50, 55, and 60°C) were placed into water baths at their respective temperatures for 2 h. The beaker labeled 25°C served as a control and was kept at room temperature. To ensure even mixing and enzymatic liquefaction of the mango puree, constant shaking was applied using the water bath shaker at medium speed. After 2 h, the beakers were removed from their respective water baths and placed into another water bath at 80°C for 5 min to inactivate the enzyme. Then, they were transferred into an ice water bath to cool down for another 5 min.

Optimization of enzyme-liquefied puree. Triplicate results were recorded and tabulated for each of the steps in determining the optimum parameters for enzymatic liquefaction of mango puree. In particular, we determined the optimum enzyme type, enzyme concentration, incubation time, and incubation temperature based on the statistical analysis of viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color.

Physicochemical properties analysis. Water activity. The water activity of fresh mango puree and enzyme-liquefied mango puree was measured using a LabMaster – A_w water activity meter at room temperature, $25.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ [7]. Prior to that, the water activity meter was calibrated using a potassium sulfate solution (K_2SO_4) and potassium chloride (KCl). Triplicate results were obtained for each sample.

Color. The color of all the mango puree samples was measured using a ColorFlex EZ Hunter Lab colorimeter. Before the measurements, the colorimeter was calibrated against a standard white tile with reflectance values ($Y = 94.1$, $X = 0.3129$, $y = 0.3189$). The colorimetric data was expressed in terms of L^* , a^* , and b^* for luminosity or lightness, green-red, and blue-yellow components, respectively [8]. Triplicate results were obtained for each sample.

Total soluble solids (Brix). The content of total soluble solids in the mango puree samples was measured using a Milwaukee digital sugar refractometer. Before use, the refractometer was calibrated using distilled water. Then, one drop of a sample at 20°C was placed on the refractometer and the reading was obtained [9]. Triplicate results were obtained for each sample.

Viscosity. The viscosity of the mango puree samples was measured with a Brookfield DV-II+Pro viscometer calibrated before use [10]. For this, 250 mL of a room temperature sample contained in the beaker was used each time. The readings were obtained with spindle IV at 100 rpm in triplicate.

pH. The pH of all mango puree samples was measured with a digital pH meter, which was calibrated with two buffer solutions of pH 7.0 and pH 4.0 before each usage. For the measurement, 50 mL of a sample was poured into a 100 mL beaker [9]. Triplicate results were obtained for each sample.

Juice yield. The juice yield of the mango puree samples was measured by weight, using a coffee sock and an electronic weighing balance. A 250 mL beaker was placed on the electronic weighing balance and it was zeroed. A coffee sock was then positioned above the 250 mL beaker. 100 g of a sample was then weighed and poured into the coffee sock. The coffee sock was then squeezed dry and the juice from the sample was collected in the 250 mL beaker, with its weight recorded. Triplicate results were obtained for each sample.

Proximate analyses. Five proximate analyses were conducted to determine crude protein, crude fat, crude fiber, ash content, and moisture content of both fresh and enzyme-liquefied mango puree samples. Official methods of the AOAC were used for all five proximate analyses [11].

Carotenoid analysis. The total carotenoid content ($\mu\text{g}/100\text{ g}$) of both fresh and enzyme-liquefied mango purees was determined using the direct spectrophotometric method adopted from Kimura *et al.* with slight modifications [12]. First, 3 g of a homogenized sample was added into a beaker containing 10 mL of distilled water. The mixture was allowed to stand at room temperature for 30 min. Then, 20 mL of precooled acetone (4°C) was added into the mixture, which was allowed to stand for 15 min. Then, the mixture was filtered through a filter paper in a Buchner funnel which creates a vacuum suction. The filtrate was collected in a receiving flask. To ensure that the carotenoid content of the sample was fully extracted, the filtration process was repeated twice with enough acetone to cover. Next, partition of petroleum ether was carried out using a 500 mL separating funnel with stand. For this, 20 mL of petroleum ether was poured into the funnel, followed by one third of the filtrate, and 300 mL of distilled water. The phases were allowed to separate. The lower aqueous phase was then eluted and discarded. These steps were repeated with the second and third portions of the filtrate. After

the third portion was transferred, the petroleum ether phase was washed three times with 200 mL of distilled water each time. The remaining phase was collected in a round bottom flask after being passed through filter paper with 15 g of anhydrous sodium sulfate in a funnel. After that, petroleum ether in the remaining phase was evaporated with a rotary evaporator in a water bath at 35°C. When all the petroleum ether was evaporated, 1 mL of acetone was added into the round bottom flask. It was then shaken well and the acetone containing carotenoid from the sample was transferred into a 1 mL amber bottle before its absorbance was measured at 450 nm in a quartz cuvette.

$$\text{Total carotenoid content} = \frac{A \times V \times 10^4}{A_{1\%}^{1\text{cm}} \times m} \times 100 \quad (1)$$

where A is the absorbance at 450 nm; V is the total extract in volume, mL; m is the sample weight, g; $A_{1\%}^{1\text{cm}} = 2500$ (absorption coefficient recommended for carotenoid mixture).

Statistical analysis. All the samples were analyzed in triplicate and the results were presented as mean $\pm$ SD. Analysis of variance (ANOVA) was performed to determine the significance of the result ($p \leq 0.05$). Tukey's post-hoc test was used to determine the significant difference between the means. Statistical analysis was carried out using Minitab Statistical Software (Version 18.0, Minitab Inc, State College, Pennsylvania, USA).

Results and discussion

Effects of different enzymes on mango puree.

The enzymes pectinase (Pectinex Ultra SPL), cellulase, and Fungamyl added to the mango puree decreased its viscosity, with pectinase producing the lowest

viscosity at 1233.60 ± 118.80 cP. Pectinase functions by hydrolyzing pectic substances in fruits, thus decreasing viscosity [13]. Since these pectin-containing substances also possess a high water-holding capacity, pectin degradation by pectinase reduces the water-holding capacity as well. Free water is then released into the system, leading to further reduction in viscosity [14]. We found no change in viscosity when the enzyme Termamyl was applied. Being a type of α -amylase, Termamyl hydrolyzes starch into disaccharides and monosaccharides [15]. During ripening, the degradation of starch present in mango fruits increases drastically, reducing its content and converting it into simple sugars. The degree of degradation depends on the cultivar [16]. Since we used ripe mango fruits, starch degradation was close to complete, with no change in viscosity when Termamyl was applied (Table 1).

Pectinase produced the highest juice yield from the enzyme-treated mango puree at 60.18 ± 2.00 g. As mentioned above, pectinase is responsible for the degradation of pectin in plant cells, which possess a high water-holding capacity. As a result of pectin degradation, free water is released as it solubilizes otherwise insoluble pectin in the fruit pulp [17]. The release of free water caused more juice to be produced and thus increased the juice yield. Although cellulase, Fungamyl, and Termamyl increased the juice yield as well, their juice yields were not as high as those produced by pectinase. There was no significant difference between the amounts of juice yielded by the three enzymes either (Table 1).

Pectinase, cellulase, and Fungamyl increased the content of total soluble solids in the mango puree significantly, while Termamyl did not. Pectinase application resulted in the highest increase in total soluble

Table 1. Effect of different types of enzymes on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color of mango puree liquefied with 1% enzyme at 45°C during 1 h

Таблица 1. Влияние различных типов ферментов на вязкость, выход сока, общее содержание растворимых сухих веществ, pH и цвет пюре манго, подвергавшегося разжижению 1 % ферментом при 45 °С в течение 1 ч

Analysis	Enzyme type				
	Control	Pectinase	Cellulase	Fungamyl	Termamyl
Viscosity, cP	2264.10 $\pm$ 205.20 ^a	1233.60 $\pm$ 118.80 ^d	1806.50 $\pm$ 24.10 ^{bc}	1718.50 $\pm$ 66.60 ^c	2264.10 $\pm$ 205.20 ^{ab}
Juice yield, g	60.18 $\pm$ 2.00 ^c	80.78 $\pm$ 2.80 ^a	64.13 $\pm$ 1.17 ^{bc}	63.90 $\pm$ 0.97 ^{bc}	65.32 $\pm$ 1.30 ^b
Total soluble solids, °Brix	14.70 $\pm$ 0.10 ^c	15.63 $\pm$ 0.20 ^a	15.13 $\pm$ 0.06 ^b	15.17 $\pm$ 0.11 ^b	14.83 $\pm$ 0.12 ^{bc}
pH	3.84 $\pm$ 0.10 ^a	3.60 $\pm$ 0.10 ^a	3.68 $\pm$ 0.10 ^a	3.72 $\pm$ 0.14 ^a	3.58 $\pm$ 0.08 ^a
L^*	60.73 $\pm$ 0.58 ^a	58.52 $\pm$ 0.71 ^{ab}	58.27 $\pm$ 0.62 ^{ab}	59.34 $\pm$ 0.78 ^{ab}	57.51 $\pm$ 1.94 ^b
a^*	18.63 $\pm$ 0.43 ^a	15.77 $\pm$ 0.17 ^c	16.52 $\pm$ 0.34 ^c	17.74 $\pm$ 0.67 ^{ab}	16.88 $\pm$ 0.46 ^{bc}
b^*	78.73 $\pm$ 0.64 ^a	76.60 $\pm$ 0.42 ^b	76.55 $\pm$ 0.86 ^b	78.30 $\pm$ 0.59 ^a	78.25 $\pm$ 0.26 ^a

Data on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color (L^* , a^* , b^*) are means $\pm$ standard deviations, where $n = 3$. For each row, superscripts of the same letter are not significantly different at $p < 0.05$, as measured by the Tukey HSD Test. HSD – honest significant difference; L^* – degree of lightness and darkness; a^* – degree of redness or greenness; b^* – degree of yellowness or blueness.

Вязкость, выход сока, общее количество растворимых сухих веществ, pH и цвет (L^* , a^* , b^*) представлены как средние значения $\pm$ стандартные отклонения, где $n = 3$. Одна и та же буква – показатель отсутствия существенного различия при $p < 0,05$ (тест Тьюки). HSD – существенное различие; L^* – степень светлоты и темноты; a^* – степень красноты/зелености; b^* – степень желтизны/синевы.

solids at $15.63 \pm 0.20^\circ\text{Brix}$ (Table 1). The increase in total soluble solids is attributed to tissue breakdown, which releases nutritional components within the tissues of the fruit pulp upon enzyme treatment [18].

As for pH, all the enzyme treatments had no significant effect on the pH of the mango puree. The addition of enzyme should decrease the pH of mango puree due to the release of carboxyl groups from the breakdown of pectic substances (Table 1). However, our experiment showed no such decrease. This could be due to a low enzyme concentration (1%) and therefore a minimal release of carboxyl groups [19].

Effects of pectinase concentrations on mango puree.

According to our results, the viscosity of the mango puree samples decreased with higher enzyme concentrations. Significant increments in viscosity were observed from 0.5 to 2.0% v/w of pectinase. Slight increments were recorded as the enzyme concentration was increased up to 4.0% v/w but the differences were not significant. As discussed earlier, the enzyme pectinase allows extraction from fruit pulp cells through the enzymatic hydrolysis of pectic substances present in the pulp. Pectinase leads to the release of free water that would otherwise be held by pectic substances. Viscosity is therefore decreased [13, 14]. Increased concentrations of pectinase facilitated a higher rate of hydrolysis of the pureed mango pulp tissues and led to the reduction in viscosity. Similar results were reported in the studies by Norjana and Noor Aziah, where pectinase was used to liquefy a variety of mango fruits and durian [19].

As can be seen in Table 2, the juice yield of the enzyme-treated mango purees increased with higher concentrations of the enzyme. However, we observed no significant increase after using 1.5% v/w of the enzyme. An unpleasant odor was emitted upon incubation from 3.0% v/w of the enzyme onwards. It could have been caused by an increased concentration of pectinase since this enzyme possesses a fermentation odor and its increased amount can make the odor more distinct and recognizable [20].

We observed no significant difference in total soluble solids as the enzyme concentration was increased from 0 to 4.0% v/w. Despite some slight increments in total soluble solids due to the breakdown of mango puree tissues by pectinase and a subsequent release of components from the tissues, those increments were not enough for the enzyme concentration to be considered as a factor of total soluble solids increase [19]. Sugars, organic acids, vitamins, and other soluble components make up most of soluble solids in fruit juice. Enzymatic liquefaction has the greatest impact on the breakdown of pectin, which is a complex carbohydrate rather than a soluble solid. While pectin breakdown can improve juice release, it has no effect on the concentration of soluble solids in the juice. Soluble solids in fruit juice are mostly determined by the natural composition of the fruit, while enzymatic liquefac-

tion has no direct influence on them [30]. In a study by Arif *et al.*, the liquefaction process decreased the total soluble solids produced by liquid sugar from sweet sorghum starch. During liquefaction, starch is broken down into dextrin, maltose, and glucose. Dextrin is a result of imperfect starch hydrolysis. The process also involves alkali and oxidizing agents. The reduction of the chain length changes the properties of starch. Not easily soluble in water, it is converted into dextrin which is very soluble in hot or cold water with a relatively low viscosity [29].

As shown in Table 2, increased enzyme concentrations from 0 to 4.0% v/w significantly decreased the pH of the mango puree. This was due to the breakdown of pectic substances by pectinase. When broken down or hydrolyzed, these pectic substances released carboxyl groups into the mango puree, lowering its pH [19, 21].

Effects of incubation time on mango puree liquefied with the optimized enzyme concentration. As can be seen in Table 3, the viscosity of the enzyme-treated mango puree significantly decreased from 1560.40 ± 96.30 cP at 0.0 h to 1238.43 ± 61.30 cP at 0.5 h, as well as from 1036.43 ± 12.10 cP at 1.5 h to 879.70 ± 36.30 cP at 2.0 h. The viscosity decreased further at 2.5 h of incubation but it was not significant. We observed a correlation between lower viscosity values and longer incubation times. Similar results were reported by Reddy *et al.*, who attributed the lower viscosity of homogenized mango fruits to the pectolytic action of pectinase, which hydrolyzed the pectin present in mango pulp [22].

The enzyme-treated mango purees also showed significant increases in juice yield with longer incubation times, namely from 80.84 ± 0.65 g at 0.0 h to 83.61 ± 0.57 g at 0.5 h, as well as from 85.72 ± 0.18 g at 1.5 h to 87.87 ± 0.16 g at 2.0 h (Table 3). As pectic substances in the cells of homogenized mango pulp had more time to break down, more free water contained in insoluble pectin could be released, thus increasing the juice yield [13, 14].

Total soluble solids showed no significant decrease at 0.0 to 1.5 h of incubation but they decreased significantly from 16.00 ± 0.00 to $16.23 \pm 0.06^\circ\text{Brix}$ at 1.5 to 2.0 h. Similar results were reported by Tadakittisarn *et al.*, who studied the effect of pectinolytic enzymes on fruit pulp [23]. The authors found that longer incubation allowed the enzymes more time to break down the cell walls of the fruit pulp, which in turn released more components from the cells. This resulted in a higher content of total soluble solids in the system.

Increased incubation time had no effect on the pH of the enzyme-treated mango pulp samples, with no significant difference observed (Table 3).

Effects of incubation temperature on mango puree liquefied with the optimized enzyme concentration and incubation time. As shown in Table 4, the viscosity of the enzyme-treated purees significantly

Table 2. Effect of different pectinase concentrations on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color of mango puree liquefied at 45°C for 1 h

Таблица 2. Влияние различных концентраций пектиназы на вязкость, выход сока, общее количество растворимых сухих веществ, pH и цвет пюре манго, подвергнутого разжижению при 45 °С в течение 1 ч

Analysis	Enzyme concentration, %									
	Control (0)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
Viscosity, cP	2141.10 ± 67.80 ^a	1587.70 ± 95.20 ^b	1122.50 ± 103.80 ^c	1084.00 ± 97.30 ^c	782.30 ± 27.10 ^d	775.10 ± 41.90 ^d	779.00 ± 28.90 ^d	768.60 ± 38.20 ^d	775.90 ± 26.80 ^d	
Juice yield, g	67.57 ± 4.86 ^d	75.98 ± 2.05 ^c	77.03 ± 1.57 ^c	78.77 ± 1.08 ^{bc}	83.59 ± 1.52 ^{ab}	84.31 ± 0.67 ^{ab}	84.44 ± 0.55 ^{ab}	84.98 ± 0.91 ^a	85.09 ± 0.72 ^a	
Total soluble solids, °Brix	15.10 ± 0.78 ^a	15.37 ± 0.67 ^a	15.67 ± 0.51 ^a	15.93 ± 0.64 ^a	16.10 ± 0.62 ^a	16.00 ± 0.70 ^a	16.03 ± 0.90 ^a	16.10 ± 1.04 ^a	15.9 ± 1.13 ^a	
pH	4.28 ± 0.19 ^a	3.91 ± 0.10 ^b	3.90 ± 0.12 ^{bc}	3.86 ± 0.11 ^{bcd}	3.84 ± 0.13 ^{bcd}	3.55 ± 0.06 ^{cde}	3.52 ± 0.11 ^{de}	3.45 ± 0.11 ^e	3.35 ± 0.13 ^e	
<i>L</i> *	56.90 ± 0.66 ^a	53.40 ± 0.62 ^b	52.83 ± 1.22 ^b	52.20 ± 0.92 ^{bc}	52.10 ± 0.62 ^{bc}	50.53 ± 0.55 ^c	50.40 ± 0.27 ^{cd}	48.47 ± 0.40 ^{de}	47.83 ± 0.65 ^e	
<i>a</i> *	19.20 ± 0.10 ^a	17.63 ± 0.55 ^b	17.03 ± 0.61 ^{bc}	16.73 ± 0.35 ^{bc}	16.27 ± 0.35 ^{cd}	16.10 ± 0.36 ^{cd}	15.43 ± 0.55 ^{de}	14.53 ± 0.59 ^e	14.47 ± 0.32 ^e	
<i>b</i> *	80.20 ± 1.55 ^a	78.23 ± 0.61 ^{ab}	77.63 ± 1.02 ^b	77.47 ± 0.85 ^b	77.43 ± 0.70 ^b	77.27 ± 0.35 ^b	77.23 ± 0.51 ^b	77.07 ± 0.57 ^b	77.00 ± 0.56 ^b	

Data on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color (*L**, *a**, *b**) are means ± standard deviations, where n = 3. For each row, superscripts of the same letter are not significantly different at $p < 0.05$, as measured by the Tukey HSD Test. HSD – honest significant difference; *L** – degree of lightness and darkness; *a** – degree of redness or greenness; *b** – degree of yellowness or blueness.

Вязкость, выход сока, общее количество растворимых сухих веществ, pH и цвет (*L**, *a**, *b**) представлены как средние значения ± стандартные отклонения, где n = 3. Одна и та же буква – показатель отсутствия существенного различия при $p < 0.05$ (тест Тьюки). HSD – существенное различие; *L** – степень светлоты и темноты; *a** – степень красноты/зелености; *b** – степень желтизны/синевы.

Table 3. Effect of different incubation times on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color of mango puree liquefied with 2% enzyme at 45°C

Таблица 3. Влияние периода инкубации на вязкость, выход сока, общее количество растворимых сухих веществ, pH и цвет пюре манго, подвергнутого разжижению 2 % ферментом при 45 °С

Analysis	Time, h					
	Control (0)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Viscosity, cP	1560.40 ± 96.30 ^a	1238.43 ± 61.30 ^b	1106.33 ± 24.10 ^{bc}	1036.43 ± 12.10 ^c	879.70 ± 36.30 ^d	870.53 ± 52.00 ^d
Juice yield, g	80.84 ± 0.65 ^d	83.61 ± 0.57 ^c	84.82 ± 0.53 ^{bc}	85.72 ± 0.18 ^b	87.87 ± 0.16 ^a	87.28 ± 0.44 ^a
Total soluble solids, °Brix	15.90 ± 0.10 ^b	16.03 ± 0.06 ^b	16.03 ± 0.06 ^b	16.00 ± 0.00 ^b	16.23 ± 0.06 ^a	16.27 ± 0.06 ^a
pH	3.75 ± 0.12 ^a	3.79 ± 0.11 ^a	3.76 ± 0.14 ^a	3.78 ± 0.10 ^a	3.78 ± 0.14 ^a	3.81 ± 0.11 ^a
<i>L</i> *	57.29 ± 0.02 ^a	52.13 ± 0.01 ^b	51.69 ± 0.01 ^c	51.52 ± 0.02 ^d	51.43 ± 0.07 ^d	50.95 ± 0.13 ^e
<i>a</i> *	18.67 ± 0.31 ^a	16.23 ± 0.19 ^b	16.01 ± 0.58 ^{bc}	15.29 ± 0.16 ^{cd}	15.29 ± 0.07 ^{cd}	14.98 ± 0.09 ^d
<i>b</i> *	83.26 ± 0.14 ^a	77.95 ± 0.05 ^b	76.30 ± 0.04 ^c	76.02 ± 0.11 ^{cd}	75.95 ± 0.27 ^{cd}	75.75 ± 0.15 ^d

Data on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color (*L**, *a**, *b**) are means ± standard deviations, where n = 3. For each row, superscripts of the same letter are not significantly different at $p < 0.05$, as measured by the Tukey HSD Test. HSD – honest significant difference; *L** – degree of lightness and darkness; *a** – degree of redness or greenness; *b** – degree of yellowness or blueness.

Вязкость, выход сока, общее количество растворимых сухих веществ, pH и цвет (*L**, *a**, *b**) представлены как средние значения ± стандартные отклонения, где n = 3. Одна и та же буква – показатель отсутствия существенного различия при $p < 0.05$ (тест Тьюки). HSD – существенное различие; *L** – степень светлоты и темноты; *a** – степень красноты/зелености; *b** – степень желтизны/синевы.

Table 4. Effect of different incubation temperatures on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color of mango puree liquefied with 2% enzyme during 2 h

Таблица 4. Влияние температуры инкубации на вязкость, выход сока, общее количество растворимых сухих веществ, pH и цвет пюре манго, подвергавшегося разжижению в течение 2 ч

Analysis	Temperature, °C					
	Control (room temperature at 25°C)	40	45	50	55	60
Viscosity, cP	1090.47 ± 51.20 ^a	957.73 ± 39.50 ^{ab}	768.77 ± 58.80 ^c	776.03 ± 79.70 ^c	789.90 ± 71.80 ^{bc}	786.93 ± 81.70 ^{bc}
Juice yield, g	83.91 ± 0.69 ^b	86.76 ± 0.27 ^a	87.17 ± 0.44 ^a	87.13 ± 0.40 ^a	86.97 ± 0.18 ^a	87.09 ± 0.14 ^a
Total soluble solids, °Brix	14.83 ± 0.25 ^b	15.80 ± 0.10 ^a	15.87 ± 0.06 ^a	15.73 ± 0.06 ^a	15.67 ± 0.06 ^a	15.67 ± 0.11 ^a
pH	3.77 ± 0.18 ^b	4.18 ± 0.12 ^a	4.18 ± 0.07 ^a	4.17 ± 0.09 ^a	4.20 ± 0.07 ^a	4.19 ± 0.11 ^a
<i>L</i> *	54.85 ± 0.45 ^a	51.74 ± 0.40 ^b	50.90 ± 0.35 ^{bc}	50.79 ± 0.67 ^{bc}	49.43 ± 1.05 ^{cd}	48.87 ± 0.72 ^d
<i>a</i> *	14.29 ± 0.12 ^b	15.33 ± 0.09 ^a	15.26 ± 0.23 ^a	15.23 ± 0.23 ^a	13.87 ± 0.25 ^b	13.75 ± 0.35 ^b
<i>b</i> *	72.40 ± 0.14 ^c	74.47 ± 0.54 ^a	74.00 ± 0.22 ^{ab}	73.60 ± 0.16 ^b	71.00 ± 0.40 ^d	70.61 ± 0.14 ^d

Data on viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color (*L**, *a**, *b**) are means ± standard deviations, where n = 3. For each row, superscripts of the same letter are not significantly different at $p < 0.05$, as measured by the Tukey HSD Test. HSD – honest significant difference; *L** – degree of lightness and darkness; *a** – degree of redness or greenness; *b** – degree of yellowness or blueness.

Вязкость, выход сока, общее количество растворимых сухих веществ, pH и цвет (*L**, *a**, *b**) представлены как средние значения ± стандартные отклонения, где n = 3. Одна и та же буква – показатель отсутствия существенного различия при $p < 0,05$ (тест Тьюки). HSD – существенное различие; *L** – степень светлоты и темноты; *a** – степень красноты/зелености; *b** – степень желтизны/синевы.

decreased at higher incubation temperatures, namely from 1090.47 ± 51.20 cP at room temperature of 25°C to 87.17 ± 0.44 cP at 45°C. Similar results were obtained by Domingues *et al.*, who studied the enzymatic treatment of passion fruit juice [24]. They also used pectinase and reported optimal viscosity reduction at 50°C.

The juice yield significantly increased at higher incubation temperatures, particularly from 83.91 ± 0.69 g at room temperature to 25 at 40°C. Increases in yield were also observed at 45, 50, 55, and 60°C but the differences were not significant. As discussed earlier, pectinase is responsible for the degradation of pectic substances in the homogenized mango pulp, which releases free water and, in turn, results in higher juice yield [24]. Our results were consistent with those of Domingues *et al.*, who observed optimum pectinase activity at around 50°C, the temperature at which a significant increase in juice yield occurred [24].

Table 4 shows no significant increase in the content of total soluble solids at higher incubation temperatures. Although some increases were still observed – due to the breakdown of mango pulp tissues and a release of nutritional components from the cells – they were not statistically significant [16].

Higher incubation temperatures caused a significant increase in the pH, namely from 3.77 ± 0.18 at room temperature (25°C) to 4.18 ± 0.12 at 40°C. No significant increase was observed after that, as shown in Table 4. The increase in pH could be due to the release of carboxyl groups from pectin molecules as pectin was broken down by pectinase. This was also reported by Sayed *et al.* in their study of enzymatic liquefaction of mango pulp [21].

Optimization of the enzyme-liquefied mango puree.

The enzymatic liquefaction parameters were optimized according to the viscosity and juice yield of the end product. We chose pectinase (Pectinex Ultra SPL) over cellulase, Fungamyl, and Termamyl due to its ability to significantly decrease viscosity and increase juice yield (1233.60 ± 118.80 cP and 80.78 ± 2.80 g, respectively).

The optimal enzyme concentration was 2.0% v/w, since it significantly decreased viscosity to 782.30 ± 27.10 cP. Similarly, the incubation time of 2.0 h significantly decreased viscosity and increased the juice yield. At a longer time of 2.5 h, the puree became unappealing, with a darker and more dull shade and a distinct cooked aroma. The optimal incubation temperature was 45°C as it produced a significant decrease in viscosity as well. Higher temperatures (50°C onwards) gave the puree a cooked aroma.

Proximate analyses. As shown in Table 5, the moisture contents in the fresh mango puree and in the optimized enzyme-liquefied mango puree were 81.70 ± 0.01 and $82.26 \pm 0.01\%$, respectively. The enzyme-liquefied sample had higher moisture due to the action of pectinase, which degraded pectin in the cells of the mango pulp. As a result, free water was released into the system from the cells, reducing their water-holding capacity and thus increasing the moisture content. Surajbhan *et al.* reported similar results in their study of the effect of pectinase on fruits [25]. The moisture contents of both fresh and enzyme-liquefied mango purees in our study were similar to the moisture content of fresh mango fruits reported by Jideani *et al.*, with an average of 80.00% (Table 5) [26].

The ash content was higher in the optimized enzyme-liquefied mango puree at $0.470 \pm 0.002\%$, as compared

Table 5. Proximate analyses and water activity of fresh mango puree and optimized enzyme-liquefied mango puree

Таблица 5. Экспресс анализ и активность воды свежего и оптимизированного ферментативно сжиженного пюре манго

Analysis	Fresh mango puree	Optimized enzyme-liquefied mango puree
Moisture, %	81.70 ± 0.01 ^b	82.26 ± 0.01 ^a
Ash, %	0.310 ± 0.001 ^b	0.470 ± 0.002 ^a
Crude protein, %	3.20 ± 0.02 ^a	2.10 ± 0.01 ^b
Crude fat, %	0.50 ± 0.01 ^b	0.80 ± 0.01 ^a
Crude fiber, %	0.90 ± 0.01 ^a	0.50 ± 0.01 ^b
Water activity, A_w	0.890 ± 0.001 ^b	0.980 ± 0.001 ^a

Data on the contents of moisture, ash, crude protein, crude fat, and crude fiber in fresh mango puree and optimized enzyme-liquefied mango puree are means ± standard deviations, where $n = 3$. For each row, superscripts of the same letter are not significantly different at $p < 0.05$, as measured by the Tukey HSD Test. HSD – honest significant difference.

Содержание влаги, золы, сырого белка, сырого жира и сырой клетчатки в свежем пюре манго и оптимизированном ферментативно сжиженного пюре представлены как средние значения ± стандартные отклонения, где $n = 3$. Для каждой строки одна и та же буква в верхнем индексе – показатель отсутствия существенного различия при $p < 0,05$ (тест Тьюки). HSD – существенное различие.

to the fresh mango puree at $0.310 \pm 0.001\%$ (Table 5). The ash content analysis is used to determine the amount of minerals in fresh food. The enzyme-liquefied mango puree had a larger amount of minerals because the enzyme pectinase facilitated the breakdown of tissues of the mango pulp, releasing mineral components into the system [16].

The crude protein content in the fresh mango puree was higher than that in the enzyme-liquefied mango puree at 3.20 ± 0.02 and $2.10 \pm 0.01\%$, respectively (Table 5). Such a significant decrease in protein resulted from its thermal degradation. In fresh fruits, proteins usually denature at temperatures above 45.0°C , and the duration of heating also contributes to the degree of denaturation [27]. The use of viscosity-reducing enzymes could be particularly helpful in liquefying mango pulps and obtaining low-viscosity juice from them since these commercial enzymes require a low reaction temperature.

The fat content was higher in the optimized enzyme-liquefied mango puree ($0.80 \pm 0.01\%$) than in the fresh mango puree ($0.50 \pm 0.01\%$), as shown in Table 5. This could again be caused by the action of pectinase, which degraded the cell wall structures held by pectin. As the cell walls collapsed and separated, nutritional components, including fat, were released into the system from the interior of the mango pulp cells [16].

The crude fiber content in the fresh mango puree was higher than that in the optimized enzyme-liquefied mango puree, at 0.90 ± 0.01 and $0.50 \pm 0.01\%$, respectively (Table 5). The significant decrease in fiber resulted from the hydrolysis of pectic substances (fibers) present in the cell walls of the homogenized mango pulp [13, 14].

Lastly, the water activity was found to be at $0.890 \pm 0.001\%$ for fresh mango puree and at $0.980 \pm 0.001\%$ for optimized enzyme liquefied mango puree. Water activity measures the amount of free water available for reactions. The enzyme-liquefied mango puree

was treated with pectinase, which hydrolyzed pectin-containing substances in the mango puree cells. Pectin degradation also reduced a high water-holding capacity of these pectin-containing substances. Free water was then released into the system, increasing the water activity of the mango puree [13, 14].

Carotenoid content. The total carotenoid content in the optimized enzyme-liquefied mango puree was significantly lower than that in the fresh mango puree, at 174.15 ± 0.04 and $326.04 \pm 0.02 \mu\text{g}/100 \text{ g}$, respectively. This was caused by the heat treatment employed in enzymatic liquefaction, which degraded heat-sensitive thermolabile carotenoids in the mango pulp [28].

Conclusion

Mango is one of the most popular tropical fruits. Consumed widely in many countries, it has desirable attributes, such as fragrant aroma, attractive rich color, sweet taste, and health-promoting qualities. Mango is one of very few fruits that can be used at almost every step of its maturation. It can be eaten fresh on its own or used in cooking various foods. Our research focused on an understudied species of mango called *Mangifera laurina* Blume. To date, there is no published literature on its characterization.

Firstly, we optimized the parameters for enzymatic liquefaction of the mango fruit, such as enzyme type (Pectinex Ultra SPL, Celluclast, Fungamyl, and Termamyl), enzyme concentration (Pectinex Ultra SPL tested at 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, and 4.0% v/w), incubation time (0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 h), and incubation temperature (25.0, 40.0, 45.0, 45.0, 50, 55.0, and 60°C). For each of the parameters, the resulting mango puree was physicochemically analyzed for viscosity, juice yield, total soluble solids, pH, and color. Based on their effectiveness in reducing viscosity and increasing juice yield, the optimized parameters were set at 2.0% of Pectinex Ultra SPL, with an incubation time of 2.0 h at 45°C . These parameters produced

mango puree with the lowest viscosity and the highest juice yield without much affecting total soluble solids, pH, or color.

Secondly, we conducted proximate analyses on both fresh and optimized enzyme-liquefied mango purees to determine their moisture, ash, crude protein, crude fat, crude fiber, and water activity. This was done to characterize the mango and also to compare the fresh and the enzyme-liquefied mango purees. We found that the enzyme-liquefied mango puree had higher moisture and ash contents, as well as higher water activity. However, its contents of crude protein, fat, and fiber were lower than in the fresh mango puree. Since mango fruits are known for their health benefits due to high carotenoid contents, we also carried out the antioxidant analysis. According to the results, the enzyme-liquefied mango puree had a lower total carotenoid content than the fresh mango puree.

Contribution

The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare no potential conflict of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и/или публикации данной статьи.

References

1. Ledesma N, Campbell RJ. Conservation and commercial development of *Mangifera* species [Wild Mangos] in Florida. Florida State Horticulture Society. 2014;127:1–4.
2. Kumar M, Saurabh V, Tomar M, Hasan M, Changan S, Sasi M, et al. Mango (*Mangifera indica* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities. *Antioxidants*. 2021;10(2). <https://doi.org/10.3390/antiox10020299>
3. Owino WO, Ambuko JL. Mango fruit processing: Options for small-scale processors in developing countries. *Agriculture*. 2021;11(11). <https://doi.org/10.3390/agriculture11111105>
4. Akther S, Alim MA, Badsha MR, Matin A, Ahmad M, Hoque SMZ. Formulation and quality evaluation of instant mango drink powder. *Food Research*. 2020;4(4):1287–1296.
5. Bhat MK. Cellulases and related enzymes in biotechnology. *Biotechnology Advances*. 2000;18(5):355–383. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00041-0)
6. Raveendran S, Parameswaran B, Ummalyma SB, Abraham A, Mathew AK, Madhavan A, et al. Applications of microbial enzymes in food industry. *Food Technology and Biotechnology*. 2018;56(1):16–30. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.01.18.5491>
7. Leguizamon-Delgado MA, Duque-Cifuentes AL, Quintero-Castaño VD. Physico-chemical and sensory evaluation of a mango-based fruit bar. *DYNA*. 2019;86(210):276–283.
8. Shamsudin R, Zulkifli NA, Kamarul Zaman AA. Quality attributes of fresh pineapple-mango juice blend during storage. *International Food Research Journal*. 2020;27(1):141–149.
9. Babarinde GO, Olatunde SJ, Adebisi-Olabode A. Quality attributes and phytochemical properties of fresh juice produced from selected mango varieties. *Ceylon Journal of Science*. 2019;48(1):31–36. <https://doi.org/10.4038/cjs.v48i1.7585>
10. Laux D, Valente M, Ferrandis J-Y, Talha N, Gibert O, Prades A. Shear viscosity investigation on mango juice with high frequency longitudinal ultrasonic waves and rotational viscosimetry. *Food Biophysics*. 2013;8:233–239. <https://doi.org/10.1007/s11483-013-9291-6>
11. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 15th Ed. Virginia: AOAC; 1990.
12. Kimura M, Kobori CN, Rodriguez-Amaya DB, Nestel P. Screening and HPLC methods for carotenoids in sweetpotato, cassava and maize for plant breeding trials. *Food Chemistry*. 2007;100(4):1734–1746. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.10.020>
13. Larsen LR, van der Weem J, Caspers-Weiffenbach R, Schieber A, Weber F. Effects of ultrasound on the enzymatic degradation of pectin. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;72. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105465>
14. Wong CW, Tan HH. Production of spray-dried honey jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder from enzymatic liquefied puree. *Journal of Food Science and Technology*. 2017;54(2):564–571. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2501-3>
15. Agirre J, Moroz O, Meier S, Brask J, Munch A, Hoff T, et al. The structure of the AliC GH13 α -amylase from *Alicyclobacillus* sp. reveals the accommodation of starch branching points in the α -amylase family. *Acta Crystallographica Section D. Structural Biology*. 2019;75:1–7. <https://doi.org/10.1107/S2059798318014900>

16. Maldonado-Celis ME, Yahia EM, Bedoya R, Landázuri P, Loango N, Aguillón J, *et al.* Chemical composition of mango (*Mangifera indica* L.) fruit: Nutritional and phytochemical compounds. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01073>
17. Nguyen HDH, Nguyen HVH, Savage GP. Properties of pectin extracted from Vietnamese mango peels. *Foods*. 2019;8(12). <https://doi.org/10.3390/foods8120629>
18. Chen X, Xu Y, Wu J, Yu Y, Zou B, Li L. Effects of pectinase pre-treatment on the physicochemical properties, bioactive compounds, and volatile components of juices from different cultivars of guava. *Foods*. 2023;12(2). <https://doi.org/10.3390/foods12020330>
19. Norjana I, Noor Aziah AA. Quality attributes of durian (*Durio zibethinus* Murr) juice after pectinase enzyme treatment. *International Food Research Journal*. 2011;18(3):1117–1122.
20. Haile S, Ayele A. Pectinase from microorganisms and its industrial applications. *Scientific World Journal*. 2022;2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1881305>
21. Sayed MA, Kumar J, Rahman MR, Noor F, Alam MA. Effect of extraction parameters on the yield and quality of pectin from mango (*Mangifera indica* L.) peels. *Discover Food*. 2022;2. <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00029-1>
22. Reddy LV, Kim Y-M, Wee Y-J. Rapid and enhanced liquefaction of pulp from mango (*Mangifera indica* L.) cv. Totapuri using ultrasound-assisted enzyme pretreatment. *Processes*. 2020;8(6). <https://doi.org/10.3390/pr8060718>
23. Tadakittisarn S, Haruthaithanasan V, Chompreeda P, Suwonsichon T. Optmization of pectinase enzyme liquefaction of “Gros Michel” for banana syrup production. *Kasetsart Journal (Natural Science)*. 2007;41:740–750.
24. Domingues RCC, Faria Junior SB, Silva RB, Cardoso VL, Reis MHM. Clarification of passion fruit juice with chitosan: Effects of coagulation process variables and comparison with centrifugation and enzymatic treatments. *Process Biochemistry*. 2012;47(3):467–471. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.12.002>
25. Surajbhan S, Alka S, Chetan J, Lamber, R. Extraction and optimisation of guava juice by using response surface methodology. *American Journal of Food Technology*. 2012;7(6):326–339. <https://doi.org/10.3923/ajft.2012.326.339>
26. Jideani IA, Takalani T, Jideani VA, Siddiq M. Grapefruit. In: Siddiq M, Ahmed J, Lobo MG, Ozadali F, editors. *Tropical and subtropical fruits: Postharvest physiology, processing and packaging*. Oxford: Wiley-Blackwell; 2012. pp. 361–376.
27. Valentas KJ, Clark JP, Levine L. *Food processing operations and scale-up*. New York: M. Dekker; 1991. 398 p.
28. Rodrigues S, Fernandes FAN. *Advances in fruit processing technologies*. Boca Raton: CRC Press; 2012. 472 p. <https://doi.org/10.1201/b12088>
29. Arif AB, Sasmitaloka KS, Winarti C, Wahyudiono. Effect of liquefaction time and enzyme addition on liquid sugar production from sweet sorghum starch by enzymatic hydrolysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;250. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/250/1/012042>
30. Kumar S. Role of enzymes in fruit juice processing and its quality enhancement. *Advances in Applied Science Research*. 2015;6(6):114–124.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2487>
<https://elibrary.ru/LDPNKY>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Нейросетевой анализ влияния внешних факторов на микроэлементный профиль и биомассу микрозелени *Brássica júncea* L.



Я. В. Пухальский^{1,*}, Н. И. Воробьев², С. И. Лоскутов¹,
М. А. Чукаева³, Р. И. Глушаков^{4,5}, А. В. Бабыка⁶,
Д. Д. Мещеряков⁷, А. И. Якубовская⁸

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок^{ROR}, Санкт-Петербург, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии^{ROR}, Пушкин, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет^{ROR}, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова^{ROR}, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет^{ROR}, Санкт-Петербург, Россия

⁶ ООО «Фарморганик», Санкт-Петербург, Россия

⁷ ООО «Led for Plant», Красноярск, Россия

⁸ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия

Поступила в редакцию: 26.04.2023

Принята после рецензирования: 29.05.2023

Принята к публикации: 04.06.2023

*Я. В. Пухальский: puhalskyuan@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-5233-3497>

Н. И. Воробьев: <https://orcid.org/0000-0001-8300-2287>

С. И. Лоскутов: <https://orcid.org/0000-0002-8102-2900>

М. А. Чукаева: <https://orcid.org/0000-0003-3643-6757>

Р. И. Глушаков: <https://orcid.org/0000-0002-0161-5977>

А. В. Бабыка: <https://orcid.org/0009-0005-8794-3494>

Д. Д. Мещеряков: <https://orcid.org/0009-0005-0382-8457>

А. И. Якубовская: <https://orcid.org/0000-0001-8434-2689>

© Я. В. Пухальский, Н. И. Воробьев, С. И. Лоскутов, М. А. Чукаева,
Р. И. Глушаков, А. В. Бабыка, Д. Д. Мещеряков, А. И. Якубовская, 2024



Аннотация.

Выращивание органической микрозелени в искусственной среде сопряжено с разработкой унифицированного технологического регламента, который сочетает в себе возможности использования различных внешних биотических и абиотических элиситоров для получения здоровой рассады. Качество рассады зависит от сбалансированного накопления в ней эссенциальных микроэлементов. Целью исследования являлась оценка изменения нутриентного профиля микрозелени на примере горчицы сарептской сорта Ника с помощью методики фрактального расчета повторяющихся числовых рядов.

Эксперимент проводили в закрытом гроубоксе (15 суток) в условиях агрегатопоники при интенсивной 16 часовой световой культуре (440 мкмоль/м²·с). Для инокуляции растений применяли эндомикоризный гриб *Glomus mosseae*. В качестве стабилизирующей органической добавки при введении в корнеобитаемую среду (кокосовый субстрат) использовали раствор фульвокислот в концентрации 100 мг/л. Для физической обработки применяли статическое воздействие слабого электромагнитного поля с преобладанием магнитной индукции в 20 мТл. Элементный анализ проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония).

По расчетным индексам биоконпозиции микроэлементов лучший результат был диагностирован для варианта применения фульвокислот и слабого электромагнитного поля ($IndBcom_L = 0,27$). Биомасса сухого порошка на элементный анализ составила 10,2 г. Это почти в 2 раза превышало значения, полученные на контроле, без сторонних воздействий (5,2 г). Все варианты с микоризацией не оказали положительного действия на степень консолидации общего пула микроэлементов на данном сроке вегетации культуры. Прибавка по биомассе составила 20 %.

Примененный нейросетевой анализ соотношения микроэлементов в полученной микрозелени можно рассматривать как математическую модель для биохимической диагностики качества получаемой биомассы и выбора лучших условий для дальнейшего биотехнологического процесса возделывания других культур в искусственной среде при минимизации использования минеральных удобрений в пользу органо-бактериального комплекса.

Ключевые слова. Микрозелень, горчица, *Brássica júncea* L., микроэлементы, биотические факторы, абиотические факторы, световая культура, фульвокислоты, магнитооблучение, микориза

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России)^{ROR} (темы FGUS 2022-0017 и FGUS 2022-0018).

Для цитирования: Нейросетевой анализ влияния внешних факторов на микроэлементный профиль и биомассу микрозелени *Brássica júncea* L. / Я. В. Пухальский [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 48–59. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2487>

Effect of External Factors on Trace Element Profile and Biomass of Mustard (*Brassica juncea* L.) Microgreens: Neural Network Analysis



Yan V. Puhalsky^{1,*}, Nikolai I. Vorobyov², Svyatoslav I. Loskutov¹, Mariia A. Chukaeva³, Ruslan I. Glushakov^{4,5}, Andrew V. Babyka⁶, Denis D. Meshcheriakov⁷, Alla I. Yakubovskaya⁸

¹ All-Russian Research Institute for Food Additives^{ROR}, Saint Petersburg, Russia

² All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology^{ROR}, Pushkin, Russia

³ Saint-Petersburg Mining University^{ROR}, Saint Petersburg, Russia

⁴ S.M. Kirov Military Medical Academy^{ROR}, Saint Petersburg, Russia

⁵ St. Petersburg State Pediatric Medical University^{ROR}, Saint Petersburg, Russia

⁶ "Pharmorganic" LLC, Saint Petersburg, Russia

⁷ "Led for Plant" LLC, Krasnoyarsk, Russia

⁸ Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia

Received: 26.04.2023

Revised: 29.05.2023

Accepted: 04.06.2023

*Yan V. Puhalsky: puhalskyyan@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0001-5233-3497>

Nikolai I. Vorobyov: <https://orcid.org/0000-0001-8300-2287>

Svyatoslav I. Loskutov: <https://orcid.org/0000-0002-8102-2900>

Mariia A. Chukaeva: <https://orcid.org/0000-0003-3643-6757>

Ruslan I. Glushakov: <https://orcid.org/0000-0002-0161-5977>

Andrew V. Babyka: <https://orcid.org/0009-0005-8794-3494>

Denis D. Meshcheriakov: <https://orcid.org/0009-0005-0382-8457>

Alla I. Yakubovskaya: <https://orcid.org/0009-0001-8434-2689>

© Ya.V. Puhalsky, N.I. Vorobyov, S.I. Loskutov, M.A. Chukaeva,
R.I. Glushakov, A.V. Babyka, D.D. Meshcheriakov, A.I. Yakubovskaya, 2024



Abstract.

Growing organic microgreens indoors requires a unified technological procedure with various external elicitors. The quality of seedlings depends on their ability to accumulate essential microelements. This research assessed the nutrient profile of mustard microgreens using the method of fractal calculation with repeating numerical series.

The experiment involved mustard (*Brassica juncea* L.) of the Nika variety grown in a closed box for 15 days under aggregation with an intensive 16-h photocycle (440 µmol m⁻²/s). The plants were inoculated with the endomycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. A solution of fulvic acids (100 mg/L) served as a stabilizing organic additive and was introduced into the coconut substrate. The physical treatment included weak static electromagnetic field with magnetic induction (20 mT). The elemental analysis was performed by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry on an ICPE-9000 device (Shimadzu, Japan).

According to the calculated indices of the microelement biocomposition, the best result belonged to the sample treated with fulvic acids and weak electromagnetic field ($IndBcom_L = 0.27$). The resulting biomass of dry powder for elemental analysis was 10.2 g, which was twice as high as the values obtained in the control sample, not subjected to any external influences (5.2 g). All the variants with mycorrhization produced no positive effect on the total pool of microelements during vegetation. The increase in biomass averaged as low as 20%. Zinc increased by 33.3% while aluminum and iron decreased by 59.5 and 18.0%, respectively.

The neural network analysis of the microelements in mustard microgreens proved effective as a mathematical model for biochemical diagnostics of biomass quality. The method could be used to optimize the biotechnological process for other indoor crops as it makes it possible to partially substitute mineral fertilizers with organic and bacterial complex.

Keywords. Microgreen, mustard, *Brassica juncea* L., microelements, biotic factors, abiotic factors, light culture, fulvic acids, magnetic irradiation, mycorrhiza

Funding. The research was part of state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki)^{ROR}, research topics FGUS 2022-0017 and FGUS 2022-0018.

For citation: Puhalsky YaV, Vorobyov NI, Loskutov SI, Chukaeva MA, Glushakov RI, Babyka AV, *et al.* Effect of External Factors on Trace Element Profile and Biomass of Mustard (*Brassica juncea* L.) Microgreens: Neural Network Analysis. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):48–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2487>

Введение

В связи с высоким риском глобального неблагоприятного изменения климата, наряду с эрозией почв и растущим спросом на отечественное производство органических продуктов питания, сегодня наблюдается тенденция к созданию внутри городских агломераций хозяйств защищенного грунта (теплиц и вертикальных ферм). Преимущества закрытого хозяйства заключаются в отсутствии зависимости от наличия пахотных угодий и внешних климатических факторов, уменьшении углеродного следа, связанного с транспортировкой продуктов питания из отдаленных регионов, и снижении их конечной себестоимости за счет сокращения логистических издержек. Близость к конечному потребителю позволит круглогодично выращивать молодую рассаду (микрозелень) для быстрой поставки в специализированные магазины и снижать риски развития авитаминоза у жителей северных городов.

Выращивание микрозелени – новое и быстро развивающееся направление в современном бизнесе. Данное направление представляет собой получение на продажу молодой зеленой рассады различных видов овощных, пряно-ароматических, злаковых и бобовых культур, а также дикорастущих трав [1–5]. Благодаря простоте выращивания первым обратил внимание на микрозелень пищевой сектор. Она стала активно использоваться в индустрии правильного питания. С начала 1980-х годов шеф-повара элитных ресторанов в г. Сан-Франциско стали применять ее в кулинарии при создании диетических вегетарианских блюд, а к середине 1990-х микрозелень использовалась по всей Южной Калифорнии [6]. Первые упоминания практического проращивания семян известны еще со времен Древнего Египта [7]. В 2019 г. основным поставщиком на рынки микрозелени являлись США, за ними следовали Канада и Мексика. В США рынок микрозелени сильно фрагментирован. Такие крупные игроки, как Fambox Green LLC, Metro Microgreens, Fresh Origins, Florida microgreens, The Chefs Garden Inc. и Aerofarms LLC намерены продолжать инвестировать в данный функциональный продукт. Ожидается, что к 2027 г. рынок микрозелени в мире будет расти в среднем на 7,5 % в год, а в США на 10,1 %. По мнению маркетологов, из модного тренда в пространстве вегетарианцев микрозелень перейдет на более обширную целевую аудиторию.

Сегодня микрозеленю заинтересовались исследователи из области медицины и здравоохранения. Связано это с пандемией COVID-19, которая изменила представление многих людей о своих потребительских привычках, и переходом на изоляционный и малоподвижный образ жизни [8–10]. По данным исследований 2010 г., опубликованных Колледжом сельского хозяйства и природных ресурсов Университета Мэриленда (AGNR), а также Министерствами сельского хозяйства (USDA) и здравоохранения и социальных служб США (DHHS), разные виды микрозелени от 10 до 50 раз более

питательны своих зрелых аналогов [11]. Из-за богатого фитонутриентами состава это делает ее эффективным витаминно-минеральным комплексом в профилактике развития неинфекционных заболеваний. В условиях эпидемиологической обстановки она служит первым барьером в развитии вирусов. Особенно актуально это для лиц пожилого возраста, испытывающих нехватку питательных элементов [12, 13].

Для успешной интеграции микрозелени в глобальный производственный цикл необходимо оптимизировать систему ее выращивания в условиях закрытого грунта. Решающую роль играет сокращение сроков получения зеленой биомассы без ущерба в нужных объемах и нужной питательной ценности. Для повышения конкурентоспособности необходимо искать методы по снижению ее себестоимости и увеличению экологичности. Именно экологичность стала предметом современных исследований. Ученые в своих работах проводят эксперименты по выращиванию микрозелени с использованием вертикального типа земледелия. В качестве технологии для культивирования молодой рассады практикуют методы гидропоники с использованием жидких или твердых нейтральных субстратов [14–16]. Благодаря полному отказу от лимитирующего влияния почв это позволяет точнее проводить оценку степени минерализации и кислотности питательной подложки. Также в данных условиях снижается риск контаминации питательной среды и молодых побегов микотоксинами. Поскольку производственный цикл получения микрозелени короткий и составляет в среднем примерно 15 дней, согласно санитарно-микробиологическому контролю, то она не сильно подвергается атаке вредителей и патогенов в сравнении со взрослыми растениями. Однако при несоблюдении асептических мер гигиены рабочего места во время постановки опыта и дальнейшего ухода за ним полностью исключить возможность заражения рассады нельзя. На примере микрозелени семейства Крестоцветных (*Brassicaceae*) можно проследить, что при плотном посеве семян и отсутствии поверхностной обработки возможно появление корневой гнили, которое вызвано развитием грибной микрофлоры рода *Pythium* [17]. Источник загрязнения сначала возникает в семенах, а затем распространяется на ростки. В исследовании Z. Xiao и др. было показано, что выживаемость и пролиферация бактериальных клеток *Escherichia coli* была выше в системе гидропонного производства в сравнении с системой замещения почвы [18]. При параллельном добавлении в питательную среду минеральных удобрений обработка рассады фунгицидами может отрицательно сказаться на получении органической продукции. Нужно закупать семена, которые прошли санитарную обработку, или самим проводить их предварительную стерилизацию. Традиционно используют обработку 2 % раствором гипохлорита натрия/кальция, хотя возможны комбинированные варианты дезинфекции [19].

Для минимизации или полного отказа от добавления в среду микрозелени химических веществ с целью устранения накопления в ней нитратов ведется поиск среди природных органических источников питания. В качестве альтернативной замены можно использовать биологически активные добавки в виде солей гумусовых кислот, которые активируют прорастание семян при их замачивании в разведенном растворе (гидропраймирование). Из-за наличия в их составе низкомолекулярных соединений и групп ионов, организованных для создания хелатных комплексов, гумусовые кислоты будут способствовать лучшему усвоению рассадой эссенциальных микроэлементов даже при росте на бедных субстратах. Кроме того, в составе данных веществ присутствует фракция фульвокислот, которая имеет высокую общую кислотность, адсорбционные и катионообменные способности, а также высокое число карбоксильных групп в сравнении с фракцией гуминовых кислот. За счет меньших молекулярных размеров и атомной массы (всего несколько сотен Дальтон в сравнении с несколькими тысячами у гуминовых кислот) она способна свободно проникать сквозь микропоры биологических клеточных мембран (плазмолеммы) и передавать растению сигналы без вторичных посредников [20]. Фульвокислоты могут выступать в роли природных хелаторов в мобилизации и транспорте железа и других микроэлементов в растениях [21, 22]. Также фракция обладает биофункциональными свойствами [23, 24].

При выращивании микрозелени для инокуляции семян необходимо вести отбор среди ассоциативных штаммов ризобактерий, которые обладают антифунгальной активностью, и грибов арбускулярной микоризы. При обработке семян ими (биопраймирование) или добавлении в питательную среду в виде суспензий они будут способствовать росту растений и толерантности к стрессам за счет регуляции водного обмена и лучшего поступления биофильных микроэлементов [25, 26]. Данные микроорганизмы могут применяться как по отдельности, так и в комбинациях, проявляя синергетические и/или аддитивные эффекты. Если влияние включения в субстрат ризобактерий изучено, то о метаболических путях, на которые влияют экокхимические взаимодействия грибов и растений, пока известно не так много [27, 28]. При создании стабильных форм коммерческих биопрепаратов на основе данных штаммов соли гумусовых кислот могут использоваться как стабилизирующие питательные добавки в качестве дополнительного источника углерода. В микробном консорциуме они будут использоваться более эффективно, чем чистыми культурами.

Помимо биологического воздействия, на растения можно влиять физически: обработка проростков электромагнитными полями радиочастотного и светового диапазонов [29–33].

В исследованиях среди группы овощной микрозелени используют растения, которые принадлежат

к семействам *Brassicaceae*, *Apiaceae*, *Fabaceae* и *Amaranthaceae* [34–36]. Наиболее широким спросом пользуются таксоны горчица сарептской (*Brassica juncea* L.) и мангольда (*Beta vulgaris* L.). Оба вида являются многопрофильными культурами, которые можно эффективно использовать в стратегиях фиторемедиации почв, а также как пищевые приправы и биоактивные добавки в медицине при лечении хронических заболеваний. Среди других изученных видов овощей горчица характеризовалась наивысшим содержанием аскорбиновой кислоты и сахаров [37]. Также культура богата витаминами Е и Р, макро- (К, Са, Mg) и микроэлементами (Fe, Zn, Mn и др.) [38]. Изучение структурной когерентности последних как олигонутриентов, связанных с витаминами, целесообразно, поскольку они участвуют в регуляции иммунной системы растений, помимо влияния на органолептические свойства. Многие болезни людей и животных, которые ранее считались неизлечимыми, теперь можно лечить, уравнивая баланс биогенных биоэлементов в живом организме.

Цель исследования – оценка изменения в микроэлементном профиле микрозелени горчицы, выращенной в искусственной среде под воздействием различных абиотических и биотических элиситоров.

Объекты и методы исследования

В качестве растительного объекта использовали сорт горчицы сарептской Ника. Семена перед посадкой стерилизовали 2,0 % раствором гипохлорита натрия и регидратировали в темноте при температуре 21 ± 1 °С. Проросшие семена высевали в лотки из пищевого пластика (18×14×3 см), заполненные почвогрунтом в виде кокосового волокна (табл. 1), и выращивали в течение трех повторных циклов по 15 дней в контролируемых условиях закрытого металлического гроубокса (80×50×80 см) до полного развития семядолей с парой настоящих листьев. На лоток уходило по 6 г семян.

Параметры внутренней рабочей зоны гроубокса: температура воздуха 23 ± 1 °С, относительная влажность 65 ± 5 %, концентрация углекислоты на уровне значений 800–1000 ppm (рис. 1). Сконструированный гроубокс состоит из (1) драйвера фитосветильника, (2) сенсорного блока управления с таймером, (3) вентилятора (кулера) для верхнего охлаждения фитосветильника, (4) оргстекла для установки блока питания и драйвера с прорезью под кулер, (5) фитосветильника с диммером, (6) бокового кулера для пассивного притока воздуха в рабочую зону, (7) защитного съемного оргстекла с ручками и (8) выдвижного отсека с ручкой для хранения.

Для создания полной светокультуры использовали линейный фитосветильник LEDforPlant (Россия) (54×50×2 см), который состоит из 8 запараллелленных в ряд светодиодных бустеров мощностью по 15 Вт каждый. Итоговая характеристика света от лампы

Таблица 1. Физико-химическая характеристика кокосового субстрата, используемого для выращивания микрозелени горчицы в контролируемой среде

Table 1. Physical and chemical profile of coconut substrate used for growing mustard microgreens in controlled environment

Физико-химические параметры	Значения
Плотность, кг/м ³	115,0
Водоудерживающая способность, %	64,0
Электропроводность, мСм/см	880,0
Кислотность, град	5,50
Степень минерализации волокна, ppm	400,0
Элементы, г/кг сухого вещества	
NO ₃	2,65
NH ₄	1,72
P	1,72
K	80,40
Ca	16,66
Mg	5,73
S	1,10
Na	19,81
Cl	77,50

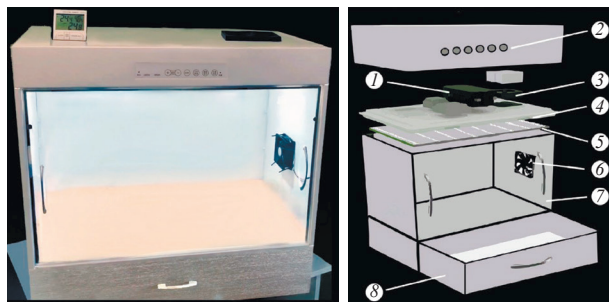


Рисунок 1. Внешний вид закрытого грубокса, используемого в работе

Figure 1. Closed grow box for indoor cultivation of microgreens

на высоте подвеса 50 см была следующая: PPF (ФАР) – 440 мкмоль/м²·с; световой поток – 31 800 Лм; эффективность – 2,4 PPF/Вт или 159,0 Лм/Вт; цветовая температура – 3000 К. Фотопериод составил 16 ч. Степень инсоляции, время суточного освещения и искусственный тип источника света были подобраны исходя из работ [39–45]. В данных работах лучшие результаты роста, антиоксидантной активности и содержания каротиноидов и токоферолов в микрозелени *Brassica* были достигнуты при облучении светодиодными лампами с интенсивностью 330 и 440 мкмоль/м²·с. Что касается спектрального эффекта, то для сбалансированного урожая микрозелени с высоким содержанием фитонутриентов лучшей комбинацией светодиодов считается следующее процентное соотношение (RGB): красный – 75, зеленый – 7,5, синий – 17,5 % [46–48]. Однако эти данные требуют дальнейших исследова-

Таблица 2. Биохимический профиль фульвокислот препарата Донум

Table 2. Biochemical profile of fulvic acids in Donum (Pharmorganic, Russia)

Органические кислоты, мг/л		Аминокислоты, мкг/л		Элементы, мг/кг	
Фумаровая	0	Метионин	0,60	Al	1,80
Уксусная	31,40	Валин	3,14	Ca	13,90
Щавелевая	0	Гистидин	0,50	K	4,50
Винная	0	Глицин	1,00	Mg	5,50
Лимонная	0	Глутаминовая кислота	4,82	Na	6,20
Янтарная	0,20	Серин	18,54	Sr	н/о
Галловая	0	Лейцин	0,52	Mn	0,40
Яблочная	0	Изолейцин	0,10	P	1,97
Адипиновая	0	Аспарагин	0,27	Si	0,50
		Аланин	1,00	B	4,70
		Триптофан	0,01	Ba	0,20
		Треонин	0,44	Cu	0,10
		Лизин	0,16	Ba	0,10
		Аргинин	10,00	Fe	7,80
		Тирозин	0	Co	0,07
		Пролин	0,10	Mo	0,01
		Цистеин	0,01	Ti	0,13
		Фенилаланин	0,01	Ni	н/о

н/о – не обнаружено.

н/о – not detected.

ний для выявления взаимодействий между другими типами спектров, характерных для роста сельскохозяйственных культур, и их связи с другими факторами окружающей среды [49].

В качестве органической добавки в виде разбавленного концентрата фульвокислот (100 мг/л) при поливе под корень использовали коммерческий препарат Донум (ООО «Фарморганик», Россия). Композиционный состав элементного пула и низкомолекулярных органических соединений рабочей жидкости приведен в таблице 2. Биохимический анализ препарата проводили при помощи масс-спектрометрии высокого разрешения (ICP-MS) и жидкостной хроматографии (HPLC) с использованием приборов AT 7500 (Agilent Technologies, США) и ACQUITY (Waters, США) согласно методикам производителей.

Для инокуляции растений использовали эндомикоризный гриб *Glomus mosseae*, полученный из свежеприготовленной смеси стерилизованной дерно-подзолистой почвы и корней микоризированной суданской травы (*Sorghum × drummondii*). Норма внесения составила 50 г смеси на 300 г влажного субстрата в лотке. Покрытосеменные однолетники-эксплеренты из семейства *Brassicaceae* относят к немикотрофным культурам за счет их вторичных метаболитов, которые

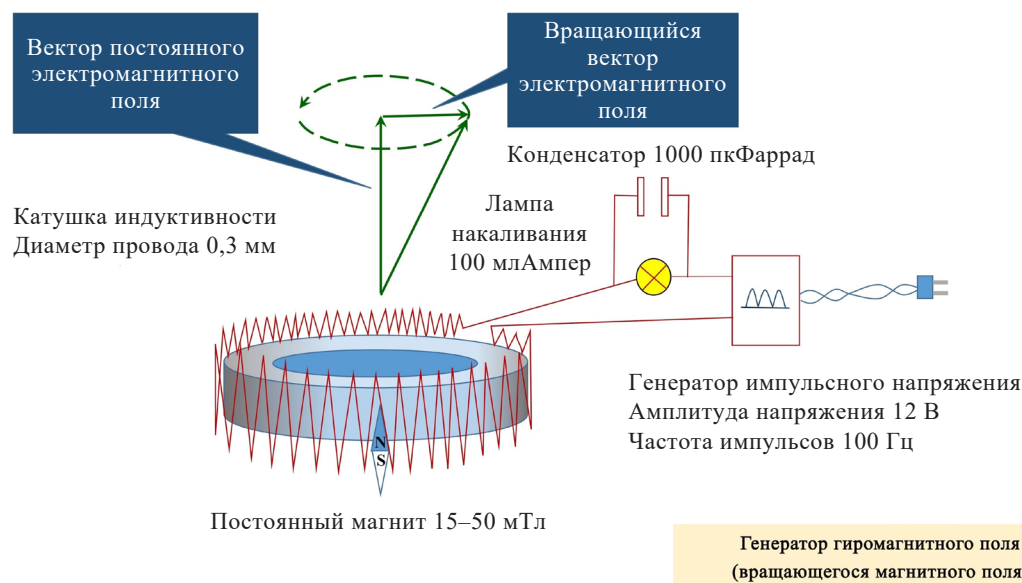


Рисунок 2. Фактор внешнего воздействия на микрозелень горчицы слабого электромагнитного излучения

Figure 2. External impact of weak electromagnetic radiation on mustard microgreens

подавляют развитие мицелия. Однако есть сведения о микоризообразовании у диких видов [50]. Данный штамм, наравне с *Gigaspora margarita*, *Scutellospora nigra* и *Glomus macrocarpum*, способен положительно влиять на растение-хозяина *Brassica juncea* L. путем улучшения его режима питания и набора биомассы [51].

Физическую обработку проводили путем ежесуточного нижнего облучения лотка с использованием устройства, действие которого основано на статическом воздействии слабого электромагнитного поля с преобладанием магнитной индукции (ФГБНУ ВНИИСХМ, Россия) (рис. 2).

Облучение проводилось каждый час в интервале с 8.00 часов утра до 24.00 часов вечера в течение 5 мин. Интенсивность облучения составила 20 мТл. На примере горчицы белой (*Sinapis alba* L.) показано, что использование магнитного поля напряженностью до 50 мТл давало лучшие результаты по улучшению всхожести семян и проростков [31]. Из российских источников литературы по теме изучения магнитобиологии можно привести монографию Ю. И. Новицкого [52]. Срок действия таких обработок мал, поэтому мы использовали систематическое облучение в течение всего фотопериода.

Общая схема эксперимента:

- К (контроль): растения горчицы выращивались без добавления в почву фульвокислот, инокуляции растений микоризой *Rhizophagus irregularis* и облучения растений низкочастотным электромагнитным полем;
- вариант E1: растения горчицы выращивались с добавлением в почву фульвокислот, но без инокуляции растений микоризой *G. mosseae* и облучения растений низкочастотным электромагнитным полем;

- вариант E2: растения горчицы выращивались при облучении растений низкочастотным электромагнитным полем, но без инокуляции растений микоризой *G. mosseae* и добавления в почву фульвокислот;
- вариант E3: растения горчицы выращивались с микоризой *G. mosseae*, но без добавления в почву фульвокислот и облучения растений низкочастотным электромагнитным полем;
- вариант E4: растения горчицы выращивались с добавлением в почву фульвокислот и при облучении растений низкочастотным электромагнитным полем, но без инокуляции растений микоризой *G. mosseae*;
- вариант E5: растения горчицы выращивались с микоризой *G. mosseae* и при облучении растений низкочастотным электромагнитным полем, но без добавления в почву фульвокислот;
- вариант E6: растения горчицы выращивались с микоризой *G. mosseae* и с добавлением в почву фульвокислот, но без облучения растений низкочастотным электромагнитным полем;
- вариант E7: растения горчицы выращивались с микоризой *G. mosseae*, с добавлением в почву фульвокислот и при облучении растений низкочастотным электромагнитным полем.

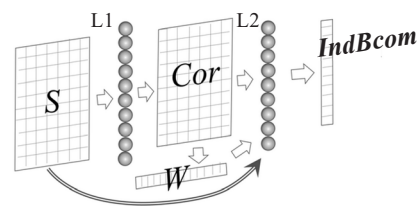
Полученную зеленую биомассу микрозелени срезали и быстро замораживали в камере MDF-C8V1 (Sanyo, Япония) с последующей сублимационной сушкой в леофильной установке 10ND (Scientz, Китай) под вакуумом. Полученный гидрофильный гомогенат измельчали до состояния порошка в фарфоровых ступках, взвешивали и проводили мокрое озоление с использованием концентрированной азотной кислоты в системе разложения проб Digiblock ED36S

(LabTech, Италия) в течение 4 ч при температуре 170 °С. Азотную кислоту предварительно очищали в системе очистки кислот subClean. Одновременно готовили холостой раствор с использованием тех же реактивов. Полученные после терморазложения суспензии сливали в мерные полиэтиленовые сосуды на 50 мл, доводили до метки 25 мл деионизированной водой и оставляли в течение суток для лучшего осаждения. На следующий день в верхнем отобранном супернатанте проводили элементный анализ методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). По каждому элементу строили градуировочную характеристику, где коэффициент корреляции в каждом случае составил $R \geq 0,998$. Стандартной пробой являлся многоэлементный раствор для ICP (Sigma-Aldrich (Merck), США).

Результаты и их обсуждение

Для оценки уровня корреляционных соотношений микроэлементов в полученной биомассе мы вычислили индекс их биоконпозиции – $IndBcom = 0-1$. Данные индексы рассчитывали с помощью оригинальной авторской программы для ЭВМ (Свидетельство № 2023611435), созданной на основе программного кода прикладной системы Excel 2016. В программе заложен нейросетевой анализ повторяющегося ряда триплетных единиц (фрактального ряда чисел), соотносящихся друг с другом по логарифмическому закону. Это позволяет делать прогнозы локальной конформации нутриентного профиля в полученной биомассе растений (рис. 3).

Вычисления в данной сети выполняются слева направо. Вначале слой нейронов L1 вычисляет кор-



S – матрица микроэлементных профилей растений для 8 вариантов опыта; Cor – матрица межвариантной корреляции микроэлементных профилей растений; W – вектор весовых коэффициентов для нейронного слоя L2; $IndBcom$ – вектор индексов биоконпозиции микроэлементных профилей растений; L1 и L2 – обозначения слоев нейронов, выполняющих матричные преобразования числовых данных

Рисунок 3. Корреляционная нейронная сеть, вычисляющая индексы биоконпозиции микроэлементных профилей растений горчицы

Figure 3. Correlation neural network used to calculate biocomposition indices of microelement profiles in mustard microgreens

реляционную матрицу Cor , которая заполняется значениями коэффициентов межвариантной корреляции микроэлементных профилей растений:

$$Cor_{n,k} = CoefficientCorrelation(S_{n,K}, S_{n,E1}, \dots, S_{n,E8}; S_{k,K}, S_{k,E1}, \dots, S_{k,E8}) \quad (1)$$

где S_{iL} и S_{kL} – содержание в микроэлементном профиле растений микроэлемента с порядковым номером ($i, k = 1, 2 \dots 9$; табл. 3) в варианте опыта с порядковым номером ($L = E1, E2 \dots E7$); $CoefficientCorrelation$ –

Таблица 3. Профили содержания микроэлементов в растениях микрозелени горчицы, ммоль/г растений, и ее биомасса по вариантам опыта

Table 3. Microelements in mustard microgreens, mmol/g vs. biomass in different samples

Микроэлементы		Варианты опыта							
		Контроль	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
$n, k = 1$	Fe	1,89	1,67	1,41	1,57	1,55	1,53	1,58	1,53
2	B	1,38	1,32	1,39	1,35	1,34	1,36	1,36	1,39
3	Zn	0,76	1,07	0,91	0,55	1,11	0,66	0,92	1,05
4	Mn	0,67	0,80	0,74	0,51	0,91	0,56	0,66	0,64
5	Al	1,37	0,59	0,36	0,60	0,60	0,53	0,65	0,54
6	Sr	0,16	0,19	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20
7	Cu	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02
8	Ba	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
9	Ni	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P_L		–0,62	–0,52	–0,58	–0,70	–0,49	–0,67	–0,61	–0,61
$IndBcom_L (\pm 0,010)^*$		0,22	0,26	0,24	0,20	0,27	0,21	0,23	0,23
Биомасса сухого порошка из растений ($\pm 0,03$), г		5,2	7,6	7,8	5,4	10,2	6,2	5,9	7,2

*Коэффициент корреляция индекса $IndBcom$ с биомассой растений $r = 0.83$.

*Correlation coefficient of the $IndBcom$ index with plant biomass $r = 0.83$.

функция, вычисляющая коэффициент корреляции между соответствующими массивами чисел.

Затем слой нейронов L2 вычисляет вектор весовых коэффициентов W , используя матрицу Cor :

$$W_k = \frac{1}{d} \times \left(\sum_n Cor_{n,k} - m \right) \quad (2)$$

где $m = \frac{1}{9} \sum_n \sum_k Cor_{n,k} = 2,3$;

$$d = \sqrt{\sum_k \left(\sum_n Cor_{n,k} - m \right)^2} = 5,51;$$

$n, k = 1, 2 \dots 9$ – порядковые номера микроэлементов в микроэлементных профилях растений горчицы.

Затем вектор весовых коэффициентов W используется в матричных вычислениях для определения индексов биокомпозиции $IndBcomL$ микроэлементных профилей растений:

$$IndBcom_L = [1 + \exp(2 \times P_L)]^{-1} \quad (3)$$

где $P = W \times S$ – вектор P , равный матричному произведению вектора весовых коэффициентов W на матрицу микроэлементных профилей S ; P_L – значение вектора P , соответствующее варианту опыта $L = K, E1, E2, \dots, E7$.

На основании результатов этих вычислений сделали заключение о том, что если значения $IndBcom$ стремятся к 0, то корреляционные связи в данных со-

отношениях микроэлементов отсутствуют или очень слабые, а при $IndBcom = 1$ эти связи достигают максимальных величин.

Результаты элементного анализа приведены в виде тепловой карты на рисунке 4. Среди всех вариантов (кроме E3 и E5) отмечено увеличение содержания цинка в среднем на 33,3 %. Больше всего его накапливалось в варианте E4 (на 46,0 %) в сравнении с контролем. Однолетние растения из семейства крестоцветных являются гипераккумуляторами цинка [53]. Цинк необходим им для активации двух ключевых ферментов углеводного обмена: фруктозо-1,6-дифосфатазы и альдолазы. Цинк связан с синтезом нуклеиновых кислот и белков, фотосинтетической ассимиляцией CO_2 и метаболизмом фитогормонов – ауксинов [54, 55]. Таким образом, активацию роста и увеличение биомассы растений можно связать с повышением его аккумуляции в семядольных побегах. Подобный результат был отмечен ранее у виргинильных форм горчицы, когда у растений проявлялся аддитивный эффект увеличения биомассы при высоком содержании цинка в биомассе на фоне низкой концентрации бора [56]. В нашем случае содержание бора оставалось неизменным. У варианта E4 отмечено увеличение концентрации Mn и Cu на 36,4 и 30,3 % соответственно. Кластерный анализ показал близость в распределении данного варианта с E2. Во всех вариантах опыта при сторонней обработке растений уменьшились концентрации алюминия (на 59,5 %) и железа (18,0 %)

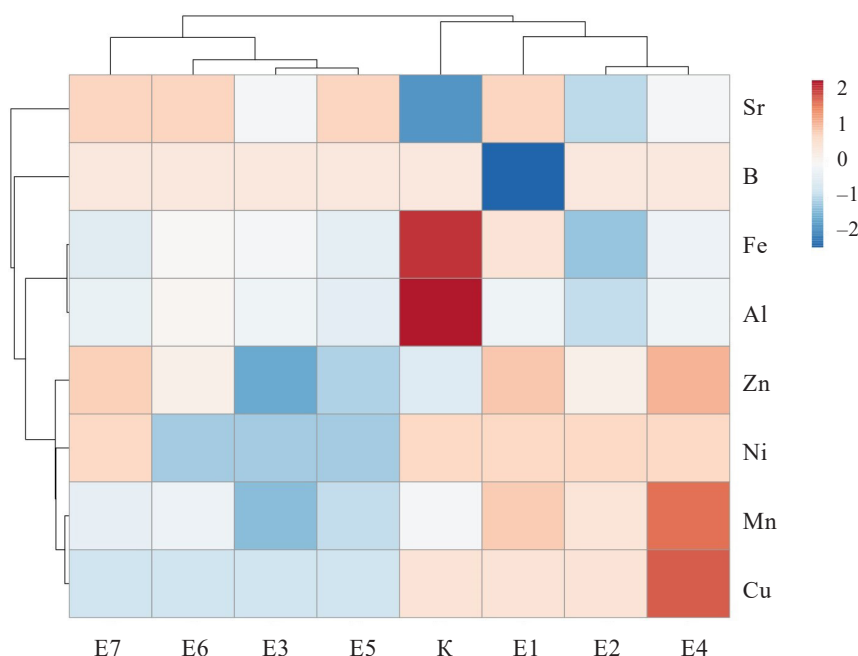


Рисунок 4. Профильное распределение биогенных микроэлементов в микрозелени горчицы по вариантам опыта (красный цвет – высокая концентрация каждого элемента, синий – низкая)

Figure 4. Profile distribution of biogenic microelements in mustard microgreens in different samples: red = high concentration; blue = low concentration

Таблица 4. Матрица межвариантной корреляции микроэлементных профилей растений горчицы по парам микроэлементов для вычисления весовых коэффициентов

Table 4. Intervariant correlation matrix of microelement profiles of mustard microgreens by microelement pairs: calculating weight coefficients

n \ k	k	Fe	B	Zn	Mn	Al	Sr	Cu	Ba	Ni
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe	1	1	–0,4500	–0,131	0	0,943	–0,395	0,296	0,366	0,699
B	2	–0,450	1	–0,022	–0,270	–0,202	–0,110	–0,351	–0,616	–0,018
Zn	3	–0,131	–0,0220	1	0,837	–0,219	0,352	0,603	0,581	0,234
Mn	4	0,000	–0,2700	0,837	1	–0,063	–0,021	0,910	0,842	0,417
Al	5	0,943	–0,2020	–0,219	–0,063	1	–0,543	0,274	0,237	0,760
Sr	6	–0,395	–0,1097	0,352	–0,021	–0,543	1	–0,342	–0,124	0,709
Cu	7	0,296	–0,3510	0,603	0,910	0,274	–0,342	1	0,922	0,659
Ba	8	0,366	–0,6157	0,581	0,842	0,237	–0,124	0,922	1	0,498
Ni	9	0,699	–0,0177	0,234	0,417	0,760	–0,709	0,659	0,498	1
W_k		0,005	–0,606	0,170	0,246	–0,020	–0,579	0,303	0,256	0,225

Для расчетов в нейронной сети все числовые единицы по микроэлементам были предварительно переведены из весовых значений в молярные величины (моляльные концентрации).

Рассчитанные индексы биокомпозиции $IndBcom_L$ микроэлементных профилей растений по вариантам опыта приведены в таблице 4. Также в таблице 4 приведен коэффициент корреляции индекса $IndBcom_L$ с биомассами растений горчицы. В варианте опыта E4 достигнуто наибольшее значение индекса $IndBcom_{E4} = 0,27$. В этом же варианте опыта растения за срок вегетации формируют наибольшую питательную биомассу. Алгебраическая сумма разности значений в вариантах опыта E2 и E3 с контролем: $(IndBcom_{E1} - IndBcom_K) + (IndBcom_{E2} - IndBcom_K) = (0,263 - 0,225) + (0,237 - 0,225) = 0,050$ приблизительно равна разности значений индексов в вариантах опыта E4 и K: $(IndBcom_{E4} - IndBcom_K) = (0,272 - 0,225) = 0,046$. На основании этого можно говорить о том, что два отдельных фактора (фульвокислоты и электромагнитное поле) позитивно влияют на растения горчицы независимо друг от друга. Варианты с использованием микоризы не оказали положительного действия на микрозелень на данном сроке вегетации.

Близость коэффициента корреляции индекса $IndBcom_L$ с биомассой растений горчицы к единице ($r = 0,83$) доказывает, что существует взаимосвязь между процессами в накоплении микроэлементов в растениях и скоростью их роста. Поэтому по возрастанию индекса $IndBcom$ можно диагностировать улучшение условий развития растений, которые способствуют достижению их высокого качества и большей биомассы.

Согласно статистическим расчетам все варианты не отличались от контроля ($p > 0,05$). Расчет вектора весовых коэффициентов W на основании межвариантной корреляционной взаимосвязи между профилями микроэлементов приведен в таблице 4.

Выводы

Рыночная стоимость микрозелени в 5–11 раз превышает затраты на ее производство. Поэтому данное производство является предприятием, способным поддерживать экономическую стабильность региона и накормить бедные слои населения. За счет разработки унифицированного технического регламента и совместного использования различных физических факторов и биоактивных добавок для ускорения сроков получения экологически чистой микрозелени можно будет решить глобальную проблему диверсификации продовольственного кризиса в мире и укрепления здоровья людей.

Примененный нами нейросетевой анализ соотношения микроэлементов в полученной микрозелени можно рассматривать как математическую модель для биохимической диагностики качества полученной биомассы и выбора лучших условий в биотехнологическом процессе возделывания растений в искусственной среде. На примере горчицы сарептской в структуре накопления микроэлементов лучший результат по расчетным индексам был диагностирован у варианта с совместной интродукцией в среду органо-минеральной композиции фульвокислот и облучением рассады низкочастотным электромагнитным полем. Именно в данном случае создавались благоприятные условия для ускоренного роста, развития растений и наполнения зелени микроэлементами.

Критерии авторства

Постановка исследования: Я. В. Пухальский и С. И. Лоскутов. Биоинформатика: Н. И. Воробьев и С. И. Лоскутов. Разработка методологии: Я. В. Пухальский, Н. И. Воробьев и А. В. Бабыка. Написание черновика рукописи: Я. В. Пухальский, Н. И. Воробьев и С. И. Лоскутов. Редактирование: М. А. Чукаева, Р. И. Глушаков, А. В. Бабыка и А. И. Якубовская. Визуализация: Я. В. Пухальский,

Н. И. Воробьев и Д. Д. Мещеряков. Администрирование проекта и анализ данных: М. А. Чукаева и Р. И. Глушаков.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

Ya.V. Pukhalsky and S.I. Loskutov designed the research. N.I. Vorobyov and S.I. Loskutov were responsible for the bioinformatics. Ya.V. Pukhalsky,

N.I. Vorobyov, and A.V. Babyka developed the methodology. Ya.V. Pukhalsky, N.I. Vorobyov, and S.I. Loskutov drafted the manuscript. M.A. Chukaeva, R.I. Glushakov, A.V. Babyka, and A.I. Yakubovskaya proofread the manuscript. Ya.V. Pukhalsky, N.I. Vorobyov, and D.D. Meshcheriakov performed the infographics. M.A. Chukaeva and R.I. Glushakov supervised the project and analyzed the data.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

References

1. Treadwell D, Hochmuth R, Landrum L, Laughlin W. Microgreens: A new specialty crop. EDIS. 2020;5.
2. Turner ER, Luo Y, Buchanan RL. Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: A review. Journal of Food Science. 2020;85(4):870–882. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15049>
3. Verlinden S. Microgreens: Definitions, product types, and production practices. In: Warrington I, editor. Horticultural reviews. John Wiley & Sons; 2019. pp. 85–124. <https://doi.org/10.1002/9781119625407.ch3>
4. Kyriacou MC, Roupheal Y, Di Gioia F, Kyrtatzis A, Serio F, Renna M, *et al.* Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. Trends in Food Science and Technology. 2016;57:103–115. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005>
5. Dhakshayani GM, Priya SJA. A comparative study of phytochemical, antioxidant, anticarcinogenic, and antidiabetic potential of coriander (*Coriandrum sativum* L.): Microgreen and mature plant. Foods and Raw Materials. 2022;10(2):283–294. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-539>
6. Mir SA, Shah MA, Mir MM. Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017;57(12):2730–2736. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1144557>
7. Abdallah MMF. Seed sprouts, a pharaoh's heritage to improve food quality. Arab Universities Journal of Agricultural Sciences. 2008;16(2):469–478.
8. Singh A, Banerjee P, Anas M, Singh N, Qamar I. Traditional nutritional and health practices targeting lifestyle behavioral changes in humans. Journal of Lifestyle Medicine. 2020;10:67–73. <https://doi.org/10.15280/jlm.2020.10.2.67>
9. VanWormer JJ, Boucher JL, Sidebottom AC, Sillah A, Knickelbine T. Lifestyle changes and prevention of metabolic syndrome in the Heart of New Ulm Project. Preventive Medicine Reports. 2017;6:242–245. <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2017.03.018>
10. Buscemi S, Sprini D, Grosso G, Galvano F, Nicolucci A, Lucisano G, *et al.* Impact of lifestyle on metabolic syndrome in apparently healthy people. Eating and Weight Disorders – Studies on Anorexia, Bulimia and Obesity. 2014;19:225–232. <https://doi.org/10.1007/s40519-014-0117-4>
11. Xiao Z, Lester GE, Luo Y, Wang Q. Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: Edible microgreens. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2012;60(31):7644–7651. <https://doi.org/10.1021/jf300459b>
12. Norman K, Haß U, Pirlich M. Malnutrition in older adults – Recent advances and remaining challenges. Nutrients. 2021;13(8). <https://doi.org/10.3390/nu13082764>
13. Ozawa H, Miyazawa T, Miyazawa T. Effects of dietary food components on cognitive functions in older adults. Nutrients. 2021;13(8). <https://doi.org/10.3390/nu13082804>
14. Hoang GM, Vu TT. Selection of suitable growing substrates and quality assessment of *Brassica* microgreens cultivated in greenhouse. Academia Journal of Biology. 2022;44(2):133–142. <https://doi.org/10.15625/2615-9023/16833>
15. Moraru PI, Rusu T, Mintas OS. Trial protocol for evaluating platforms for growing microgreens in hydroponic conditions. Foods. 2022;11(9). <https://doi.org/10.3390/foods11091327>
16. Mohanty A, Mahalik G, Parida S. Nutritional analysis of few edible microgreens in variable growth medium using XRF technique. Asian Journal of Biological and Life Sciences. 2021;9(3):360–364. <https://doi.org/10.5530/ajbls.2020.9.54>
17. McGehee CS, Raudales RE, Elmer WH, McAvoy RJ. Efficacy of biofungicides against root rot and damping-off of microgreens caused by *Pythium* spp. Crop Protection. 2019;121:96–102. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.12.007>
18. Xiao Z, Baughan G, Nichols-Russell L, Luo Y, Wang Q, Nou X. Proliferation of *Escherichia coli* O157:H7 in soil-substitute and hydroponic microgreen production systems. Journal of Food Protection. 2015;78(10):1785–1790. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-063>

19. Ding H, Fu T-J, Smith MA. Microbial contamination in sprouts: How effective is seed disinfection treatment? Journal of Food Science. 2013;78(4):R495–R501. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12064>
20. Calvo P, Nelson L, Kloepper JW. Agricultural uses of plant biostimulants. Plant and Soil. 2014;383:3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
21. Yang R, Li Z, Huang M, Luo N, Wen J, Zeng G. Characteristics of fulvic acid during coprecipitation and adsorption to iron oxides-copper aqueous system. Journal of Molecular Liquids. 2019;274:664–672. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.030>
22. Zanin L, Tomasi N, Cesco S, Varanini Z, Pinton R. Humic substances contribute to plant iron nutrition acting as chelators and biostimulants. Frontiers in Plant Science. 2019;10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00675>
23. Kamel SM, Afifi MMI, El-Shoraky FS, El-Sawy MM. Fulvic acid: A tool for controlling powdery and downy mildew in cucumber plants. International Journal of Phytopathology. 2014;3(2):101–104. <https://doi.org/10.33687/phytopath.003.02.0866>
24. Wu M, Song M, Liu M, Jiang C, Li Z. Fungicidal activities of soil humic/fulvic acids as related to their chemical structures in greenhouse vegetable fields with cultivation chronosequence. Scientific Reports. 2016;6. <https://doi.org/10.1038/srep32858>
25. Roupheal Y, Colla G. Synergistic biostimulatory action: Designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture. Frontiers in Plant Science. 2018;9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01655>
26. Bulgari R, Franzoni G, Ferrante A. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. Agronomy. 2019;9(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
27. Andini S, Dekker P, Gruppen H, Araya-Cloutier C, Vincken J-P. Modulation of glucosinolate composition in brassicaceae seeds by germination and fungal elicitation. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2019;67(46):12770–12779. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b05771>
28. Shalaby S, Horwitz BA. Plant phenolic compounds and oxidative stress: Integrated signals in fungal – plant interactions. Current Genetics. 2015;61:347–357. <https://doi.org/10.1007/s00294-014-0458-6>
29. Sangeetha N. Assessment of the effect of pulsating electromagnetic fields on biochemical and morphological parameters changes of *Brassica juncea* (mustard seeds). CIBTech Journal of Biotechnology. 2016;5(3):28–35.
30. Singh NN, Rai KK, Rai S. A short note on seed-borne magnetic effect on mustard, *Brassica juncea* L. crop. Electro- and Magnetobiology. 1998;17(1):99–102. <https://doi.org/10.3109/15368379809012891>
31. Feizi H, Salari A, Kaveh H, Firuzi Y. Investigation of static magnetic field durability treatment on seed and seedling features of mustard (*Sinapis alba* L.). Journal of Medicinal and Spice Plants. 2020;24(2):75–79.
32. Setiyono S, Dwiharjo D, Arum AP. Application of magnetic field in NFT hydroponic systems to growth and production of mustard. Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi. 2022;24(1):6–11. <https://doi.org/10.20961/agsjpa.v24i1.58217>
33. Alrifai O, Hao X, Marcone MF, Tsao R. Current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2019;67(22):6075–6090. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00819>
34. Sharma S, Shree B, Sharma D, Kumar S, Kumar V, Sharma R, et al. Vegetable microgreens: The gleam of next generation super foods, their genetic enhancement, health benefits and processing approaches. Food Research International. 2022;155.
35. Sanlier N, Guler SM. The benefits of *Brassica* vegetables on human health. Journal of Human Health Research. 2018;1(1).
36. Abellán Á, Domínguez-Perles R, Moreno DA, García-Viguera C. Sorting out the value of cruciferous sprouts as sources of bioactive compounds for nutrition and health. Nutrients. 2019;11(2). <https://doi.org/10.3390/nu11020429>
37. Marchioni I, Martinelli M, Ascrizzi R, Gabbrielli C, Flamini G, Pistelli L, et al. Small functional foods: Comparative phytochemical and nutritional analyses of five microgreens of the Brassicaceae family. Foods. 2021;10(2). <https://doi.org/10.3390/foods10020427>
38. de la Fuente B, López-García G, Mañez V, Alegría A, Barberá R, Cilla A. Evaluation of the bioaccessibility of antioxidant bioactive compounds and minerals of four genotypes of Brassicaceae microgreens. Foods. 2019;8(7). <https://doi.org/10.3390/foods8070250>
39. Brazaitytė A, Miliuskienė J, Vaštakaitė-Kairienė V, Sutulienė R, Laužikė K, Duchovskis P, et al. Effect of different ratios of blue and red LED light on Brassicaceae microgreens under a controlled environment. Plants. 2021;10(4). <https://doi.org/10.3390/plants10040801>
40. Brazaitytė A, Sakalauskiene S, Samuolienė G, Jankauskienė J, Viršilė A, Noviškova A, et al. The effects of LED illumination spectra and intensity on carotenoid content in Brassicaceae microgreens. Food Chemistry. 2015;173:600–606. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.077>
41. Craver JK, Gerovac JR, Lopez RG, Kopsell DA. Light intensity and light quality from sole-source light-emitting diodes impact phytochemical concentrations within *Brassica* microgreens. Journal of the American Society for Horticultural Science. 2017;142(1):3–12. <https://doi.org/10.21273/JASHS03830-16>

42. Gerovac JR, Craver JK, Boldt JK, Lopez RG. Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of *Brassica* microgreens. HortScience. 2016;51(5):497–503. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.5.497>
43. Kopsell DA, Pantanizopoulos NI, Sams CE, Kopsell DE. Shoot tissue pigment levels increase in “Florida Broadleaf” mustard (*Brassica juncea* L.) microgreens following high light treatment. Scientia Horticulturae. 2012;140:96–99. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.04.004>
44. Samuolienė G, Brazaityte A, Jankauskiene J, Viršile A, Sirtautas R, Noviškova A, et al. LED irradiance level affects growth and nutritional quality of *Brassica* microgreens. Central European Journal of Biology. 2013;8(12):1241–1249. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0246-1>
45. Samuolienė G, Brazaitytė A, Viršilė A, Miliauskienė J, Vaštakaitė-Kairienė V, Duchovskis P. Nutrient levels in *Brassicaceae* microgreens increase under tailored light-emitting diode spectra. Frontiers in Plant Science. 2019;10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01475>
46. Kamal KY, Khodaieaminjan M, El-Tantawy AA, Moneim DA, Salam AA, Ash-shormillesy SMA, et al. Evaluation of growth and nutritional value of *Brassica* microgreens grown under red, blue and green LEDs combinations. Physiologia Plantarum. 2020;169(4):625–638. <https://doi.org/10.1111/ppl.13083>
47. Jones-Baumgardt C, Llewellyn D, Ying Q, Zheng Y. Intensity of sole-source light-emitting diodes affects growth, yield, and quality of *Brassicaceae* microgreens. HortScience. 2019;54(7):1168–1174. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13788-18>
48. Ying Q, Kong Y, Jones-Baumgardt C, Zheng Y. Responses of yield and appearance quality of four *Brassicaceae* microgreens to varied blue light proportion in red and blue light-emitting diodes lighting. Scientia Horticulturae. 2020;259. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108857>
49. Paradiso R, Proietti S. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: the state of the art and the opportunities of modern LED systems. Journal of Plant Growth Regulation. 2021;41:742–780. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>
50. Vierheilig H, Bennett R, Kiddle G, Kaldorf M, Ludwig-Müller J. Differences in glucosinolate patterns and arbuscular mycorrhizal status of glucosinolate-containing species. New Phytologist. 2020;146(2):343–352. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00642.x>
51. Puttaradder J, Lakshman HC. Screening of efficient AM fungus for *Brassica juncea* (L.) Czern & Coss to improve biomass yield and seeds number. International Journal of Pure and Applied Bioscience. 2015;3(3):147–152.
52. Novitsky YuI, Novitskaya GV. Effect of static magnetic field on plants. Moscow: Nauka; 2016. 350 p. (In Russ.). [Новицкий Ю. И., Новицкая Г. В. Действие постоянного магнитного поля на растения. М.: Наука, 2016. 350 с.]
53. Peer WA, Mahmoudian M, Freeman JL, Lahner B, Richards EL, Reeves RD, et al. Assessment of plants from the *Brassicaceae* family as genetic models for the study of nickel and zinc hyperaccumulation. New Phytologist. 2006;172(2):248–260. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01820.x>
54. Tsonev T, Lidon FJC. Zinc in plants – An overview. Emirates Journal of Food and Agriculture. 2012;24(4):322–333.
55. Broadley MR, White PJ, Hammond JP, Zelko I, Lux A. Zinc in plants. New Phytologist. 2007;173(4):677–702. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
56. Sinha P, Jain R, Chatterjee C. Interactive effect of boron and zinc on growth and metabolism of mustard. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2000;31(1–2):41–49. <https://doi.org/10.1080/00103620009370419>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2488>
<https://elibrary.ru/LJEWUM>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Клональное микроразмножение лесных ягодных растений рода *Rubus*



С. С. Макаров^{1,2,*}, М. Т. Упадышев¹, Н. Р. Сунгурова²,
О. Н. Тюкавина², Е. И. Куликова³, И. Б. Кузнецова⁴

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева^{ROR}, Москва, Россия

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова^{ROR}, Архангельск, Россия

³ Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина^{ROR}, Вологда, Россия

⁴ Костромская государственная сельскохозяйственная академия^{ROR}, Караваево, Россия

Поступила в редакцию: 11.04.2023

Принята после рецензирования: 01.05.2023

Принята к публикации: 04.06.2023

*С. С. Макаров: makarov_serg44@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

М. Т. Упадышев: <https://orcid.org/0000-0003-1069-3771>

Н. Р. Сунгурова: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

О. Н. Тюкавина: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

И. Б. Кузнецова: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

© С. С. Макаров, М. Т. Упадышев, Н. Р. Сунгурова,
О. Н. Тюкавина, Е. И. Куликова, И. Б. Кузнецова, 2024



Аннотация.

Морошка приземистая и княженика арктическая – лесные ягодные растения рода *Rubus* семейства *Rosaceae*. Они обладают высокой пищевой и лекарственной ценностью, но в природе имеют низкую урожайность, а некоторые популяции находятся на грани исчезновения. Для получения большого количества оздоровленного посадочного материала этих растений целесообразно использовать экономически эффективные биотехнологические методы размножения. Необходимо совершенствовать технологии клонального микроразмножения морошки приземистой и княженики арктической для сортов и форм российского происхождения. Цель исследования – изучение влияния стерилизующих агентов на приживаемость эксплантов и концентрации регуляторов роста в составе питательной среды на органогенез растений *Rubus chamaemorus* L. и *Rubus arcticus* L. в культуре *in vitro*.

Объектами исследования являлись растения-регенеранты *R. chamaemorus* (формы Архангельская и Вологодская) и *R. arcticus* (сорта София и Галина). Провели биохимический анализ состава плодов. Изучили влияние стерилизующих агентов и времени экспозиции на жизнеспособность эксплантов, а также состава питательной среды и концентрации росторегулирующих веществ на образование микропобегов и корней *in vitro*.

Наибольшую приживаемость эксплантов *R. arcticus* и *R. chamaemorus* из латеральных почек (80–96 %) отметили после стерилизации растворами азотнокислого серебра 0,2 % и препарата Лизоформин 3000 5 % в течение 15 мин, из этиолированных побегов (79–100 %) – азотнокислого серебра 0,2 %, препаратов Ника-2 0,01 % и Лизоформин 3000 5 % в течение 10 мин. Наибольшую суммарную длину микропобегов (19,4–22,7 см) у *R. chamaemorus* выявили при добавлении в питательную среду МС цитодефа 0,1 мг/л, корней (46,0–56,6 см) – при добавлении индолилуксусной кислоты 0,5 мл/л. Максимальные значения суммарной длины микропобегов (22,4–22,8 см) и корней (86,6–89,3 см) у *R. arcticus* отметили при тех же концентрациях росторегулирующих веществ на среде МС 1/2.

Использование регуляторов роста цитодеф и индолилуксусной кислоты при клональном микроразмножении морошки приземистой и княженики арктической позволит получить большое количество высококачественного посадочного материала для плантационного выращивания.

Ключевые слова. *Rubus arcticus* L., *Rubus chamaemorus* L., ягоды, растения, клональное микроразмножение, *in vitro*, биохимический состав, стерилизация, органогенез

Финансирование. Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075-15-2023-220 от 16.02.2023).

Для цитирования: Клональное микроразмножение лесных ягодных растений рода *Rubus* / С. С. Макаров [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 60–70. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2488>

Clonal Micropropagation of Wild Berry Plants of the Genus *Rubus*

Sergey S. Makarov^{1,2,*} , Mikhail T. Upadyshev¹ ,
Natalia R. Sungurova² , Olga N. Tyukavina² ,
Elena I. Kulikova³, Irina B. Kuznetsova⁴ 

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy , Moscow, Russia

² M.V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University , Arkhangelsk, Russia

³ N.V. Vereshchagin Vologda State Dairy Farming Academy , Vologda, Russia

⁴ Kostroma State Agricultural Academy , Karavaevo, Russia

Received: 11.04.2023
Revised: 01.05.2023
Accepted: 04.06.2023

*Sergey S. Makarov: makarov_serg44@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Mikhail T. Upadyshev: <https://orcid.org/0000-0003-1069-3771>

Natalia R. Sungurova: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Olga N. Tyukavina: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Irina B. Kuznetsova: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

© S.S. Makarov, M.T. Upadyshev, N.R. Sungurova, O.N. Tyukavina,
E.I. Kulikova, I.B. Kuznetsova, 2024



Abstract.

Cloudberry (*Rubus chamaemorus* L.) and arctic raspberry (*Rubus arcticus* L.) are highly nutritional and medicinal but low-yield berries, with some populations being on the verge of extinction. Micropropagation biotechnologies are cost-effective and may provide healthy and plentiful planting material for these valuable berries. Clonal micropropagation of cloudberry and arctic raspberry requires new methods adapted for Russian varieties. This research featured the effect of sterilizing agents on the survival rate of explants of *R. chamaemorus* and *R. arcticus*, as well as the effect of growth regulators in the nutrient medium on their organogenesis *in vitro*.

Berries obtained from regenerant plants of *R. chamaemorus* (Arkhangelsk and Vologda varieties) and *R. arcticus* (Sofia and Galina varieties) underwent a biochemical analysis. Further research involved the effect of sterilizing agents and exposure time on the viability of explants, as well as the effect of the nutrient medium composition and the concentration of growth regulators on the development of microshoots and roots *in vitro*.

In case of lateral buds, the highest survival rate of both types of explants (80–96%) belonged to the samples sterilized with 0.2% silver nitrate and 5% Lysoformin 3000 for 15 min. In case of etiolated shoots (79–100%), it was the samples treated with 0.2% silver nitrate, 0.01% Nika 2, and 5% Lysoformin 3000 for 10 min. The maximal total length of microshoots in *R. chamaemorus* (19.4–22.7 cm) was registered at 0.1 mg/L Cytodef in the Murashige and Skoog medium. The maximal total length of roots (46.0–56.6 cm) was obtained when the medium contained 0.5 mL/L indolylacetic acid. As for *R. arcticus*, the maximal total lengths of microshoots (22.4–22.8 cm) and roots (86.6–89.3 cm) occurred at the same concentrations of growth regulators on 1/2 Murashige and Skoog medium.

In this research, Cytodef and indolylacetic acid applied in the process of clonal micropropagation of *R. chamaemorus* and *R. arcticus* made it possible to increase the yield of high-quality planting material for commercial plantations.

Keywords. *Rubus arcticus* L., *Rubus chamaemorus* L., berries, plants, clonal micropropagation, *in vitro*, biochemical composition, sterilization, organogenesis

Funding. The research was part of the University Development Program, Strategic Academic Leadership Program Priority-2030 (Agreement No. 075-15-2023-220 dated 02/16/2023).

For citation: Makarov SS, Upadyshev MT, Sungurova NR, Tyukavina ON, Kulikova EI, Kuznetsova IB. Clonal Micropropagation of Wild Berry Plants of the Genus *Rubus*. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):60–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2488>

Введение

В природных условиях таежной зоны европейской части России широко представлены такие лесные ягодные растения рода *Rubus* семейства *Rosaceae*, как малина

обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), костяника каменистая (*Rubus saxatilis* L.) и ежевика сизая (*Rubus caesius* L.). Данные ягодные растения активно культивируются в виде гибридных сортов. Реже встречаются морошка

приземистая (*Rubus chamaemorus* L.) и княженика арктическая (*Rubus arcticus* L.), которые обладают высокой пищевой и лекарственной ценностью. Однако эти ягоды в природе имеют низкую урожайность, а их запасы сокращаются из-за природно-климатических изменений и неконтролируемого антропогенного воздействия. Некоторые популяции находятся на грани исчезновения [1, 2].

Морошка приземистая (*R. chamaemorus*) – многолетнее травянистое двудомное растение с однолетними надземными простыми прямостоячими побегами высотой 5–30 см и длинным корневищем (до 10 м), живущим до 10 лет. Стебель прямостоячий, высота 2–20 см. Листья с прилистниками, простые, черешковые, складчатые, округло-почковидные. *R. chamaemorus* – гипоарктический вид, широко распространенный в Евразии и Северной Америке. В России морошка встречается в широтном протяжении по всей территории – от Карелии и Калининградской области до Тихоокеанского побережья. Северная граница ареала находится на архипелаге Северная Земля, а южная проходит через Смоленскую, Московскую, Ярославскую, Ивановскую и Нижегородскую области. Морошка произрастает на верховых болотах и заболоченных участках (рН торфа – 2,1–4,5) хвойных лесов [3–5].

Плод морошки – сборная костянка (многокостянка) округло-продолговатой формы массой 1–2 г (иногда встречаются ягоды весом до 5,5 г). В процессе созревания плод меняет цвет от ярко-красного и непрозрачного до янтарно-желтого и прозрачного. Ягоды морошки отличаются высоким содержанием антиоксидантов, содержат в среднем 13,6 % сухого вещества, 5,7 % сахаров (глюкоза и фруктоза), большое количество флавоноидов, фенольных соединений, аскорбиновой кислоты (до 150 мг/100 г), бензойной кислоты (около 50 мг/100 г), микро- и макроэлементов. В народной медицине плоды, листья и корни используются при лечении почечнокаменной болезни, нарушении обмена веществ, авитаминозе, туберкулезе и простуде. Плоды являются противогрибковым и потогонным средством. Настой листьев может использоваться как кровоостанавливающее средство при внутренних кровотечениях, мочегонное при болезнях мочевого пузыря и других урологических заболеваниях, а также как противовоспалительное, вяжущее и ранозаживляющее средство. Ягоды используют в пищу как в свежем виде, так и замораживают, сушат и замачивают для длительного хранения. Они применяются при приготовлении пирогов, пирожных, джемов, компотов, конфет, добавок к йогуртам и кондитерским изделиям и др. Листья в смеси с другими растениями используют для приготовления чаев и травяных сборов [5–9].

Княженика арктическая или поленика (*R. arcticus*) – многолетнее корневищное растение с длинными и глубоко ветвящимися (10–25 см параллельно земной поверхности) шнуровидными корнями. Надземные побеги образуются из вертикально направленных подзем-

ных побегов, которые формируются из находящихся на корнях почек и выходят на поверхность почвы. Функцию отсутствующих корневых волосков выполняет микориза. Подземные части растений княженики живут в течение многих лет, тогда как надземная часть ежегодно отмирает. Листья с прилистниками, тонкие, темно-зеленого цвета, тройчатые, морщинистые, на длинных черешках. Цветки имеют ярко-розово-алый оттенок. Является самобесплодным растением. *R. arcticus* – бореально-гипоарктический вид, встречающийся в холодной и умеренной зонах в северных широтах в странах Скандинавии, Северной Америки, Прибалтики и северных районах России. Произрастает в сфагновых, осоково-сфагновых и осоково-разнотравных лесах, в лесотундровых редколесьях и тундре, по заболоченным лесным опушкам, на болотах по кочкам, на сыроватых просеках, вырубках и гарях [2, 10, 11].

Плод княженики – сборная костянка со средней массой 1–2 г. Зрелые плоды имеют малиново-красноватый оттенок и вкус, напоминающий землянику и ананас. Плоды содержат до 7 % сахаров (фруктоза и глюкоза), 200 мг/100 г витамина С, органические кислоты, пектины, ароматические и дубильные вещества, полифенолы и антоцианы. В народной медицине настой из плодов княженики используется в качестве жаропонижающего и противогрибкового средства, при почечнокаменной болезни, подагре, гастрите, анемии, стоматите, бронхиальной астме и респираторных заболеваниях. Листья используют для заживления ран при ревматизме. Ягоды княженики подлежат как употреблению в пищу в свежем виде, так и сушке и заморозке. Используются для приготовления варенья, джемов, морсов, компотов, наливок и ликеров [10–12].

Помимо пищевого и фармацевтического использования, морошка и княженика находят применение в производстве косметики и декоративном садоводстве.

Зарубежный и отечественный опыт возделывания морошки и княженики на выработанных торфяных месторождениях свидетельствует о перспективах их выращивания для биологической рекультивации земель. Использование сортов способствует повышению крупноплодности, урожайности, зимостойкости и устойчивости к неблагоприятным факторам окружающей среды в сравнении с естественными популяциями. Однако при культивировании морошки обычно удается собирать 400–600 кг/га, а в урожайные годы до 3 т/га, тогда как сбор ягод княженики урожайных сортов может составлять от 800 до 1000 кг/га [2, 13–15]. В России растет спрос на ягодную продукцию этих видов среди потребителей, а некоторые сельскохозяйственные предприниматели начинают внедрять посадки с их участием на ягодных плантациях (Архангельская, Ярославская и Костромская области, Республика Карелия, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа, Хабаровский край). Традиционные способы размножения ягодных растений не позволяют получать

требуемое для выращивания на плантациях количество посадочного материала.

При промышленном культивировании лесных ягодных растений следует применять метод клонального микроразмножения, который позволяет ускоренно получать большое количество генетически однородного оздоровленного посадочного материала. Различными исследователями со всего мира проводились работы по микроклонированию *R. chamaemorus* и *R. arcticus* [16, 17]. Учеными применялись разные растворы для стерилизации эксплантов (этанол 70 %, гипохлорит 2 %), питательные среды (Мурасиге и Скуга, Дебната и Макрея, Кворина и Лепуавра) и регуляторы роста для образования микропобегов и корней (6-бензиламинопури, тидиазурон, кинетин, зеатин, индолилмасляная, индолилуксусная, нафтилуксусная, 2,4-дихлорфеноксиуксусная и гиббереллиновая кислоты). Однако требуется усовершенствование технологий с учетом генетических особенностей для форм и сортов российского происхождения.

Цель исследования – изучение влияния стерилизующих агентов и времени экспозиции на приживаемость эксплантов растений морошки приземистой и княженики арктической, а также концентрации росторегулирующих веществ в составе питательной среды на органогенез растений в культуре *in vitro*.

Объекты и методы исследования

Исследования по выращиванию растений в культуре *in vitro* проводили на базе Вологодской ГМХА имени Н. В. Верещагина и Северного (Арктического) федерального университет имени М. В. Ломоносова в 2018–2022 гг. в соответствии с общепринятыми методиками клонального микроразмножения [18–20]. Объектами исследования являлись растения *Rubus arcticus* L. (сорт София шведской селекции, сорт Галина российской селекции) и *Rubus chamaemorus* L. (формы Архангельская и Вологодская, отобранные в местах естественного произрастания). Предварительно определили биохимический состав ягод изучаемых растений по общепринятым методикам [21].

Перед введением в культуру *in vitro* экспланты, полученные из апикальных меристем растений, стерилизовали с помощью растворов гипохлорита натрия (5 %), пергидроля (10 %), сулемы (0,2 %), азотнокислого серебра (0,2 %) и дезинфицирующих средств Ника-2 (0,01 %) и Лизоформин 3000 (5 %) в течение 3, 5, 10 и 15 мин. Приживаемость эксплантов определяли как соотношение числа выживших к общему числу стерилизуемых. Культивирование растений проводили на питательной среде по прописи МС, в том числе в модификации МС 1/2, в условиях световой комнаты при освещении 3–5 тыс. лк и 16-часовом фотопериоде с поддержанием необходимых температуры (+23–25 °С) и влажности воздуха (75–80 %). На этапе пролиферации побегов в качестве регулятора роста группы цитокининов использовали цитодеф

в концентрациях 0,1 и 0,2 мг/л. На этапе индукции ризогенеза побегов (укоренение микропобегов *in vitro*) в качестве росторегулирующего вещества группы ауксинов использовали индолилуксусную кислоту в концентрациях 0,5 и 1,0 мг/л. Учитывали число и длину микропобегов и корней в расчете на одно растение. Повторность опытов 10-кратная, 15 пробирочных растений в каждой. Достоверность различий между данными вариантами оценивали с помощью наименьшей существенной разности для 5 %-го уровня значимости ($HC_{P_{05}}$) и двухфакторного дисперсионного анализа, где один из факторов влияния – состав питательной среды (ф. А), а другой – концентрация регулятора роста (ф. Б).

Результаты и их обсуждение

По результатам анализа биохимического состава плодов исследуемых растений *Rubus arcticus* L. и *Rubus chamaemorus* L. выявлено большое содержание в них таких элементов, как калий (17,9–20,1 мг/г), фосфор (3,4–3,8 мг/г), магний (3,0–3,4 мг/г), кальций (1,5–1,7 мг/г) и натрий (0,4–0,45 мг/г). Также ягоды содержат в меньшем количестве целый ряд других полезных элементов (магний, цинк, железо, медь, барий и др.) (табл. 1).

При стерилизации эксплантов из латеральных почек *R. arcticus* и *R. chamaemorus* наибольшую эффективность показали растворы азотнокислого серебра 0,2 % и средства Лизоформин 3000 5 % в течение 15 мин, где процент жизнеспособных эксплантов достигал

Таблица 1. Содержание подвижной формы химических элементов в абсолютно сухих образцах плодов лесных ягодных растений рода *Rubus*

Table 1. Active chemical elements in dried *Rubus* berries

Элементы	Содержание подвижной формы элементов, мг/г	
	<i>Rubus arcticus</i> L.	<i>Rubus chamaemorus</i> L.
Алюминий	6,9	6,2
Йод	0,30	0,28
Бор	27,60	24,63
Железо	26,8	24,0
Кадмий	0,20	0,18
Калий	20 069,1	17 919,0
Кальций	1743,6	1557,0
Кремний	9,6	8,6
Магний	3399,7	3035,0
Марганец	136,8	122,0
Медь	11,80	10,54
Натрий	449,9	402,0
Никель	2,70	2,37
Свинец	2,10	1,92
Стронций	6,2	5,5
Фосфор	3781,9	3377,0
Хром	2,60	2,34
Цинк	38,1	34,0

87–96 и 80–90 % соответственно. При использовании в течение 15 мин сулемы 0,2 % жизнеспособность эксплантов составила 62–68 %, препарата Ника-2 0,01 % – 60–70 %. При времени экспозиции 10 мин в вариантах с нитратом серебра 0,2 % экспланты оказались жизнеспособными (58–64 %), в других вариантах их жизнеспособность не превышала 60 %. При стерилизации эксплантов из этиолированных побегов наиболее высокая жизнеспособность у всех сортов и форм ягодных растений наблюдалась при экспозиции 10 мин в вариантах с использованием азотнокислого серебра 0,2 % (100 %) и дезинфицирующих средств Лизоформин 3000 5 % (96–98 %) и Ника-2 0,01 % (79–84 %). Жизнеспособность этого типа эксплантов при использовании в такой же экспозиции других исследуемых стерилизующих агентов (гипохлоритом натрия 5 %, пергидроль 10 %, сулема 0,2 %) не превышала 75 %. Количество жизнеспособных эксплантов *R. chamaemorus* и *R. arcticus* при обработке исследуемыми веществами в течение 3 и 5 мин было низким (не более 35 %) (табл. 2 и 3).

При клональном микроразмножении на этапе пролиферации большее число микропобегов *R. arcticus*

(в среднем у сорта София 6,4 шт., у сорта Галина 8,0 шт.) формировалось на питательной среде МС 1/2, тогда как на питательной среде МС оно было в 1,6–1,7 раза меньше (табл. 4). С повышением в питательной среде концентрации цитодефа от 0,1 до 0,2 мг/л число микропобегов растений княженики арктической сорта София *in vitro* увеличивалось в среднем в 1,2 раза, у сорта Галина в 1,3 раза.

Показатели средней длины микропобегов растений *R. arcticus* исследуемых сортов в культуре *in vitro*, в зависимости от питательной среды, не имели статистически значимых различий. Повышение в составе питательной среды концентрации цитодефа от 0,1 до 0,2 мг/л способствовало уменьшению средней длины микропобегов растений в 1,8–2,0 раза (табл. 5).

Суммарная длина микропобегов *R. arcticus* на питательной среде МС 1/2 достигала у сорта София в среднем 19,4 см, у сорта Галина 20,5 см, что больше (в 1,4–1,8 раза), чем на среде МС. При концентрации в питательной среде цитодефа 0,1 мг/л суммарная длина микропобегов *in vitro* у *R. arcticus* сортов София и Галина была в 1,4–1,5 раза больше, чем при концентрации 0,2 мг/л (табл. 6).

Таблица 2. Влияние стерилизующих агентов на жизнеспособность эксплантов, %, *Rubus arcticus* L. в культуре *in vitro*

Table 2. Effect of sterilizing agents on viability of explants, %, of *Rubus arcticus* L. *in vitro*

Сорт	Стерилизующий агент	Время экспозиции, мин			
		3	5	10	15
Экспланты из латеральных почек					
София	Гипохлорит натрия 5 %	6	24	32	64
	Пергидроль 10 %	8	13	23	41
	Сулема 0,2 %	4	12	40	68
	Азотнокислое серебро 0,2 %	1	9	58	94
	Ника-2 0,01 %	6	8	52	68
	Лизоформин 3000 5 %	7	12	45	86
Галина	Гипохлорит натрия 5 %	8	15	50	38
	Пергидроль 10 %	10	18	28	40
	Сулема 0,2 %	10	20	46	64
	Азотнокислое серебро 0,2 %	2	12	64	96
	Ника-2 0,01 %	1	24	56	66
	Лизоформин 3000 5 %	0	14	57	90
Этиолированные побеги					
София	Гипохлорит натрия 5 %	4	35	75	59
	Пергидроль 10 %	9	32	66	48
	Сулема 0,2 %	12	30	60	40
	Азотнокислое серебро 0,2 %	5	20	100	45
	Ника-2 0,01 %	6	25	82	54
	Лизоформин 3000 5 %	3	28	98	50
Галина	Гипохлорит натрия 5 %	8	30	56	54
	Пергидроль 10 %	5	18	58	62
	Сулема 0,2 %	9	16	42	32
	Азотнокислое серебро 0,2 %	5	18	100	74
	Ника-2 0,01 %	3	15	84	56
	Лизоформин 3000 5 %	4	22	97	67

При клональном микроразмножении *R. chamaemorus* на питательной среде МС у растений формировалось большое число микропобегов (в среднем у формы Архангельская 7,0 шт., у формы Вологодская 7,4 шт.). На среде МС 1/2 данный показатель

был в 1,2–1,4 раза меньше (табл. 7). При повышении в питательной среде концентрации цитодефа от 0,1 до 0,2 мг/л увеличивалось число микропобегов у растений *R. chamaemorus* формы Архангельская в среднем в 1,7 раза, у формы Вологодская в 1,3 раза.

Таблица 3. Влияние стерилизующих агентов на жизнеспособность эксплантов, %, *Rubus chamaemorus* L. в культуре *in vitro*

Table 3. Effect of sterilizing agents on viability of explants, %, of *Rubus chamaemorus* L. *in vitro*

Форма	Стерилизующий агент	Время экспозиции, мин			
		3	5	10	15
Экспланты из латеральных почек					
Архангельская	Гипохлорит натрия 5 %	8	20	30	60
	Пергидроль 10 %	6	12	20	38
	Сулема 0,2 %	2	10	37	66
	Азотнокислое серебро 0,2 %	3	8	59	90
	Ника-2 0,01 %	4	10	54	70
	Лизоформин 3000 5 %	3	11	47	82
Вологодская	Гипохлорит натрия 5 %	10	14	52	41
	Пергидроль 10 %	8	16	26	46
	Сулема 0,2 %	6	18	44	62
	Азотнокислое серебро 0,2 %	4	10	62	87
	Ника-2 0,01 %	2	21	52	60
	Лизоформин 3000 5 %	2	12	54	80
Этиолированные побеги					
Архангельская	Гипохлорит натрия 5 %	6	30	71	56
	Пергидроль 10 %	8	32	65	46
	Сулема 0,2 %	10	28	58	38
	Азотнокислое серебро 0,2 %	3	17	100	42
	Ника-2 0,01 %	4	24	80	50
	Лизоформин 3000 5 %	1	30	96	52
Вологодская	Гипохлорит натрия 5 %	7	25	60	60
	Пергидроль 10 %	4	16	56	58
	Сулема 0,2 %	8	18	44	34
	Азотнокислое серебро 0,2 %	3	14	100	78
	Ника-2 0,01 %	2	13	79	55
	Лизоформин 3000 5 %	2	20	96	63

Таблица 4. Число микропобегов, шт., растений *Rubus arcticus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации цитодефа

Table 4. Microshoots, pcs., of *Rubus arcticus* L. *in vitro* at different nutrient media and Cytodef concentrations

Состав питательной среды	Концентрация цитодефа, мг/л		Среднее
	0,1	0,2	
Сорт София			
МС	3,8	4,2	4,0
МС 1/2	5,6	7,1	6,4
Среднее	4,7	5,7	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,84, ф. Б = 0,96, общ. = 1,10			
Сорт Галина			
МС	4,1	5,5	4,8
МС 1/2	6,9	9,1	8,0
Среднее	5,5	7,3	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,80, ф. Б = 0,92, общ. = 1,07			

Таблица 5. Средняя длина микропобегов, см, растений *Rubus arcticus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации цитодефа

Table 5. Average length of microshoots, cm, of *Rubus arcticus* L. *in vitro* at different nutrient media and Cytodef concentrations

Состав питательной среды	Концентрация цитодефа, мг/л		Среднее
	0,1	0,2	
Сорт София			
МС	3,4	1,9	2,7
МС 1/2	4,0	2,3	3,2
Среднее	3,7	2,1	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,74, ф. Б = 0,80, общ. = 0,92			
Сорт Галина			
МС	4,2	1,8	3,0
МС 1/2	3,3	2,0	2,7
Среднее	3,8	1,9	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,81, ф. Б = 0,93, общ. = 0,99			

Таблица 6. Суммарная длина микропобегов, см, растений *Rubus arcticus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации цитодефа

Table 6. Total length of microshoots, cm, of *Rubus arcticus* L. *in vitro* at different nutrient media and Cytodef concentrations

Состав питательной среды	Концентрация цитодефа, мг/л		Среднее
	0,1	0,2	
Сорт София			
МС	13,0	8,0	10,5
МС 1/2	22,4	16,3	19,4
Среднее	17,7	12,2	–
НСР ₀₅ ф. А = 1,69, ф. Б = 1,83, общ. = 1,94			
Сорт Галина			
МС	17,2	9,9	14,6
МС 1/2	22,8	18,2	20,5
Среднее	20,0	14,1	–
НСР ₀₅ ф. А = 1,72, ф. Б = 1,90, общ. = 2,01			

Таблица 8. Средняя длина микропобегов, см, растений *Rubus chamaemorus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации цитодефа

Table 8. Average length of microshoots, cm, of *Rubus chamaemorus* L. *in vitro* at different nutrient media and Cytodef concentrations

Состав питательной среды	Концентрация цитодефа, мг/л		Среднее
	0,1	0,2	
Форма Архангельская			
МС	3,8	1,5	2,7
МС 1/2	2,6	1,9	2,3
Среднее	3,2	1,7	—
НСР ₀₅ ф. А = 0,65, ф. Б = 0,73, общ. = 0,82			
Форма Вологодская			
МС	3,6	1,5	2,6
МС 1/2	2,9	1,2	2,1
Среднее	3,3	1,4	—
НСР ₀₅ ф. А = 0,71, ф. Б = 0,80, общ. = 0,90			

Средняя длина микропобегов у исследуемых форм *R. chamaemorus* в культуре *in vitro* была больше на питательной среде МС (в среднем 2,6–2,7 см), а на среде МС 1/2 она была в 1,2 раза меньше. Повышение в питательной среде концентрации цитодефа от 0,1 до 0,2 мг/л способствовало уменьшению средней длины микропобегов *R. chamaemorus* формы Архангельская в 1,9 раза, Вологодской в 2,4 раза (табл. 8).

Суммарная длина микропобегов *R. chamaemorus* в культуре *in vitro* на питательной среде МС составила у формы Архангельская в среднем 16,4 см, у формы Вологодская 17,8 см. Это больше (в 1,5 раза), чем на среде МС 1/2. При концентрации в питательной

Таблица 7. Число микропобегов, шт., растений *Rubus chamaemorus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации цитодефа

Table 7. Microshoots, pcs., of *Rubus chamaemorus* L. *in vitro* at different nutrient media and Cytodef concentrations

Состав питательной среды	Концентрация цитодефа, мг/л		Среднее
	0,1	0,2	
Форма Архангельская			
МС	5,1	8,9	7,0
МС 1/2	4,0	6,3	5,2
Среднее	4,6	7,6	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,92, ф. Б = 1,00, общ. = 1,21			
Форма Вологодская			
МС	6,3	8,5	7,4
МС 1/2	5,4	7,1	6,3
Среднее	5,9	7,8	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,85, ф. Б = 0,96, общ. = 1,17			

Таблица 9. Суммарная длина микропобегов, см, растений *Rubus chamaemorus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации цитодефа

Table 9. Total length of microshoots, cm, of *Rubus chamaemorus* L. *in vitro* at different nutrient media and Cytodef concentrations

Состав питательной среды	Концентрация цитодефа, мг/л		Среднее
	0,1	0,2	
Форма Архангельская			
МС	19,4	13,4	16,4
МС 1/2	10,4	12,0	11,2
Среднее	14,9	12,7	—
НСР ₀₅ ф. А = 1,56, ф. Б = 1,65, общ. = 1,82			
Форма Вологодская			
МС	22,7	12,8	17,8
МС 1/2	15,7	8,5	12,1
Среднее	19,2	10,5	—
НСР ₀₅ ф. А = 1,33, ф. Б = 1,51, общ. = 1,73			

среде цитодефа 0,1 мг/л суммарная длина микропобегов *R. chamaemorus* у формы Архангельская была в 1,2 раза, а у формы Вологодская в 1,8 раза больше, чем при концентрации 0,2 мг/л (табл. 9).

В ходе исследований по клональному микроразмножению на этапе укоренения микропобегов *in vitro* установлено, что на питательной среде МС 1/2 число корней *R. arcticus* исследуемых сортов составило в среднем 11,1–11,8 шт., что в 1,6–1,7 раза больше, чем на среде МС. С повышением концентрации ауксина индолилуксусной кислоты от 0,5 до 1,0 мл/л число корней у *R. arcticus* сорта София увеличилось в среднем в 1,2 раза, тогда как у сорта Галина не изменилось (табл. 10).

Таблица 10. Число корней, шт., растений *Rubus arcticus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации индолилуксусной кислоты

Table 10. Microshoots, pcs., of *Rubus arcticus* L. *in vitro* at different nutrient media and indolylacetic acid concentrations

Состав питательной среды	Концентрация индолилуксусной кислоты, мл/л		Среднее
	0,5	1,0	
Сорт София			
МС	5,9	7,4	6,7
МС 1/2	10,3	11,9	11,1
Среднее	8,1	9,7	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,98, ф. Б = 0,74, общ. = 1,12			
Сорт Галина			
МС	6,8	8,1	7,5
МС 1/2	12,4	11,1	11,8
Среднее	9,6	9,6	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,95, ф. Б = 0,84, общ. = 1,09			

Таблица 12. Суммарная длина корней, см, растений *Rubus arcticus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации индолилуксусной кислоты

Table 12. Total length of microshoots, cm, of *Rubus arcticus* L. *in vitro* at different nutrient media and indolylacetic acid concentrations

Состав питательной среды	Концентрация индолилуксусной кислоты, мл/л		Среднее
	0,5	1,0	
Сорт София			
МС	34,8	30,3	32,6
МС 1/2	85,5	63,1	74,3
Среднее	60,2	46,7	–
НСР ₀₅ ф. А = 10,60, ф. Б = 8,90, общ. = 11,30			
Сорт Галина			
МС	36,0	31,6	33,8
МС 1/2	89,3	55,5	72,4
Среднее	62,7	43,6	–
НСР ₀₅ ф. А = 10,10, ф. Б = 8,10, общ. = 11,50			

Средняя длина корней растений *R. arcticus* в культуре *in vitro* на питательной среде МС 1/2 составила у исследуемых сортов в среднем 6,1–6,8 см, что в 1,3–1,4 раза больше, чем в варианте со средой МС. При увеличении концентрации ауксина индолилуксусной кислоты от 0,5 до 1,0 мл/л средняя длина корней у растений *R. arcticus* уменьшилась в среднем у сорта София в 1,5 раза, у сорта Галина в 1,4 раза (табл. 11).

Суммарная длина корней растений *R. arcticus* на питательной среде МС 1/2 достигла у сорта София в среднем 74,3 см, у сорта Галина 72,4 см. Это больше, чем в вариантах с МС, где она была в 2,1–2,3 раза меньше. Повышение концентрации в питательной среде

Таблица 11. Средняя длина корней, см, растений *Rubus arcticus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации индолилуксусной кислоты

Table 11. Average length of microshoots, cm, of *Rubus arcticus* L. *in vitro* at different nutrient media and indolylacetic acid concentrations

Состав питательной среды	Концентрация индолилуксусной кислоты, мл/л		Среднее
	0,5	1,0	
Сорт София			
МС	5,9	4,1	5,0
МС 1/2	8,3	5,3	6,8
Среднее	7,1	4,7	–
НСР ₀₅ ф. А = 1,10, ф. Б = 0,87, общ. = 1,23			
Сорт Галина			
МС	5,3	3,9	4,6
МС 1/2	7,2	5,0	6,1
Среднее	6,3	4,5	–
НСР ₀₅ ф. А = 0,99, ф. Б = 0,81, общ. = 1,17			

Таблица 13. Число корней, шт., растений *Rubus chamaemorus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации индолилуксусной кислоты

Table 13. Microshoots, pcs., of *Rubus chamaemorus* L. *in vitro* at different nutrient media and indolylacetic acid concentrations

Состав питательной среды	Концентрация индолилуксусной кислоты, мл/л		Среднее
	0,5	1,0	
Форма Архангельская			
МС	7,8	9,3	8,6
МС 1/2	3,9	7,7	5,8
Среднее	5,9	8,5	—
НСР ₀₅ ф. А = 0,89, ф. Б = 0,72, общ. = 0,98			
Форма Вологодская			
МС	8,2	10,3	9,3
МС 1/2	4,2	6,9	5,6
Среднее	6,2	8,6	—
НСР ₀₅ ф. А = 0,93, ф. Б = 0,81, общ. = 1,03			

ауксина индолилуксусной кислоты от 0,5 до 1,0 мл/л способствовало уменьшению суммарной длины корней *R. arcticus* исследуемых сортов в культуре *in vitro* в 1,4 раза (табл. 12).

При укоренении в культуре *in vitro* растений *R. chamaemorus* выявлено, что на питательной среде МС число корней у формы Архангельская составило в среднем 8,6 шт., у формы Вологодская 9,3 шт., что в 1,5–1,7 раза больше, чем на среде МС 1/2. При повышении в питательной среде концентрации ауксина индолилуксусной кислоты от 0,5 до 1,0 мл/л число корней у *R. chamaemorus* исследуемых форм увеличилось в 1,4 раза (табл. 13).

Таблица 14. Средняя длина корней, см, растений *Rubus chamaemorus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации индолилуксунной кислоты

Table 14. Average length of microshoots, cm, of *Rubus chamaemorus* L. *in vitro* at different nutrient media and indolylacetic acid concentrations

Состав питательной среды	Концентрация индолилуксунной кислоты, мл/л		Среднее
	0,5	1,0	
Форма Архангельская			
МС	5,9	2,8	4,4
МС 1/2	4,5	3,1	3,8
Среднее	5,2	3,0	—
НСР ₀₅ ф. А = 0,90, ф. Б = 0,79, общ. = 0,96			
Форма Вологодская			
МС	6,9	2,5	4,7
МС 1/2	4,1	3,0	3,6
Среднее	5,5	2,8	—
НСР ₀₅ ф. А = 0,97 ф. Б = 0,84, общ. = 1,01			

Средняя длина корней растений *R. chamaemorus* формы Вологодская *in vitro* на питательной среде МС была в 1,3 раза больше, чем на среде МС 1/2, тогда как у формы Архангельская различия были не существенны. С увеличением концентрации ауксина индолилуксунной кислоты от 0,5 до 1,0 мл/л средняя длина корней *R. chamaemorus* у формы Архангельская *in vitro* уменьшилась в среднем в 1,7 раза, у формы Вологодская почти в 2 раза (табл. 14).

Суммарная длина корней растений *R. chamaemorus* в культуре *in vitro* на питательной среде МС достигла у формы Архангельская в среднем 36,0 см, у формы Вологодская 41,2 см, что в 1,7 и 2,2 раза соответственно больше, чем в вариантах со средой МС 1/2 (табл. 15).

При повышении в питательной среде концентрации индолилуксунной кислоты от 0,5 до 1,0 мл/л суммарная длина корней растений *R. chamaemorus* у формы Архангельская в культуре *in vitro* уменьшилась в 1,3 раза, у формы Вологодская в 1,6 раза.

Выводы

В результате проведенных исследований по клональному микроразмножению хозяйственно ценных лесных ягодных растений рода *Rubus* установлено, что перед введением в культуру *in vitro* для стерилизации эксплантов *Rubus arcticus* L. и *Rubus chamaemorus* L. из латеральных почек растений эффективными стерилизующими агентами являются растворы азотнокислого серебра 0,2 % и дезинфицирующего средства Лизоформин 3000 5 % при времени экспозиции 15 мин, для стерилизации эксплантов из этиолированных побегов – растворы азотнокислого серебра 0,2 % и дезинфицирующих средств Лизоформин 3000 5 % и Ника-2 0,01 % при времени экспозиции 10 мин.

Таблица 15. Суммарная длина корней, см, растений *Rubus chamaemorus* L. в культуре *in vitro* в зависимости от состава питательной среды и концентрации индолилуксунной кислоты

Table 15. Total length of microshoots, cm, of *Rubus chamaemorus* L. *in vitro* at different nutrient media and indolylacetic acid concentrations

Состав питательной среды	Концентрация индолилуксунной кислоты, мл/л		Среднее
	0,5	1,0	
Форма Архангельская			
МС	46,0	26,0	36,0
МС 1/2	17,6	23,9	20,8
Среднее	31,8	25,0	—
НСР ₀₅ ф. А = 4,80, ф. Б = 3,10, общ. = 5,30			
Форма Вологодская			
МС	56,6	25,8	41,2
МС 1/2	17,2	20,7	19,0
Среднее	36,9	23,3	—
НСР ₀₅ ф. А = 5,30, ф. Б = 4,01, общ. = 6,10			

Число и длина микропобегов и корней *R. chamaemorus* форм Архангельского и Вологодского происхождения в культуре *in vitro* были наибольшими на питательной среде МС, тогда как аналогичные показатели у *R. arcticus* сортов София и Галина были больше на питательной среде МС 1/2. С увеличением в составе питательной среды концентрации цитодефа от 0,1 до 0,2 мг/л число микропобегов изучаемых форм *R. chamaemorus* повышалось в 1,3–1,7 раза, а суммарная длина микропобегов уменьшалась в 1,2–1,8 раза. При таком же повышении концентрации цитодефа в питательной среде число микропобегов у изучаемых сортов *R. arcticus* в культуре *in vitro* увеличивалось в 1,2–1,3 раза, тогда как суммарная длина микропобегов уменьшалась в 1,4–1,5 раза. С повышением в питательной среде концентрации ауксина индолилуксунной кислоты от 0,5 до 1,0 мл/л число корней у растений *R. chamaemorus* в культуре *in vitro* увеличивалось в 1,4 раза, а суммарная длина корней уменьшалась в 1,3–1,6 раза, тогда как число корней у *R. arcticus* не изменялось, а суммарная длина корней снижалась в 1,4 раза. В зависимости от сорта (у *R. arcticus*) или формы (у *R. chamaemorus*) статистически значимых различий биометрических показателей роста и развития растений при клональном микроразмножении не выявлено.

Критерии авторства

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку данной статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Выражаем благодарность кандидату биологических наук Г. В. Тяк и академику РАН, доктору сельскохозяйственных наук С. А. Родину.

Contribution

All the authors contributed equally to this article.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to Galina V. Tyak, Cand.Sci.(Biol.), and Sergey A. Rodin, Dr.Sci.(Agri.), Member of the Russian Academy of Sciences.

References

1. Makarov SS, Bagayev ES, Tsaregradskaya SYu, Kuznetsova IB. Problems of use and reproduction of phytogenic food and medicinal forest resources on the forest fund lands of the Kostroma region. Russian Forestry Journal. 2019;372(6):118–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.118>
2. Gudovskikh YuV, Egorova NYu, Egoshina TL. State of *Rubus arcticus* (Rosaceae) coenopopulations in Kirov region. Botanicheskii Zhurnal. 2020;105(8):779–793. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0006813620080062>
3. Verkhov N. Swamp guard. Ural Pathfinder. 2018;(12):12–15. (In Russ.). [Верхов Н. Болотный стражник // Уральский следопыт. 2018. № 12. С. 12–15.]
4. Markovskaya EF, Schmakova NYu, Morozova KV, Ermolaeva OV. Morphophysiological features of assimilation apparatus of *Rubus chamaemorus* (Rosaceae) leaves in West Svalbard. Botanicheskii Zhurnal. 2019;104(11–12):1740–1752. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0006813619110115>
5. Puupponen-Pimiä R, Nohynek L, Suvanto J, Salminen J-P, Seppänen-Laakso T, Tähtiharju J, et al. Natural antimicrobials from cloudberry (*Rubus chamaemorus*) seeds by sanding and hydrothermal extraction. ACS Food Science and Technology. 2021;1(5):917–927. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.0c00109>
6. Velichko NA, Sharoglazova LP, Smolnikova YaV. The study of the lipid composition of fruits of representatives of the genus *Rubus* and evaluation of the prospects for their application in food technologies. Bulletin of KSAU. 2016;118(7):137–145. (In Russ.). [Величко Н. А., Шароглазова Л. П., Смольникова Я. В. Исследование липидного состава плодов представителей рода *Rubus* и оценка перспективы их применения в пищевых технологиях // Вестник КрасГАУ. 2016. Т. 118. № 7. С. 137–145.]. <https://elibrary.ru/WCYKRT>
7. Afrin S, Giampieri F, Gasparri M, Forbes-Hernandez TY, Varela-López A, Quiles JL, et al. Chemopreventive and therapeutic effects of edible berries: A focus on colon cancer prevention and treatment. Molecules. 2016;21(2). <https://doi.org/10.3390/molecules21020169>
8. Pushnitsa AA, Bepalova VV. Effect of formulation components and technological processes on the quality of sweet jelly. News of Higher Educational Institutions. Arctic Region. 2018;(1):61–68. (In Russ.). [Пушница А. А., Беспалова В. В. Исследование влияния компонентов рецептуры и технологических процессов на качество желеобразованных сладких блюд // Известия высших учебных заведений. Арктический регион. 2018. № 1. С. 61–68.]. <https://elibrary.ru/YZKHQT>
9. Aguilera-Correa JJ, Fernández-López S, Cuñas-Figueroa ID, Pérez-Rial S, Alakomi H-L, Nohynek L, et al. Sanguin H-6 fractionated from cloudberry (*Rubus chamaemorus*) seeds can prevent the methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* biofilm development during wound infection. Antibiotics. 2021;10(12). <https://doi.org/10.3390/antibiotics10121481>
10. Karp K, Mänd M, Starast M, Paal T. Nectar production of *Rubus arcticus*. Agronomy Research. 2004;2(1):57–61.
11. Ragnar M, Rytönen P, Hedh J. Åkerbär. Luleå: Black Island Books; 2017. 169 p.
12. Luginina EA, Egoshina TL. Biochemical composition of fruits of wild growing berry plants. In: Weisfeld LI, Opalko AI, Bekuzarova SA. Temperate horticulture for sustainable development and environment. New York: Apple Academic Press; 2018. pp. 81–96. <https://doi.org/10.1201/9781351249393>
13. Boulanger-Pelletier J, Lapointe L. Fertilization stimulates root production in cloudberry rhizomes transplanted in a cutover peatland. Canadian Journal of Plant Science. 2017;97:1046–1056. <https://doi.org/10.1139/cjps-2016-0235>
14. Tyak GV, Kurlovich LE, Tyak AV. Biological recultivation of degraded peatlands by creating forest berry plants. Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2016;11(2):43–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/20633>
15. Tyak GV, Makarov SS, Kalashnikova EA, Tyak AV. Reproduction and cultivation of the arctic bramble (*Rubus arcticus* L.). Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia. 2018;52:95–99. (In Russ.). [Размножение и культивирование княженики арктической (*Rubus arcticus* L.) / Г. В. Тяк [и др.] // Плодоводство и ягодоводство России. 2018. Т. 52. С. 95–99.]. <https://elibrary.ru/XMSYKD>
16. Kikowska M, Turowska N, Thiem B. Can in vitro cultures of protected plant species be a source of raw materials for phytochemical and biological studies? Farmacja Współczesna. 2019;12:210–217. (In Polish).

17. Zontikov DN, Zontikova SA, Malahova KV. Influence of the composition of nutrient media and growth regulators during clonal micropropagation of some economically valuable representatives of the genus *Rubus* L. *Agrohimia*. 2021;(6):36–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002188121060144>
18. Makarov SS, Kuznetsova IB, Upadyshev MT, Rodin SA, Chudetsky AI. Clonal micropropagation of cranberry (*Oxycoccus palustris* Pers.). *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(1):67–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-67-76>
19. Chudetsky AI, Rodin SA, Zarubina LV, Kuznetsova IB, Tyak GV. Clonal micropropagation and peculiarities of adaptation to *ex vitro* conditions of forest berry plants of the genus *Vaccinium*. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(3):570–581. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2386>
20. Makarov SS, Upadyshev MT, Khamitov RS, Antonov AM, Kulikova EI, Kuznetsova IB. Prospects for industrial cultivation and biotechnological methods of propagation of wild berry plants. Moscow: Kolos-s; 2023. 153 p. (In Russ.). [Перспективы промышленного выращивания и биотехнологические методы размножения лесных ягодных растений / С. С. Макаров, М. Т. Упадышев, Р. С. Хамитов [и др.]. М.: Колос-с, 2023. 153 с.].
21. Akimov MYu, Bessonov VV, Kodentsova VM, Eller KI, Vrzhesinskaya OA, Beketova NA, et al. Biological value of fruits and berries of Russian production. *Problems of Nutrition*. 2020;89(4):220–232. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10055>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2489>
<https://elibrary.ru/KXVHQT>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Пищевой рацион перепела в осенний период в Ставропольском крае



А. П. Каледин¹, Л. В. Маловичко^{1,*}, А. Г. Резанов²,
Л. С. Дроздова¹, А. Т. Серикбаева³

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева^{ROR}, Москва, Россия

² Московский городской педагогический университет^{ROR}, Москва, Россия

³ Казахский национальный аграрный исследовательский университет^{ROR}, Алматы, Республика Казахстан

Поступила в редакцию: 05.06.2023

Принята после рецензирования: 08.08.2023

Принята к публикации: 05.09.2023

*Л. В. Маловичко: l-malovichko@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1040-2890>

А. П. Каледин: <https://orcid.org/0000-0002-5744-1363>

А. Г. Резанов: <https://orcid.org/0009-0002-3433-7624>

Л. С. Дроздова: <https://orcid.org/0000-0003-1150-0134>

А. Т. Серикбаева: <https://orcid.org/0000-0002-0040-4406>

© А. П. Каледин, Л. В. Маловичко, А. Г. Резанов,
Л. С. Дроздова, А. Т. Серикбаева, 2024



Аннотация.

Обыкновенный перепел (*Coturnix coturnix* (Linnaeus, 1758)) является гнездящейся и единственной перелетной птицей отряда курообразных. Перепел ведет наземный образ жизни, питается семенами и насекомыми, которые ползают по земле. На территории России перепел распространен широко. Перепелиное мясо обладает низкой калорийностью и полезными свойствами: богато белками, имеет небольшое количество жира и практически не содержит углеводов. Зимуют перепела в Закавказье и Южной Европе, но иногда остаются зимовать на территории России, особенно в южных регионах. Целью исследования являлось определение пищевого спектра перепела обыкновенного в осенний период в Центральном Предкавказье.

Пищевой спектр перепела устанавливали на основе анализа содержимого желудков 156 птиц, добытых охотниками и сбитых автотранспортом на дорогах в Шпаковском, Грачевском и Левокумском районах Ставропольского края. Материал для исследования собран в осенние периоды с 2008 по 2021 гг.

Перепел в Центральном Предкавказье широко распространен по сорным полям пшеницы и гороха. Численность его флуктуирует по годам в зависимости от весенних погодных условий. Наиболее оптимальными условиями для гнездования перепела являются орошаемые поля и участки у каналов и водохранилищ. В степных районах основное число встреч данной птицы связано с искусственными посадками сельскохозяйственных объектов (сады, виноградники, лесополосы вдоль полей, автомобильных и железных дорог, дачные поселки, кошары и др.). Перепел – фитофаг, его пища состоит из растительных и животных компонентов. В осенний период пищевой спектр перепела включает зеленую массу и зерна пшеницы, а также семена культурных и диких растений, личинок насекомых.

Ключевые слова. Обыкновенный перепел, *Coturnix coturnix*, дичь, спектр питания, гастролиты, ареал, биотоп

Для цитирования: Пищевой рацион перепела в осенний период в Ставропольском крае / А. П. Каледин [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 71–81. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2489>

Quails of Stavropol Region: Autumn Food Habits



Anatoly P. Kaledin¹, Lyubov V. Malovichko^{1,*},
Alexander G. Rezanov², Lyudmila S. Drozdova¹,
Andiya T. Serikbayeva³

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy^{ROR}, Moscow, Russia

² Moscow City University^{ROR}, Moscow, Russia

³ Kazakh National Agrarian Research University^{ROR}, Almaty, Kazakhstan

Received: 05.06.2023

Revised: 08.08.2023

Accepted: 05.09.2023

*Lyubov V. Malovichko: l-malovichko@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1040-2890>

Anatoly P. Kaledin: <https://orcid.org/0000-0002-5744-1363>

Alexander G. Rezanov: <https://orcid.org/0009-0002-3433-7624>

Lyudmila S. Drozdova: <https://orcid.org/0000-0003-1150-0134>

Andiya T. Serikbayeva: <https://orcid.org/0000-0002-0040-4406>

© A.P. Kaledin, L.V. Malovichko, A.G. Rezanov,
L.S. Drozdova, A.T. Serikbayeva, 2024



Abstract.

Quails (*Coturnix coturnix* (Linnaeus, 1758)) are the only migratory *Galliformes* species. Quails are nestling ground-dwelling birds, feeding on seeds and crawling insects. Wild quails inhabit many parts of Russia. Quail farming is quite popular because quail meat is low in calories and possesses a number of beneficial properties, e.g., it is rich in proteins, contains little fat and virtually no carbohydrates, etc. As a rule, quails winter in Transcaucasia and Southern Europe; however, they sometimes prefer to stay in southern regions for the winter. This article introduces the autumn food habits of quails in the Central Ciscaucasia. The research relied on the analysis of stomach contents of 156 birds killed by hunters or hit by vehicles in several districts of the Stavropol Region. The material was collected in the autumn in 2008–2021.

In the Central Ciscaucasia, quails are mesophiles and inhabit abandoned wheat and pea fields. The population fluctuates from year to year, depending on spring weather conditions. Their optimal nestling grounds include irrigated fields and areas near canals and ponds. In the steppe regions, they prefer agricultural areas, e.g., orchards, vineyards, holiday villages, sheep sheds, green belts along fields, roads, and railways, etc. Being phytophages, they rely on plant and, to a lesser extent, animal forage. In the autumn, they feeding on green plants, wheat grain, seeds of cultivated and wild plants, and insect larvae.

Keywords. Quail, *Coturnix coturnix*, game birds, diet, gastrolith, habitat, biotope

For citation: Kaledin AP, Malovichko LV, Rezanov AG, Drozdova LS, Serikbayeva AT. Quails of Stavropol Region: Autumn Food Habits. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):71–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2489>

Введение

Перепел (*Coturnix coturnix* (Linnaeus, 1758)) – обычный гнездящийся, перелетный, пролетный и редко зимующий вид в Ставропольском крае [1]. В Европейской части России ареал перепела доходит на севере до 63-й параллели [2]. На Северном Кавказе распространен повсеместно, исключением являются сухие полупустыни. Отмечено гнездование перепела на горных лугах, где он встречается реже, чем на равнине и предгорьях [3–6].

Численность перепела флуктуирует по годам в зависимости от весенних погодных условий [7]. В сухие весны меньшее количество мигрирующих птиц остается для размножения на юге Европейской части России. Большинство летит севернее – в места с оптимальными абиотическими условиями. В такие годы в аридных

ландшафтах пристанищами для перепела служат орошаемые поля и участки у каналов и водохранилищ. Во влажные годы большое количество птиц остается для гнездования в южных частях ареала. В дождливый май брачное пение самцов (бой) слышно почти на всех полях, включая полупустынную зону.

Плотность перепела на Северном Кавказе имеет территориальные и сезонные различия. Это не позволяет дать общую оценку численности популяции по имеющимся у нас сведениям. На большей части равнинных и предгорных агроценозов, а также умеренно увлажненных лугов перепел является фоновым видом, обычен, а местами бывает многочислен.

Косвенно об обилии перепела свидетельствует объем его добычи охотниками. За последние 5 лет

только в Ставропольском крае за год добыто в среднем 125 тыс. особей. Охота на перепелов популярна в Краснодарском крае, где в приморской полосе с конца августа до конца ноября появляется много мигрирующих птиц. За осень наблюдается 4–5 крупных волн пролета перепела: за 4-х часовую экскурсию можно увидеть 60–160 птиц [8]. На Скалистом хребте во время пролета охотники с собаками отыскивают за день до 100–150 перепелов [5, 9, 10]. Во всех субъектах Северного Кавказа ведется перепелиная охота.

Объекты и методы исследования

Материал для исследования собрали в 2008–2021 гг. в пределах Ставропольского края в осенний период. Изучение питания проводилось путем анализа содержимого 156 желудков перепелов, добытых охотниками и сбитых автотранспортом в Шпаковском (поселок Цимлянский), Грачевском (село Бешпагир) и Левокумском (хутор Арбали) районах Ставропольского края (рис. 1).

Содержимое желудка переносили в бумажный свёрток и оставляли сушиться. Через 1–2 дня просохший материал разбирали на составляющие: гастролиты, семена растений, беспозвоночные, зеленая (травяная) масса и т. д.

Для определения групп кормов использовали классификацию А. Н. Прекопова [11]. В основную группу кормов входят те, которые встречались в рационе чаще, чем в 5 % случаев. В группу второстепенных кормов входят корма, которые встречались в рационе от 1 до 5 % случаев. В группу случайных кормов входят

корма, которые встречались в рационе менее 1 % случаев. Перепел – фитофаг, его пища состоит из растительных и животных компонентов [12–18].

Результаты исследования актуализируют информацию о характере пищевого спектра перепела на территории Ставропольского края.

Результаты и их обсуждения

С. Т. Аксаков в своей книге «Записки ружейного охотника Оренбургской губернии» называет мясо осеннего перепела сочным, мягким и вкусным, но иногда до приторности жирным [19]. В первой половине XX столетия в черноземных степях существовал особый промысел – отлов живых перепелов сетями. Их сдавали на птицефабрики, где после откорма забивали и тысячами отправляли на экспорт в особой упаковке.

В сентябре – октябре связки битых перепелов можно было видеть на рынках селений и курортных городов Минераловодской группы, черноморского побережья Кавказа, Крыма и Ставрополя. Именно на юге и только в осенние месяцы отмечали случаи отравления людей мясом этой дичи. Тогда санитарные врачи объявили запрет на торговлю перепелами, но любители охоты продолжали их отстреливать, хотя сами не раз переносили отравление. Иногда среди сотен перепелов нет ни одного ядовитого, но бывали случаи, когда из-за 5–6 птиц, купленных на рынке, люди могли отравиться. Причины этого долго не могли выяснить [20].

Действие многих ядов специфично. Поэтому перепела могут питаться без вреда для себя семенами ряда

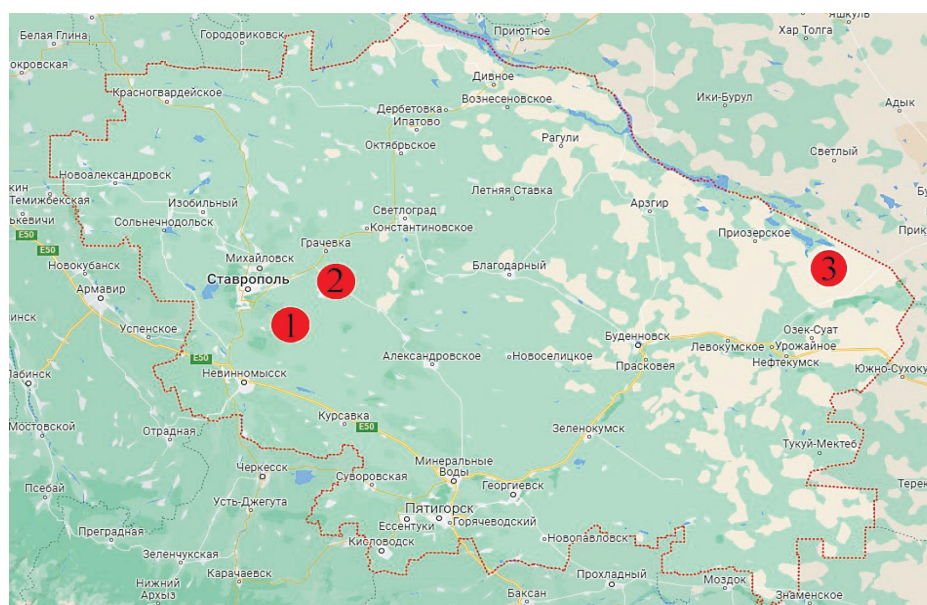


Рисунок 1. Места добычи перепелов в Ставропольском крае: 1 – поселок Цимлянский, Шпаковский район; 2 – село Бешпагир, Грачевский район; 3 – хутор Арбали, Левокумский район

Figure 1. Quail hunting areas in the Stavropol Region: 1 – Tsimlyansky village, Shpakovsky area; 2 – Beshpagir village, Grachevsky area; 3 – Arbali village, Levokumsky area

растений, которые являются ядовитыми для человека и домашних животных.

Чтобы выяснить, какие семена ядовитых растений поедаются перепелами в окрестностях Пятигорска, были организованы охоты в период с 19 августа по 9 сентября 1951 г. Было добыто 140 перепелов. После первой охоты отравился один человек, после второй – один, после третьей – пять, после четвертой – один. Содержимое зоба перепелов было тщательно изучено. Ботаники насчитали семена 21 вида растений, в том числе семена чистеца однолетнего *Stachys annua* (местное название «зябрик»). Д. В. Хованский отмечает случаи отравления лошадей чистецом многолетним и железницей горной *Sideritis montana*, которые сходны по клинической картине с отравлением «зябриком» [21]. Семена этих растений также могут поедаться перепелами.

Общих тенденций снижения численности перепела в Предкавказье за последние 2 десятилетия не выявлено. Одним из факторов сокращения популяции данного вида птиц является браконьерство на черноморском побережье. Много перепелов отлавливают ночью сачками с использованием световых приборов. В последнее время получил распространение новый способ незаконной охоты, при котором за ночь электронными манками на ограниченную территорию привлекается большое количество перепелов [22].

На дорогах в миграционный и зимний периоды перепела гибнут от столкновения с транспортом. Мы находили сбитых автомобилями птиц на дорогах, чаще всего по маршруту Ставрополь – Бешпагир, Ставрополь – Новоалександровск, Ставрополь – Цимлянский и др. Также перепела гибнут во время миграции в городах от столкновений с проводами: мы находили погибших перепелов на площади краевого центра. От бродячих и пастушеских собак гибнут кладки и выводки птиц [23]. Таким образом было уничтожено гнездо куропатки, обнаруженное во время прополки саженцев на питомнике в с. Дивном.

Спектр питания перепела. Шпаковский район.

Масса желудков добытых перепелов составила $4,28 \pm 0,44$ г (lim 2,6–7,1; SD = 0,98; Me = 4,15; Moda = 4,1; dispersia = 0,95; $p = 0,001$; $n = 54$). В 42 случаях (77,8 %) масса желудков составляла 3–5 г (рис. 2).

Для изучения диеты перепела было проанализировано содержимое 54 желудков птиц, добытых в районе пос. Цимлянский (табл. 1, рис. 3). В 54 желудках обнаружили 17 видов пищевых объектов ($n = 1148$), из которых на долю объектов животного происхождения пришлось только 4 вида (23,53 %).

В основную группу кормов (доля более 5 %) вошли пшеница, просо, гречиха, амарант, клевер и подмаренник, доля которых в рационе перепела составила 78,5 %. Во второстепенную группу (1–5 %) вошли щетинник сизый, спорыш, вьюнок, муравьи, мышинный горошек, вика посевная и амброзия. В сумме они составили около 20,5 %. В группу случайных кормов (до 1 %) вошли пчелы, осы и гусеницы бабочек – в сумме чуть более 1 %.

Гастролиты ($n = 794$) обнаружили в 50 желудках (92,6 %): $14,70 \pm 5,71$ (lim 0–52; SD = 12,76; Me = 11,5; Moda = 11; disp = 159,80; $p = 0,001$; $n = 54$). Корреляция между массой пустого желудка и числом гастролитов слабо выражена и статистически незначима $r = 0,04768$.

Выявили зависимость между долей пищевых объектов в рационе перепела и их встречаемости в желудках (рис. 4). С увеличением доли различных видов пищевых объектов в рационе перепела растет их встречаемость в желудках.

По **Левому району** материал незначителен: проанализировали содержимое только 8 желудков, их масса составила $3,09 \pm 0,22$ г (lim 2,9–3,4; SD = 0,19; Me = 3,1; Moda = 3,1; dispersia = 0,03; $p = 0,001$; $n = 8$). Гастролиты ($n = 5$) обнаружили только в 3 желудках (37,5 %).

Для изучения диеты перепела было проанализировано содержимое 8 желудков птиц, добытых в Левомском районе (табл. 2, рис. 5). В желудках обнару-

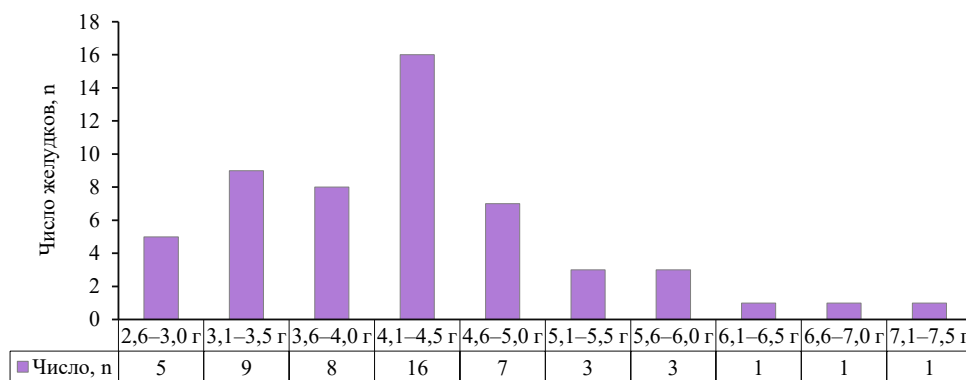


Рисунок 2. Распределение желудков перепела ($n = 54$) по массе

Figure 2. Quail stomachs ($n = 54$), by weight

жили 6 видов пищевых объектов ($n = 125$), из которых на долю объектов животного происхождения (гусеницы и бабочки) пришлось только 1,4 %. В составе диеты доминировали зерновые культуры (пшеница, гречиха и просо), на долю которых пришлось 80 %.

Выявили зависимость между долей кормов в рационе перепела и их встречаемостью в желудках (рис. 6).

По **Грачёвскому району** получили материал по 94 желудкам перепелов, добытых в августе 2017 г. Масса желудков составила $3,69 \pm 0,26$ г (lim 1,19–5,49;

Таблица 1. Анализ содержимого желудков ($n = 54$) перепелаTable 1. Quail stomach contents ($n = 54$)

Вид пищевого объекта	Абсолютная численность, экз.	Доля, % от 1148 (100 %)	Встречаемость, % от 54 (100 %)	$M \pm m$ ($n = 54$)	Lim
Пшеница	257	22,39	44 (81,48)	$4,76 \pm 1,94$ SD = 4,34 $p = 0,001$	0–17
Просо	195	16,99	29 (53,70)	$3,61 \pm 1,90$ SD = 4,25 $p = 0,001$	0–19
Гречиха	143	12,46	22 (40,74)	$2,65 \pm 1,99$ SD = 4,45 $p = 0,001$	0–18
Амарант	140	12,20	7 (12,96)	$2,59 \pm 1,98$ SD = 7,38 $p < 0,05$	0–32
Клевер	104	9,06	17 (31,48)	$1,93 \pm 1,41$ SD = 3,14 $p = 0,001$	0–11
Подмаренник	62	5,40	7 (12,96)	$1,15 \pm 0,84$ SD = 3,12 $p = 0,049$	0–13
Щетинник сизый	57	4,97	4 (7,41)	$1,06 \pm 0,70$ SD = 4,03 $p = 0,2$	0–23
Спорыш	55	4,81	5 (9,26)	$1,02 \pm 0,75$ SD = 3,37 $p = 0,1$	0–15
Вьюнок	34	2,96	9 (16,67)	$0,63 \pm 0,33$ SD = 1,90 $p = 0,2$	0–11
Муравьи	30	2,61	5 (11,11)	$0,56 \pm 0,35$ SD = 1,99 $p = 0,2$	0–12
Мышиный горошек	26	2,26	5 (11,11)	$0,48 \pm 0,27$ SD = 1,56 $p = 0,2$	0–7
Вика посевная	18	1,57	2 (3,70)	$0,33 \pm 0,17$ SD = 1,81 $p = 0,5$	0–12
Амброзия	15	1,31	2 (3,70)	$0,28 \pm 0,13$ SD = 1,43 $p = 0,5$	0–8
Пчела	6	0,52	2 (3,70)	$0,11 \pm 0,05$ SD = 0,57 $p = 0,5$	0–3
Оса	4	0,35	1 (1,85)	$0,07 \pm 0,02$ SD = 0,54 $p = 0,8$	0–4
Гусеница	2	0,17	2 (3,70)	$0,04 \pm 0,02$ SD = 0,19 $p = 0,5$	0–1
Итого	1148	100,00			

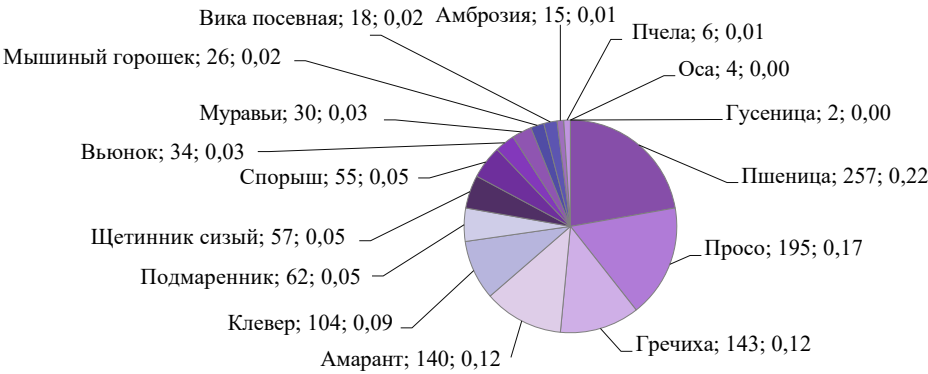


Рисунок 3. Состав диеты перепела (n = 1148)
Figure 3. Quail diet composition (n = 1148)

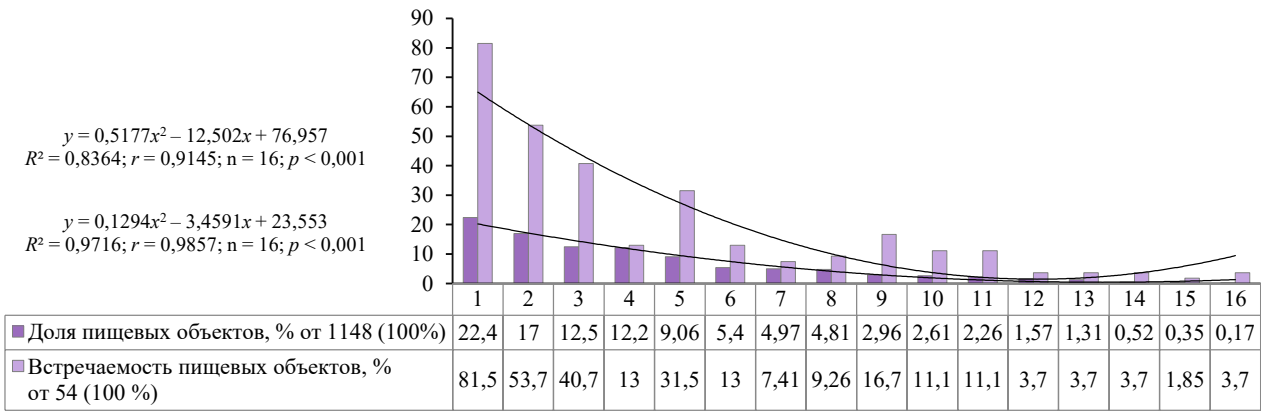


Рисунок 4. Зависимость между долей пищевых объектов в рационе перепела и их встречаемости
Figure 4. Share of foods in quail diet vs. their occurrence

Таблица 2. Анализ содержимого желудков (n = 8) перепела
Table 2. Quail stomach content analysis (n = 8)

Вид пищевого объекта	Абсолютная численность, экз.	Доля, % от 125 (100 %)	Встречаемость, % от 8 (100 %)	M ± m	Lim
Пшеница	40	32,0	7 (87,50)	5,00 ± 3,24 SD = 4,66 p = 0,049	0–13
Гречиха	34	27,2	4 (50,00)	4,25 ± 3,47 SD = 4,98 p = 0,049	0–13
Просо	26	20,8	5 (62,5)	3,25 ± 2,46 SD = 3,54 p = 0,049	0–10
Клевер	15	12,0	2 (25,00)	1,88 ± 0,85 SD = 3,56 p = 0,5	0–9
Спорыш	8	6,4	1 (12,5)	1,00 ± 0,52 SD = 2,83 p = 0,6	0–8
Гусеницы	2	1,6	1 (12,5)	0,25 ± 0,13 SD = 0,71 p = 0,6	0–2
Итого	125	100,00			

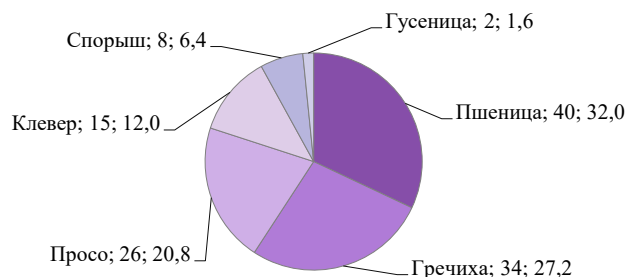


Рисунок 5. Состав диеты перепела (n = 125)

Figure 5. Quail diet composition (n = 125)

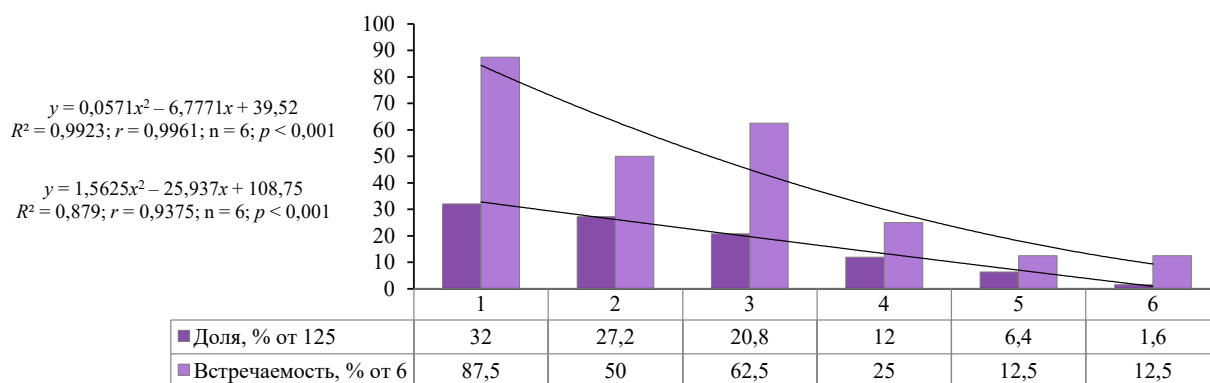


Рисунок 6. Зависимость между долей пищевых объектов в рационе перепела и их встречаемости

Figure 6. Share of foods in quail diet vs. their occurrence

SD = 0,76; Me = 3,69; Moda = 4,5; dispersia = 0,57; $p = 0,001$; $n = 94$), масса содержимого – $0,74 \pm 0,10$ г (lim 0,11–1,55; SD = 0,28; Me = 0,74; Moda = 0,64; dispersia = 0,08; $p = 0,001$; $n = 94$), корреляция – $r = 0,3891$ ($n = 94$; $p < 0,001$). Процент зеленой массы в содержимом желудка составил $44,41 \pm 6,84$ % (lim 0–90; SD = 20,15; Me = 50; Moda = 50; dispersia = 401,52; $p = 0,001$; $n = 94$). В желудках обнаружили 2430 гастролитов, в среднем $25,85 \pm 9,85$ (lim 0–145; SD = 29,03; Me = 13,5; Moda = 0; dispersia = 833,91; $p = 0,001$; $n = 94$). Корреляция между массой желудка и числом гастролитов составила $r = 0,2862$ ($n = 94$; $p < 0,001$), корреляция между массой желудка и массой содержимого – $r = 0,3891$ ($n = 94$; $p < 0,001$).

В желудках нашли 3498 объекта (3493 пищевого объекта 19 видов). 4 желудка из 94 были пустыми. Данные по содержимому желудков представлены в таблице 3 и на рисунке 7. На долю основных кормов (просо, горец, пшеница и гречиха) пришлось 89,6 %. На второстепенные корма (подмаренник, мышинный горошек и неопределенные насекомые) пришлось 5,9 %. Все остальные пищевые объекты отнесены к разряду случайных кормов, на их долю пришлось порядка 4,5 %.

Выявили зависимость между долей кормов в рационе перепела и их встречаемостью в желудках (рис. 8).

Сравнительный анализ по массе и содержанию желудков из различных районов. В таблице 4 представлен сравнительный анализ по массе и содержанию желудков перепелов, добытых в Шпаковском и Грачёвском районах Ставропольского края.

Различия по средним показателям ($M \pm m$) статистически не значимы ($td < 1,7$; $p > 0,05$): по массе желудков $td = 1,1$; по числу гастролитов $td = 1,01$; по числу объектов $td = 0,79$. Сходство по составу пищевых объектов в диете перепелов из Шпаковского и Грачёвского районов Ставропольского края: $K_j = 0,21$ (коэффициент Жаккара); $K_s = 0,35$ (коэффициент Серенсена); $K_k = 0,34$ (коэффициент Кульчинского); $K_o = 0,35$ (Коэффициент Отиаи).

Кормовое поведение. В отличие от фазана (*Phasianus colchicus*) перепел, как и серая куропатка (*Perdix perdix*), кормится на земле [12, 13, 23–30]. Таким образом, поведение перепела (как и серой куропатки) менее разнообразно, чем кормовое поведение фазана, который добывает корм как с земли, так и с древесно-кустарниковой растительности. Основной корм перепела – падалица зерен злаковых культур. Соответственно, кормовой метод – сбориание. Также перепел выклеивает семена из соцветий травянистых растений. Так как перепел бегаёт легко и быстро, то он может

Таблица 3. Анализ содержимого желудков (n = 94) перепела

Table 3. Quail stomach contents analysis
(n = 94)

Вид пищевого объекта	Абсолютная численность, экз.	Доля, % от 3498 (100 %)	Встречаемость, % от 94 (100 %)	M ± m SD = ; p =	Lim
Просо	1863	53,26	55 (58,51)	19,82 ± 10,69 SD = 52,65; p = 0,049	0–462
Горец	639	18,27	43 (45,74)	6,80 ± 4,49 SD = 22,13; p = 0,049	0–173
Пшеница	333	9,52	64 (68,09)	3,54 ± 1,31 SD = 3,86; p = 0,001	0–21
Гречиха	300	8,58	17 (18,09)	3,19 ± 1,70 SD = 15,9; p = 0,3	0–143
Подмаренник	82	2,34	9 (9,57)	0,87 ± 0,39 SD = 4,53; p = 0,4	0–40
Мышинный горошек	77	2,20	17 (18,09)	0,82 ± 0,45 SD = 2,20; p = 0,049	0–11
Насекомые ближе не опр.)	48	1,37	15 (15,96)	0,51 ± 0,23 SD = 2,11; p = 0,3	0–17
Ярутка	32	0,91	3 (3,19)	0,34 ± 0,12 SD = 2,28; p = 0,6	0–18
Хряплявник	30	0,86	2 (2,13)	0,32 ± 0,15 SD = 2,22; p = 0,5	0–18
Торица	29	0,83	1 (1,06)	0,31 ± 0,14 SD = 2,99; p = 0,65	0–29
Сорные злаки	29	0,83	1 (1,06)	0,31 ± 0,14 SD = 2,99; p = 0,65	0–29
Полынь	10	0,285	2 (2,13)	0,11 ± 0,05 SD = 0,93; p = 0,6	0–9
Прямокрылые	6	0,17	1 (1,06)	0,06 ± 0,03 SD = 0,52; p = 0,6	0–6
Щетинник	5	0,14	1 (1,06)	0,05 ± 0,02 SD = 0,515; p = 0,7	0–5
Чешуекрылые	4	0,11	1(1,06)	0,04 ± 0,02 SD = 0,41; p = 0,6	0–4
Комки пуха	3	0,086	3 (3,19)	0,030 ± 0,014 SD = 0,18; p = 0,45	0–1
Жесткокрылые	2	0,06	2 (2,13)	0,02 ± 0,01 SD = 0,145; p = 0,6	0–1
Бурачниковые	2	0,06	1 (1,06)	0,02 ± 0,01 SD = 0,21; p = 0,5	0–2
Раковины	1	0,03	1 (1,06)	0,010 ± 0,005 SD = 0,10; p = 0,6	0–1
Пауки	1	0,03	1 (1,06)	0,010 ± 0,005 SD = 0,10; p = 0,6	0–1
Кора	1	0,03	1 (1,06)	0,010 ± 0,005 SD = 0,10; p = 0,6	0–1
Пластик	1	0,03	1 (1,06)	0,010 ± 0,005 SD = 0,10; p = 0,6	0–1
Итого:	3498	100,00			



Рисунок 7. Состав диеты перепела (n = 3498)

Figure 7. Quail diet composition (n = 3498)

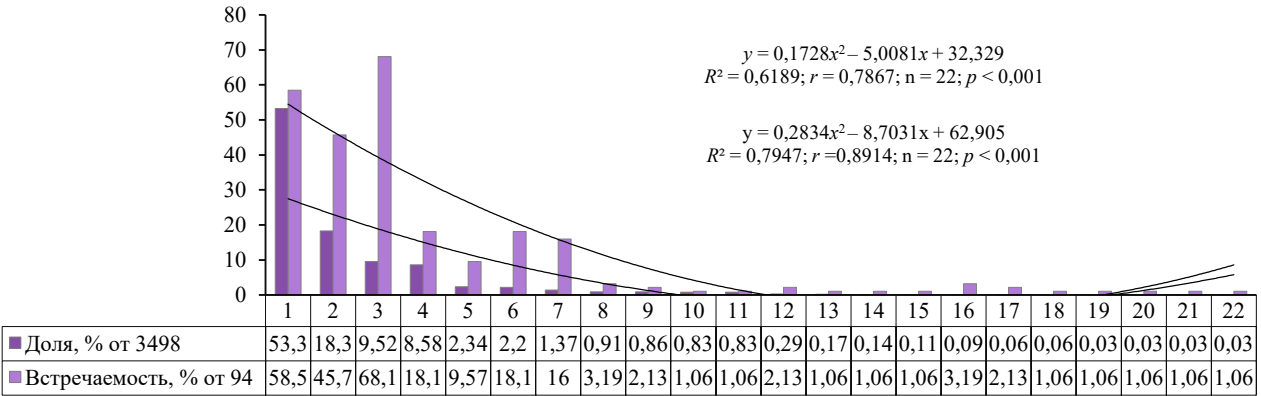


Рисунок 8. Зависимость между долей пищевых объектов в рационе перепела и их встречаемости

Figure 8. Share of foods in quail diet vs. their occurrence

Таблица 4. Сравнение показателей ($p = 0,001$) по массе и содержимому желудков перепелов из Шпаковского и Грачёвского районов

Table 4. Comparative analysis ($p = 0.001$) of weight and stomach contents of quails from Shpakovsky and Grachevsky areas

Районы	M ± m	Lim	SD	Med	Moda	Disp
Шпаковский	Масса желудков (n = 54)					
	4,28 ± 0,44	2,6–7,1	0,98	4,15	4,10	0,95
	Число гастролитов (n = 794) в желудках					
	14,70 ± 5,71	0–52	12,76	11,50	11,00	159,80
	Число объектов (n = 1148) в желудках					
	21,26 ± 4,23	8–57	9,45	19,50	15,00	89,21
Грачёвский	Масса желудков (n = 94)					
	3,69 ± 0,26	1,19–5,49	0,76	3,69	4,50	0,57
	Масса содержимого желудка, г					
	0,74 ± 0,10	0,11–1,55	0,28	0,74	0,64	0,08
	Число гастролитов (n = 2229) в желудках					
	25,85 ± 9,85	0–145	29,03	13,50	0	833,91
	Число объектов (n = 3498) в желудках					
	37,21 ± 19,82	0–463	58,41	19,50	7,00	3375,87

активно преследовать подвижных насекомых [12]. При добывании скрытых пищевых объектов перепел «копается в земле, разбрасывая и разгребая ее ногами», т. е. экспонируя добычу, находящуюся в поверхностных слоях земли [12]. Используя систему цифрового кодирования поведения мы выделили следующие основные кормовые методы перепела при наземном поиске корма [31, 32]:

- 1) ходьба и собирание семян, падалицы ягод или малоподвижных беспозвоночных с поверхности земли;
- 2) активная пешая охота на подвижных наземных насекомых;
- 3) выклевание семян из соцветий низких травянистых растений;
- 4) склевание вегетативных частей травянистых растений;
- 5) раскапывание земли при помощи лап (экспонирование добычи) и склевание пищевых объектов.

Выводы

Перепелов, кроме пшеницы и проса, привлекают сорные растения – злаковые, подмаренник, мышиный

горошек, клевер и др. Агротехнические приемы и структура севооборотов должны повышать мозаичность агроландшафта. Эффективно повышают ёмкость биотопов для перепелов поливные поля.

Критерии авторства

Все авторы в равной степени несут ответственность за полученные результаты исследований и рукопись.

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 declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

References

1. Khokhlov AN. Fauna of Stavropol. Stavropol': Stavropol'servisshkola; 2000. 195 p. (In Russ.). [Хохлов А. Н. Животный мир Ставрополя. Ставрополь: Ставропольсервисшкола, 2000. 195 с.]
2. Stepanyan LS. Conspectus of the ornithological fauna of Russia and adjacent territories (within the borders of the USSR as a historic region). Moscow: Akademkniga; 2003. 806 p. (In Russ.). [Степанян Л. С. Конспект орнитологической фауны России и сопредельных территорий (в границах СССР как исторической области). М.: Академкнига, 2003. 806 с.]
3. Belik VP. Birds of the steppe Don region: fauna development, anthropogenic transformation, and conservation issues. Rostov-on-Don: Rostov State Pedagogical University; 2000. 376 p. (In Russ.). [Белик В. П. Птицы степного Придонья: формирование фауны, ее антропогенная трансформация и вопросы охраны. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный педагогический университет, 2000. 376 с.]. <https://elibrary.ru/QWAHRH>
4. Belik VP, Komarov EYu, Muzaev VM, Rusanov GM, Reutskiy ND, Til'ba PA, et al. Birds of Southern Russia: Pattern of species habitat and distribution by region. Fauna, Ecology and Protection of Birds of South Palearctic. 2006;4(1):5–35. (In Russ.). [Орнитофауна Южной России: Характер пребывания видов и распределения по регионам / В. П. Белик, Ю. Е. Комаров, В. М. Музаев [и др.] // Стрепет: Фауна, экология и охрана птиц Южной Палеарктики. 2006. Т. 4. № 1. С. 5–35.]. <https://elibrary.ru/VBYHER>
5. Polivanov VM, Vitovich OA, Tkachenko IV. Birds of the Skalisty Ridge. In: Polivanov VM, editor. Birds of various landscapes of Russia: ecology and protection. Stavropol': Stavropol'skaya kraevaya tipografiya; 2000. pp. 101–129. (In Russ.). [Поливанов В. М., Витович О. А., Ткаченко И. В. Птицы Скалистого хребта // Птицы различных ландшафтов России, их экология и охрана / под ред. В. М. Поливанова. Ставрополь: Ставропольская краевая типография, 2000. С. 101–129.]
6. Til'ba PA. Birds of Sochi National Park. In: Tuniev BS, editor. Inventory of the main taxonomic groups, communities, and zoological studies of Sochi National Park: The first results of the first national park in Russia. Moscow: Prestizh; 2006. pp. 226–270. (In Russ.). [Тильба П. А. Авифауна Сочинского национального парка // Инвентаризация основных таксономических групп и сообществ, зоологические исследования Сочинского национального парка – первые итоги первого в России национального парка / под ред. Б. С. Туниева. М.: Престиж, 2006. С. 226–270.]
7. Malovichko LV, Fedosov VN, Plesnyavykh AS. Birds of the Dunda steppe tract. Fauna of Stavropol. 2005;13:50–62. (In Russ.). [Маловичко Л. В., Федосов В. Н., Плеснявых А. С. Некоторые особенности динамики авифауны степного урочища «Дунда» // Фауна Ставрополя. 2005. Т. 13. С. 50–62.]
8. Til'ba PA. Rare birds in the southeastern part of the Krasnodar Territory. Fauna, Ecology and Protection of Birds of South Palearctic. 2007;5(1–2):5–18. (In Russ.). [Тильба П. А. О некоторых редких и малоизученных видах птиц юго-восточной части Краснодарского края // Стрепет: Фауна, экология и охрана птиц Южной Палеарктики. 2007. Т. 5. № 1–2. С. 5–18.]
9. Kuzyakin VA. Hunting taxation. Moscow: Lesnaya promyshlennost'; 1979. 199 p. (In Russ.). [Кузякин В. А. Охотничья таксация. М.: Лесная промышленность, 1979. 199 с.]

10. Abelentsev VI, Shevchenko LS, Arkhipchuk VA. Agriculture and game. Report 2. Organizational and agrotechnical measures of game protection. Hunting and Game Management. 1972;(10):20–21. (In Russ.). [Абеленцев В. И., Шевченко Л. С., Архипчук В. А. Сельское хозяйство и дичь. Сообщение II. Организационные и агротехнические мероприятия по защите дичи // Охота и охотничье хозяйство. 1972. № 10. С. 20–21.].
11. Prekopov AN. The golden bee-eater in Ciscaucasia. Proceedings of the Voroshilov State Pedagogical Institute. 1940;3(2):240–442. (In Russ.). [Прекопов А. Н. К биологии золотистой шурки в Предкавказье // Труды Ворошиловского государственного педагогического института. 1940. Т. 3. № 2. С. 240–442.].
12. Kartashev NN. Quail (*Coturnix coturnix* L.). In: Dement'ev GP, Gladkov NA, editors. Birds of the Soviet Union. Vol. IV. Moscow: Sovetskaya nauka; 1952. pp. 133–145. (In Russ.). [Карташев Н. Н. Обыкновенный перепел *Coturnix coturnix* L. // Птицы Советского союза. Том IV / под ред. Г. П. Дементьева, Н. А. Гладкова. М.: Советская наука, 1952. С. 133–145.].
13. MacLeod MG, Dabutha LA. Diet selection by Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*) in relation to ambient temperature and metabolic rate. British Poultry Science. 1997;38(5):586–589. <https://doi.org/10.1080/00071669708418040>
14. Qureshi NA, Ansari MS, Akhter S, Khan AA, Hussain I, Rakha BA. Feeding habits of common quail (*Coturnix coturnix*) migrating through Rawalpindi, Pakistan. Pakistan Journal of Zoology. 2012;44(6):1760–1762.
15. Thamaraiselvi VP, Nirmala T. Food influence and growth rate of Quail (*Coturnix coturnix*) Periyakulam, Theni district, Tamil Nadu, India. International Journal of Recent Scientific Research. 2015;6(12):7730–7739.
16. Ganzalez-Redondo P, Caravaca FP, Garsia-Alvarez A, Martinez-Moreno F. Whole-grain cereal voluntary intake and preference in Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*). Spanish Journal of Agricultural Research. 2019;17(2).
17. Prates JVS, Braga YC, Pereira DD, da Costa DV. Insect protein in Japanese quail feed: A review. Research, Society and Development. 2023;12(1). <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39386>
18. Aksakov ST. Notes of a rifle hunter of the Orenburg Province. Moscow: Pravda; 1966. 488 p. (In Russ.). [Аксаков С. Т. Записки ружейного охотника Оренбургской губернии. М.: Правда, 1966. 488 с.].
19. Formozov AN. Poisonous autumn quails. Nature. 1964;(9):126–127. (In Russ.). [Формозов А. Н. Ядовитые осенние перепела // Природа. 1964. № 9. С. 126–127.].
20. Khovanskiy DV. Poisoning caused by quail meat. In: Perekrestov AA, editor. Proceedings of the First Scientific Conference of Doctors of the Stavropol Territory. Stavropol': Kn. izd-vo; 1954. pp. 65–70. (In Russ.). [Хованский Д. В. Об отравлении мясом перепёлок // Труды Первой научной конференции врачей Ставропольского края / отв. ред. А. А. Перекрестов. Ставрополь: Кн. изд-во, 1954. С. 65–70.].
21. Alekhin II. What is happening to hunting and to us? Hunting and Game Management. 2012;(9):1–5. (In Russ.). [Алехин И. И. Что происходит с охотой и с нами // Охота и охотничье хозяйство. 2012. № 9. С. 1–5.].
22. Potapov RL. Quails. In: Potapov RL, Flint VE, editors. Birds of the Soviet Union. Galliformes and gruiformes. Leningrad: Nauka; 1987. pp. 10–19. (In Russ.). [Потапов Р. Л. Перепел // Птицы СССР. Курообразные, журавлеобразные / отв. ред. Р. Л. Потапов, В. Е. Флинт. Л.: Наука, 1987. С. 10–19.].
23. Menzbir MA. Birds of Russia. Vol. 2. Moscow: I.N. Kushnerev and K°; 1895. 1120 p. (In Russ.). [Мензбир М. А. Птицы России. Т. 2. М.: И. Н. Кушнерев и К°, 1895. 1120 с.].
24. Kholodkovskiy NA, Silant'ev AA. Birds of Europe: Practical ornithology with an atlas of European birds. St. Petersburg: A.F. Devrien; 1901. 636 p. (In Russ.). [Холодковский Н. А., Силантьев А. А. Птицы Европы: Практическая орнитология с атласом европейских птиц. СПб: А. Ф. Девриен, 1901. 636 с.].
25. Cramp S, Simmons KEL. Handbook of the birds of Europe, the Middle East and North Africa: The birds of the Western Palearctic. Vol. 2. Oxford: Oxford University Press; 1979. 696 p.
26. Potapov RL. Gray partridge. In: Beme RL, Grachev NP, Isakov YuA, editors. Birds of the Soviet Union. Galliformes and gruiformes. Leningrad: Nauka; 1987. pp. 24–39. (In Russ.). [Потапов Р. Л. Серая куропатка // Птицы СССР. Курообразные. Журавлеобразные / под ред. Р. Л. Беме, Н. П. Грачев, Ю. А. Исаков. Ленинград: Наука, 1987. С. 24–39.].
27. Potapov RL. Pheasant *Phasianus colchicus* Linnaeus, 1758. In: Beme RL, Grachev NP, Isakov YuA, editors. Birds of the Soviet Union. Galliformes and gruiformes. Leningrad: Nauka; 1987. pp. 119–135. (In Russ.). [Потапов Р. Л. Фазан *Phasianus colchicus* Linnaeus, 1758 // Птицы СССР. Курообразные. Журавлеобразные / под ред. Р. Л. Беме, Н. П. Грачев, Ю. А. Исаков. Ленинград: Наука, 1987. С. 119–135.].
28. Kaledin AP, Malovichko LV, Rezanov AG, Drozdova LS. Autumn and winter diet of *Phasianus colchicus* in the Central Ciscaucasia. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(1):133–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-133-143>
29. Kaledin AP, Malovichko LV, Rezanov AG, Drozdova LS. Diet of the gray partridge (*Perdix perdix* L.) in the Central Ciscaucasia. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(2):334–343. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2367>
30. Rezanov AG. Feeding behavior of birds: Generalized method of description and ecological and geographical features. Dr. Sci. Biol. diss. Moscow; 2000. 417 p. (In Russ.). [Резанов А. Г. Кормовое поведение птиц: генерализованный метод описания и эколого-географические особенности: дис. ... д-ра биол. наук. М., 2000. 417 с.].
31. Rezanov AG. Feeding behavior of birds: Digital coding method and database analysis. Moscow: Izdat-shkola; 2000. 223 p. (In Russ.). [Резанов А. Г. Кормовое поведение птиц: метод цифрового кодирования и анализ базы данных. М.: Издат-школа, 2000. 223 с.].

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2490>
<https://elibrary.ru/LDFMSG>

Original article
Available online at <https://fptt.ru/en>

Gliadin Proteins in Muffins with Quinoa Flour



Vesna S. Gojković Cvjetković^{1,*}, Dragana M. Škuletić¹,
Željka R. Marjanović-Balaban², Dragan P. Vujadinović¹,
Danijela Z. Rajić¹, Vladimir M. Tomović³

¹ University of East Sarajevo^{ROR}, Lukavica, Bosnia and Herzegovina

² University of Banja Luka^{ROR}, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina

³ University of Novi Sad^{ROR}, Novi Sad, Serbia

Received: 30.06.2023

Revised: 11.09.2023

Accepted: 03.10.2023

*Vesna S. Gojković Cvjetković: vesna.gojkovic@tfzv.ues.rs.ba,

<https://orcid.org/0000-0003-1118-4565>

Dragan P. Vujadinović: <https://orcid.org/0000-0002-3809-4415>

Danijela Z. Rajić: <https://orcid.org/0000-0002-1169-5755>

Vladimir M. Tomović: <https://orcid.org/0000-0001-5055-1781>

© V.S. Gojković Cvjetković, D.M. Škuletić, Ž.R. Marjanović-Balaban,
D.P. Vujadinović, D.Z. Rajić, V.M. Tomović, 2024



Abstract.

Partial replacement of wheat flour in foodstuffs is of great importance in the food industry. Muffins are a type of semi-sweet cake that is traditionally made from wheat flour. They are especially favored by children and senior citizens. Muffins have a long shelf life, which also contributes to their popularity. However, gluten, the main protein in wheat flour, is commonly associated with celiac disease. Gluten consists of two fractions: gliadins and glutenins.

In this experiment, the original muffins contained 100% wheat flour. Then, we replaced a portion of wheat flour with 25, 50, and 75% quinoa flour. The samples were stored for 0, 2, and 4 weeks. After that, gliadin proteins were extracted with 70% (v/v) ethanol. We separated gliadin using a high-performance liquid chromatograph (Agilent Technologies 1260 Infinity, USA) and measured the total amount of gliadin protein and the amount of gliadin proteins per fraction. The absorbance tests were conducted at 210 nm.

The gliadin protein content was significantly reduced to the wheat vs. quinoa ratio of 50:50 because quinoa is gluten-free, even though it is rich in protein. During the storage time of 0, 2, and 4 weeks, the protein content fell down in the samples with the wheat vs. quinoa ratios of 100:0, 75:25, and 50:50. However, the muffins with 25% wheat flour and 75% quinoa demonstrated an increase in gliadin content.

The results obtained could be a good starting point for the development of high-fiber, gluten-free, and more nutritionally valuable muffins.

Keywords. Muffins, wheat flour, quinoa flour, gluten, gliadins, HPLC

Funding. This work is a part of the research project “Examination of the effect of replacing wheat flour with pseudocereals on gluten proteins”, financed by the Ministry of Science and Technology Development and Higher Education of the Republic of Srpska.

For citation: Gojković Cvjetković VS, Škuletić DM, Marjanović-Balaban ŽR, Vujadinović DP, Rajić DZ, Tomović VM. Gliadin Proteins in Muffins with Quinoa Flour. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):82–92. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2490>

Влияние на белки глинаина частичной замены пшеничной муки в кексах мукой из киноа



В. С. Гойкович Цветкович^{1,*}, Д. М. Шкулетич¹,
Ж. Р. Марьянович-Балабан², Д. П. Вуядинович¹,
Д. З. Раич¹, В. М. Томович³

¹ Восточно-Сараевский университет^{ROR}, Лукавица, Босния и Герцеговина

² Баня-Лукский университет^{ROR}, Баня-Лука, Босния и Герцеговина

³ Нови-Садский университет^{ROR}, Нови-Сад, Сербия

Поступила в редакцию: 30.06.2023

Принята после рецензирования: 11.09.2023

Принята к публикации: 03.10.2023

*В. С. Гойкович Цветкович: vesna.gojkovic@tfzv.ues.rs.ba,
<https://orcid.org/0000-0003-1118-4565>

Д. П. Вуядинович: <https://orcid.org/0000-0002-3809-4415>

Д. З. Раич: <https://orcid.org/0000-0002-1169-5755>

В. М. Томович: <https://orcid.org/0000-0001-5055-1781>

© В. С. Гойкович Цветкович, Д. М. Шкулетич, Ж. Р. Марьянович-Балабан, Д. П. Вуядинович, Д. З. Раич, В. М. Томович, 2024



Аннотация.

Кексы относятся к мучным кондитерским изделиям, которые имеют длительный срок хранения, что влияет на их популярность. Благодаря вкусовым характеристикам кексы любят дети и пожилые люди. Главным рецептурным компонентом кексов является пшеничная мука. Глютен – основной белок в составе пшеничной муки. Именно его связывают с возникновением заболевания целиакия. Глютен состоит из двух фракций: глиадинов и глютелинов. Цель исследования – изучение возможности замены части пшеничной муки в кексах мукой киноа.

Заменили часть пшеничной муки в традиционных кексах на муку киноа – 25, 50 и 75 %. Образцы хранили в течение 0, 2 и 4 недель. После этого белки глинаина экстрагировали 70 % этанолом. Глиадин отделяли с помощью высокоэффективного жидкостного хроматографа (Agilent Technologies 1260 Infinity, США), чтобы измерить его общее количество белка и количество белков в каждой фракции. Тесты на поглощение проводились при длине волны 210 нм.

Содержание белка глинаина снижалось до соотношения пшеницы и киноа 50:50, поскольку мука киноа не содержит глютена, хотя богата белком. За 0, 2 и 4 недели хранения содержание белка снижалось в образцах, где соотношение муки пшеницы и киноа было 100:0, 75:25 и 50:50. Однако в кексах с 25 % пшеничной муки и 75 % муки киноа наблюдалось увеличение содержания глинаина.

Полученные результаты могут стать точкой для разработки кексов с высоким содержанием клетчатки, без глютена и повышенной питательностью.

Ключевые слова. Кексы, пшеничная мука, мука из киноа, глютен, глинаины, ВЭЖХ

Финансирование. Работа является частью исследовательского проекта «Воздействие замещения пшеничной муки псевдозернами на белки клейковины», финансируемого Министерством развития науки, технологий и высшего образования Республики Сербской.

Для цитирования: Влияние на белки глинаина частичной замены пшеничной муки в кексах мукой из киноа / В. С. Гойкович Цветкович [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 82–92. (На англ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2490>

Introduction

By replacing wheat flour with its safer alternatives, food producers both fortify their products and contribute to preventing certain chronic diseases [1, 2]. Muffins are one of the most popular cakes, largely consumed by such population categories as children and senior citizens. Muffins are semi-sweet cakes prepared

from wheat flour. They owe their popularity to their extended shelf life [3–5].

Wheat flour is the basic ingredient in muffins, gluten being its major protein. Gliadins represent one of the gluten fractions [6]. They are soluble in aqueous alcohol. Gliadins can be divided into four fractions marked as $\omega 5$, $\omega 1,2$, $\alpha + \beta$, and γ [7–9].

Pseudocereals do not belong to cereals per se: their seeds resemble cereals and, therefore, can be used similarly. The most important pseudocereals are amaranth (*Amaranthus* spp.), quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench. and *Fagopyrum tartaricum* (L.) Gaertn) [10].

Although it is not a cereal, quinoa is often called a super cereal. It is a rich source of protein. Unlike cereals proper, quinoa is a complete source of protein because it contains all nine essential amino acids, for instance, lysine. This amino acid is essential for tissue growth and recovery [11, 12]. In addition to protein, quinoa also contains iron, potassium, and vitamin B₂, as well as other vitamins from the B group, e.g., B₆, B₃, and B₁. It is a good source of magnesium, zinc, copper, manganese, as well as fibers [12].

Quinoa does not contain gluten, which makes it suitable for people suffering from celiac disease. It is good for digestion because it contains insoluble fibers [13, 14]. Quinoa is also known to prevent cardiovascular diseases and diabetes because it contains healthy fats and antioxidants [14].

The Food and Agriculture Organization (FAO) has recognized the importance and value of quinoa due to its various positive characteristics. Its genetic variability is quite impressive and opens possibilities of developing superior species [15]. Quinoa is resistant to different agricultural and climatic conditions as it grows at different altitudes and temperatures. Due to its high nutritional value and ability to provide food for the world's population, the year of 2013 was declared the International Year of Quinoa [16].

Considering that quinoa is a gluten-free grain rich in proteins and other nutrients, and that the number of people who suffer from celiac disease is increasing every day, this work examines how replacing part of wheat flour with quinoa flour and storage time (0, 2, and 4 weeks) affect gliadin proteins in muffins.

Study objects and methods

Preparing muffins. The muffins were prepared according to four different formulations, which differed in the amount of wheat flour (30 g). We replaced wheat flour with quinoa flour (Karlsruhe, Germany) in the proportions that ranged from 0, 25, 50, and 75% (by weight). The quinoa flour used in the experiment contained (as declared by the producer) the following macronutrients and nutrients per 100 g: 12.0 g proteins, 6.6 g fats, 67 g carbohydrates, 5.5 g fibers, < 0.01 g salt. The formulations for the muffins included other ingredients as well, i.e., sugar powder (10 g), milk (3.2% fat, 12 mL), butter (9 g), baking powder (0.6 g), and beaten whole eggs (7.6 g). The muffins were prepared as described by Bialek *et al.* [17].

Preparing gliadin. Gliadins were extracted from 100 g muffin samples with 70% (v/v) ethanol (96% v/v ethyl alcohol, Srbobran). The extraction was carried out according to the modified methods proposed by Wieser *et al.* and Gojković Cvjetković *et al.* [18, 19].

Separating gliadin separation with HPLC. The gliadin separation was performed on a high-performance liquid chromatograph (Agilent Technologies 1260 Infinity, USA). After separating the proteins, we measured the total amount of proteins and the amount of proteins in each fraction. The total amount of proteins was obtained as a sum of individual proteins. The method of gliadin separation followed the protocol described by Gojković Cvjetković *et al.* [19].

The **statistical data analysis** involved the IBM SPSS Statistics 26 software. We calculated the average amount of proteins (X_{av}), standard deviation, and standard error, as well as minimal and maximal values. We used the analysis of variance (ANOVA) of different groups to evaluate the effect of storage time (0, 2, and 4 weeks) and different shares of quinoa flour on the average amount of proteins. The significance of the differences between the average amount at the $p = 0.05$ level of significance was evaluated by the subsequent Tukey's HSD test of real difference.

Results and discussion

Table 1 shows the total amount of gliadin proteins and the amount of protein in each fraction in muffins with 100% wheat flour.

The highest amount of protein within the $\omega 5$ gliadin fraction was isolated from the fresh samples (X_{av} = 4.00) while the lowest belonged to those stored for 2 and 4 weeks (X_{av} = 2.00). Within the $\omega 1,2$ gliadin fraction, however, the highest amount of protein was isolated from the samples after 2 weeks of storage (X_{av} = 3.67) whereas the lowest amount was detected in the fresh samples (X_{av} = 2.67). The highest amount of protein within the $\alpha + \beta$ was obtained from the samples stored for 2 weeks (X_{av} = 6.00), and the lowest was registered in the samples stored for 4 weeks (X_{av} = 3.33). Within the γ gliadin fraction, the highest amount of protein belonged to the fresh samples (X_{av} = 15.00) while the lowest amount was revealed in the samples that underwent 2 weeks of storage (X_{av} = 8.67). The ANOVA confirmed a statistical difference: $F(2,6) = 16.35$, Sig. = $0.004 < 0.05$. The Tukey's HSD test showed that the samples stored for 0 and 2 weeks and 0 and 4 weeks were significantly different, while the samples stored for 2 and 4 weeks did not differ significantly.

The highest total amount of protein was extracted from the fresh muffin sample (X_{av} = 26.00), and the lowest total amount of protein came from the samples subjected to 4 weeks of storage (X_{av} = 18.00). The ANOVA revealed a statistical difference: $F(2,6) = 13.44$, Sig. = $0.006 < 0.05$. The Tukey's HSD test demonstrated that the samples stored for 0 and 2 weeks, as well as those stored for 0 and 4 weeks, had a statistically significant difference whereas the samples stored for 2 and 4 weeks were statistically the same.

Table 2 shows the total amount of gliadin proteins and the amount of protein for each fraction in the muffin samples made from 75% wheat flour and 25% quinoa flour.

Table 1. Total gliadin and gliadin by fractions in muffins with 100% wheat flour, with absorbance measurement at 210 nm

Таблица 1. Общий глиадин и глиадин по фракциям в кексах из 100 % пшеничной муки (измерение оптической плотности проводилось при 210 нм)

Proteins	Storage time (weeks)	N	Average protein (Xav)	Standard deviation	Standard error	Minimal value	Maximal value
$\omega 5$ gliadins	0	3	4.00	1.00	0.58	3.00	5.00
	2	3	2.00	1.00	0.58	1.00	3.00
	4	3	2.00	1.00	0.58	1.00	3.00
$\omega 1,2$ gliadins	0	3	2.67	0.58	0.33	2.00	3.00
	2	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
	4	3	3.33	0.58	0.33	3.00	4.00
$\alpha + \beta$ gliadins	0	3	4.33	1.15	0.67	3.00	5.00
	2	3	6.00	1.00	0.58	5.00	7.00
	4	3	3.33	1.15	0.67	2.00	4.00
γ gliadins	0	3	15.00	1.73	1.00	14.00	17.00
	2	3	8.67	1.15	0.67	8.00	10.00
	4	3	9.33	1.53	0.88	8.00	11.00
Total proteins	0	3	26.00	1.73	1.00	25.00	28.00
	2	3	20.33	2.08	1.20	18.00	22.00
	4	3	18.00	2.00	1.15	16.00	20.00
ANOVA ($\omega 5$)	F(2,6) = 4.00, Sig. = 0.08 > 0.05, eta square = 8/14 = 0.57						
ANOVA ($\omega 1,2$)	F(2,6) = 2.33, Sig. = 0.18 > 0.05, eta square = 1.55/3.55 = 0.44						
ANOVA ($\alpha + \beta$)	F(2,6) = 4.45, Sig. = 0.06 > 0.05, eta square = 10.89/18.22 = 0.60						
ANOVA (γ)	F(2,6) = 16.35, Sig. = 0.004 < 0.05, eta square = 72.67/86.00 = 0.84						
ANOVA (TAP)	F(2,6) = 13.44, Sig. = 0.006 < 0.05, eta square = 101.55/124.22 = 0.82						

Table 2. Total gliadin and gliadin by fractions in muffins made from 75% wheat flour and 25% quinoa flour, with absorbance measurement at 210 nm

Таблица 2. Общий глиадин и глиадин по фракциям в кексах с 75 % пшеничной муки и 25 % муки киноа (измерение оптической плотности проводилось при 210 нм)

Proteins	Storage time (weeks)	N	Average protein (Xav)	Standard deviation	Standard error	Minimal value	Maximal value
$\omega 5$ gliadins	0	3	2.67	0.58	0.33	2.00	3.00
	2	3	1.67	0.58	0.33	1.00	2.00
	4	3	2.33	0.58	0.33	2.00	3.00
$\omega 1,2$ gliadins	0	3	3.00	1.00	0.58	2.00	4.00
	2	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
	4	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
$\alpha + \beta$ gliadins	0	3	5.00	1.00	0.58	4.00	6.00
	2	3	4.00	1.00	0.58	3.00	5.00
	4	3	3.67	1.15	0.67	3.00	5.00
γ gliadins	0	3	8.33	1.15	0.67	7.00	9.00
	2	3	7.67	0.58	0.33	7.00	8.00
	4	3	8.33	0.58	0.33	8.00	9.00
Total proteins	0	3	19.67	1.53	0.88	18.00	21.00
	2	3	17.33	1.53	0.88	16.00	19.00
	4	3	17.67	1.15	0.67	17.00	19.00
ANOVA ($\omega 5$)	F(2,6) = 2.33, Sig. = 0.18 > 0.05, eta square = 1.55/3.55 = 0.44						
ANOVA ($\omega 1,2$)	F(2,6) = 0.80, Sig. = 0.49 > 0.05, eta square = 0.89/4.22 = 0.21						
ANOVA ($\alpha + \beta$)	F(2,6) = 1.30, Sig. = 0.34 > 0.05, eta square = 2.89/9.55 = 0.30						
ANOVA (γ)	F(2,6) = 0.67, Sig. = 0.55 > 0.05, eta square = 0.89/4.89 = 0.18						
ANOVA (TAP)	F(2,6) = 2.39, Sig. = 0.17 > 0.05, eta square = 9.55/21.55 = 0.44						

In this experiment, gliadin protein was extracted from the muffin samples made from 75% wheat flour and 25% quinoa flour. The chromatographic separation showed that the highest amount of protein in the $\omega 5$ gliadin fraction belonged to the samples stored for 0 weeks ($X_{av} = 2.67$). The lowest amount of protein was detected in the fresh samples ($X_{av} = 1.67$). As for the $\omega 1,2$ gliadin fraction, the highest amount of protein was found in the samples stored for 2 and 4 weeks ($X_{av} = 3.67$) whereas the fresh samples showed the lowest one ($X_{av} = 3.00$). The highest amount of protein belonged to the $\alpha + \beta$ fraction and was isolated from the fresh samples ($X_{av} = 5.00$), as well as to the γ gliadin fraction isolated from the four-week sample ($X_{av} = 8.33$). In these fractions, the samples stored for 4 and 2 weeks contained the lowest amount of protein, which amounted to $X_{av} = 3.67$ and $X_{av} = 7.67$, respectively. The highest total amount of protein was isolated from the fresh samples ($X_{av} = 19.67$) while the samples stored for 2 weeks had the lowest total amount ($X_{av} = 17.33$). The ANOVA revealed no statistically significant difference neither for any particular protein nor for the total.

Table 3 shows the total amount of gliadin proteins and the amount of protein by fractions in the muffin samples made from 50% wheat flour and 50% quinoa flour.

The gliadin proteins extracted from the muffin samples with 50% wheat flour and 50% quinoa flour were

separated and tested for total amount and the amount of gliadin per fraction. As for gliadin fractions $\omega 5$ and $\omega 1,2$, the highest amounts of protein were extracted from the samples that were stored for 0 ($X_{av} = 3.00$) and 4 weeks ($X_{av} = 3.67$). The samples that underwent 2 and 0 weeks of storage demonstrated the lowest amounts of $X_{av} = 1.00$ and $X_{av} = 1.67$, respectively. The highest amount of protein within the $\alpha + \beta$ and γ gliadin fractions belonged to the fresh samples and equaled $X_{av} = 3.67$ and $X_{av} = 8.67$, respectively. The lowest volumes came from the samples that were stored for 2 ($X_{av} = 3.00$) and 4 weeks ($X_{av} = 6.67$). The ANOVA showed a statistical difference within the γ gliadin fraction: $F(2,6) = 9.33$, $Sig = 0.01 < 0.05$. A subsequent comparison by Tukey's HSD test demonstrated that the samples stored for 0 and 4 weeks differed significantly while the samples stored for 0 and 2 weeks, as well as those stored for 2 and 4 weeks, were statistically the same.

The highest total amount of protein belonged to the fresh samples ($X_{av} = 17.00$) while the lowest data were obtained from the two-week samples ($X_{av} = 14.33$).

Table 4 shows the total amount of gliadin proteins and the amount of protein per fraction in the muffin samples made from 25% wheat flour and 75% quinoa flour.

The highest amount of protein within the $\omega 5$ gliadin fraction was obtained from the fresh samples ($X_{av} = 2.67$) while the two-week samples yielded the lowest amount ($X_{av} = 1.00$). As for the $\omega 1,2$ gliadin fraction, the highest

Table 3. Total gliadin and gliadin by fractions in muffins made from 50% wheat flour and 50% quinoa flour, with absorbance measurement at 210 nm

Таблица 3. Общий глиадин и глиадин по фракциям в кексах с 50 % пшеничной муки и 50 % муки киноа (измерение оптической плотности проводилось при 210 нм)

Proteins	Storage time (weeks)	N	Average protein (X_{av})	Standard deviation	Standard error	Minimal value	Maximal value
$\omega 5$ gliadins	0	3	3.00	0	0	3.00	3.00
	2	3	1.00	0	0	1.00	1.00
	4	3	2.00	0	0	2.00	2.00
$\omega 1,2$ gliadins	0	3	1.67	1.15	0.67	1.00	3.00
	2	3	2.67	0.58	0.33	2.00	3.00
	4	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
$\alpha + \beta$ gliadins	0	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
	2	3	3.00	0	0	3.00	3.00
	4	3	3.00	1.00	0.58	2.00	4.00
γ gliadins	0	3	8.67	0.58	0.33	8.00	9.00
	2	3	7.33	0.58	0.33	7.00	8.00
	4	3	6.67	0.58	0.33	6.00	7.00
Total proteins	0	3	17.00	2.65	1.53	14.00	19.00
	2	3	14.33	1.15	0.67	13.00	15.00
	4	3	15.33	0.58	0.33	15.00	16.00
ANOVA ($\omega 5$)	$F(2,6) = \text{inf.}$						
ANOVA ($\omega 1,2$)	$F(2,6) = 4.50$, $Sig. = 0.06 > 0.05$, eta square = $6.00/10.00 = 0.60$						
ANOVA ($\alpha + \beta$)	$F(2,6) = 1.00$, $Sig. = 0.42 > 0.05$, eta square = $0.89/3.55 = 0.25$						
ANOVA (γ)	$F(2,6) = 9.33$, $Sig. = 0.01 < 0.05$, eta square = $6.22/8.22 = 0.76$						
ANOVA (TAP)	$F(2,6) = 1.88$, $Sig. = 0.23 > 0.05$, eta square = $10.89/28.22 = 0.39$						

amount of proteins belonged to the four-week samples ($X_{av} = 4.33$) whereas the lowest one came from the two-week samples ($X_{av} = 1.67$). The highest amount of protein was observed in the $\alpha + \beta$ gliadin fraction in the fresh samples ($X_{av} = 4.00$) and in the γ gliadin fraction in the samples stored for 4 weeks ($X_{av} = 7.00$). The lowest amount was registered in the $\alpha + \beta$ gliadin fraction in the two-week samples ($X_{av} = 3.00$), as well as in the γ gliadin fraction in the four-week samples ($X_{av} = 5.67$). The highest total amount of proteins was obtained from the muffins after 4 weeks of storage ($X_{av} = 16.33$), and the lowest was detected in the two-week samples ($X_{av} = 12.33$). The ANOVA detected a significant difference: $F(2.6) = 12.00$, $\text{Sig.} = 0.008 < 0.05$. The Tukey's HSD test showed that the statistical difference concerned the samples stored for 2 and 4 weeks.

Table 5 shows the total amount of gliadin proteins and the amount of protein per fraction after the extraction from the muffin samples made from wheat flour (100, 75, 50, and 25%) and quinoa flour (0, 25, 50, and 75%) after 0 weeks of storage.

The highest amount of protein within the $\omega 5$ gliadin fraction was isolated from the samples that contained no quinoa flour ($X_{av} = 4.00$) while the lowest one came from those with the wheat vs. quinoa ratios of 75:25 and 25:75 ($X_{av} = 2.67$). Within the $\omega 1,2$ gliadin fraction, the highest amount of protein belonged to the samples with 75% wheat flour and 25% quinoa flour ($X_{av} = 3.00$)

whereas the lowest was registered in the samples with equal shares of wheat and quinoa ($X_{av} = 1.67$). As for $\alpha + \beta$ gliadin, the samples with 75% wheat flour and 25% quinoa flour had the highest amount of protein ($X_{av} = 5.00$). The lowest amounts in this fraction came from the samples with equal shares of wheat and quinoa ($X_{av} = 3.67$). Within the γ gliadin fraction, the highest amount of protein was isolated from the samples without quinoa ($X_{av} = 15.00$), while the lowest belonged to the samples with 25% wheat flour and 75% quinoa flour ($X_{av} = 5.67$). The ANOVA detected a statistical difference: $F(3.8) = 37.58$, $\text{Sig.} = 0.000 < 0.05$. According to the Tukey's test, the significant difference was found between the samples with the following wheat vs. quinoa ratios: 100:0 and 75:25; 100:0 and 50:50; 100:0 and 25:75; 50:50 and 25:75. No significant difference was detected between the samples with the ratios of 75:25 and 50:50; 75:25 and 25:75. The highest total amount of proteins was extracted from the muffin sample that contained no quinoa and amounted to $X_{av} = 26.00$ while the lowest belonged to the samples with 25% wheat flour and 75% quinoa ($X_{av} = 14.33$). The ANOVA detected a statistical difference: $F(3.8) = 23.67$, $\text{Sig.} = 0.000 < 0.05$. A subsequent comparison by Tukey's test revealed a statistically significant difference in the samples with the following wheat vs. quinoa ratios: 100:0 and 75:25; 100:0 and 50:50; 100:0 and 25:75; 75:25 and 25:75.

Table 4. Total gliadin and gliadin by fractions in muffins made from 25% wheat flour and 75% quinoa flour, with absorbance measurement at 210 nm

Таблица 4. Общий глиадин и глиадин по фракциям в кексах с 25 % пшеничной муки и 75 % муки киноа (измерение оптической плотности проводилось при 210 нм)

Proteins	Storage time (weeks)	N	Average protein (X_{av})	Standard deviation	Standard error	Minima value	Maximal value
$\omega 5$ gliadins	0	3	2.67	1.15	0.67	2.00	4.00
	2	3	1.00	0	0	1.00	1.00
	4	3	2.00	0	0	2.00	2.00
$\omega 1,2$ gliadins	0	3	2.00	1.00	0.58	1.00	3.00
	2	3	1.67	1.15	0.67	1.00	3.00
	4	3	4.33	1.15	0.67	3.00	5.00
$\alpha + \beta$ gliadins	0	3	4.00	1.00	0.58	3.00	5.00
	2	3	3.00	1.00	0.58	2.00	4.00
	4	3	3.00	1.00	0.58	2.00	4.00
γ gliadins	0	3	5.67	0.58	0.33	5.00	6.00
	2	3	6.67	1.52	0.88	5.00	8.00
	4	3	7.00	1.00	0.58	6.00	8.00
Total proteins	0	3	14.33	0.58	0.33	14.00	15.00
	2	3	12.33	1.53	0.88	11.00	14.00
	4	3	16.33	0.58	0.33	16.00	17.00
ANOVA ($\omega 5$)	$F(2.6) = 4.75$, $\text{Sig.} = 0.06 > 0.05$, eta square = $4.22/6.89 = 0.61$						
ANOVA ($\omega 1,2$)	$F(2.6) = 5.18$, $\text{Sig.} = 0.05$, eta square = $12.67/20.00 = 0.63$						
ANOVA ($\alpha + \beta$)	$F(2.6) = 1.00$, $\text{Sig.} = 0.42 > 0.05$, eta square = $2.00/8.00 = 0.25$						
ANOVA (γ)	$F(2.6) = 1.18$, $\text{Sig.} = 0.37 > 0.05$, eta square = $2.89/10.22 = 0.28$						
ANOVA (TAP)	$F(2.6) = 12.00$, $\text{Sig.} = 0.008 < 0.05$, eta square = $24.00/30.00 = 0.80$						

Table 5. Total gliadin and gliadins by fractions in muffins made from wheat flour (100, 75, 50, and 25%) and quinoa flour (0, 25, 50, and 75%) stored for 0 weeks, with absorbance measurement at 210 nm

Таблица 5. Общий глиадин и глиадины по фракциям в кексах, изготовленных из пшеничной муки (100, 75, 50 и 25 %) и муки киноа (0, 25, 50 и 75 %), после 0 недель хранения (измерение оптической плотности проводилось при 210 нм)

Proteins	Wheat vs. quinoa, %	N	Average protein (Xav)	Standard deviation	Standard error	Minimal value	Maximal value
$\omega 5$ gliadins	100:0	3	4.00	1.00	0.58	3.00	5.00
	75:25	3	2.67	0.58	0.33	2.00	3.00
	50:50	3	3.00	0	0	3.00	3.00
	25:75	3	2.67	1.15	0.67	2.00	4.00
$\omega 1,2$ gliadins	100:0	3	2.67	0.58	0.33	2.00	3.00
	75:25	3	3.00	1.00	0.58	2.00	4.00
	50:50	3	1.67	1.15	0.67	1.00	3.00
	25:75	3	2.00	1.00	0.58	1.00	3.00
$\alpha + \beta$ gliadins	100:0	3	4.33	1.15	0.67	3.00	5.00
	75:25	3	5.00	1.00	0.58	4.00	6.00
	50:50	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
	25:75	3	4.00	1.00	0.58	3.00	5.00
γ gliadins	100:0	3	15.00	1.73	1.00	14.00	17.00
	75:25	3	8.33	1.15	0.67	7.00	9.00
	50:50	3	8.67	0.58	0.33	8.00	9.00
	25:75	3	5.67	0.58	0.33	5.00	6.00
Total proteins	100:0	3	26.00	1.73	1.00	25.00	28.00
	75:25	3	19.67	1.53	0.88	18.00	21.00
	50:50	3	17.00	2.65	1.53	14.00	19.00
	25:75	3	14.33	0.58	0.33	14.00	15.00
ANOVA ($\omega 5$)	F(3.8) = 1.79, Sig. = 0.23 > 0.05, eta square = 3.58/8.92 = 0.40						
ANOVA ($\omega 1,2$)	F(3.8) = 1.21, Sig. = 0.37 > 0.05, eta square = 3.33/10.67 = 0.31						
ANOVA ($\alpha + \beta$)	F(3.8) = 1.06, Sig. = 0.42 > 0.05, eta square = 2.92/10.25 = 0.28						
ANOVA (γ)	F(3.8) = 37.58, Sig. = 0.000 < 0.05, eta square = 140.92/150.92 = 0.93						
ANOVA (TAP)	F(3.8) = 23.67, Sig. = 0.000 < 0.05, eta square = 224.92/250.25 = 0.90						

Table 6 shows the total amount of gliadin proteins and the amount of protein per fraction in the muffin samples with wheat flour (100, 75, 50, and 25%) and quinoa flour (0, 25, 50, and 75%) after two weeks of storage.

In this experiment, gliadin protein was extracted from the muffin samples with wheat flour (100, 75, 50, and 25%) and quinoa flour (0, 25, 50, and 75%) after two weeks of storage. The highest amount of protein within the $\omega 5$ gliadin fraction was isolated from the samples without quinoa (Xav = 2.00) while the lowest came from the samples with the wheat vs. quinoa ratios of 50:50 and 25:75 (Xav = 1.00). As for $\omega 1,2$ gliadin, the highest amount of Xav = 3.67 was detected in the sample without quinoa, as well as in the sample with 75% wheat flour and 25% quinoa. The lowest amount within this fraction came from the samples with 25% wheat flour and 75% quinoa, equaling Xav = 1.67. The ANOVA test registered a statistical difference: F(3.8) = 4.71, Sig. = 0.03 < 0.05. According to the Tukey's HSD test, a statistically significant difference existed between the samples with the following wheat vs. quinoa ratios: 100:0 and 25:75; 75:25 and 25:75. The highest amount of protein within the $\alpha + \beta$ gliadin fraction was observed in the samples that

contained no quinoa (Xav = 6.00) while the lowest belonged to the samples with equal shares of wheat and quinoa flours and the samples with 25% wheat and 75% quinoa (Xav = 3.00). The ANOVA detected a statistically significant difference: F(3.8) = 8.00, Sig. = 0.008 < 0.05. According to the Tukey's HSD test, this statistically significant difference occurred between the samples with the following wheat vs. quinoa ratios: 100:0 and 50:50; 100:0 and 25:75. Within the γ gliadin fraction, the highest amount of protein was isolated from the samples with no quinoa and reached Xav = 8.67 whereas the lowest belonged to the samples with 25% wheat flour and 75% quinoa (Xav = 6.67). The highest total amount of proteins was extracted from the muffins cooked without quinoa (Xav = 20.33). The lowest total amount of proteins belonged to the samples with 25% wheat flour and 75% quinoa flour, being as low as Xav = 12.33. The ANOVA detected a statistical difference: F(3.8) = 14.22, Sig. = 0.001 < 0.05. A subsequent comparison by Tukey's HSD test showed that this statistically significant difference took place between the samples with the following wheat vs. quinoa ratios: 100:0 and 50:50; 100:0 and 25:75; 75:25 and 25:75.

Table 6. Total gliadin and gliadins by fractions in muffins with wheat flour (100, 75, 50, and 25%) and quinoa flour (0, 25, 50, and 75%) stored for 2 weeks, with absorbance measurement at 210 nm

Таблица 6. Общий глиадин и глиадины по фракциям в кексах, изготовленных из пшеничной муки (100, 75, 50 и 25 %) и муки киноа (0, 25, 50 и 75 %), после 2 недель хранения (измерение оптической плотности проводилось при 210 нм)

Proteins	Wheat vs. quinoa, %	N	Average protein (Xav)	Standard deviation	Standard error	Minimal value	Maximal value
$\omega 5$ gliadins	100:0	3	2.00	1.00	0.58	1.00	3.00
	75:25	3	1.67	0.58	0.33	1.00	2.00
	50:50	3	1.00	0	0	1.00	1.00
	25:75	3	1.00	0	0	1.00	1.00
$\omega 1,2$ gliadins	100:0	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
	75:25	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
	50:50	3	2.67	0.58	0.33	2.00	3.00
	25:75	3	1.67	1.15	0.67	1.00	3.00
$\alpha + \beta$ gliadins	100:0	3	6.00	1.00	0.58	5.00	7.00
	75:25	3	4.00	1.00	0.58	3.00	5.00
	50:50	3	3.00	0	0	3.00	3.00
	25:75	3	3.00	1.00	0.58	2.00	4.00
γ gliadins	100:0	3	8.67	1.15	0.67	8.00	10.00
	75:25	3	7.67	0.58	0.33	7.00	8.00
	50:50	3	7.33	0.58	0.33	7.00	8.00
	25:75	3	6.67	1.53	0.88	5.00	8.00
Total proteins	100:0	3	20.33	2.08	1.20	18.00	22.00
	75:25	3	17.33	1.53	0.88	16.00	19.00
	50:50	3	14.33	1.15	0.67	13.00	15.00
	25:75	3	12.33	1.53	0.88	11.00	14.00
ANOVA ($\omega 5$)	F(3.8) = 2.25, Sig. = 0.16 > 0.05, eta square = 2.25/4.92 = 0.46						
ANOVA ($\omega 1,2$)	F(3.8) = 4.71, Sig. = 0.03 < 0.05, eta square = 8.25/12.92 = 0.64						
ANOVA ($\alpha + \beta$)	F(3.8) = 8.00, Sig. = 0.008 < 0.05, eta square = 18.00/24.00 = 0.75						
ANOVA (γ)	F(3.8) = 1.92, Sig. = 0.20 > 0.05, eta square = 6.25/14.92 = 0.42						
ANOVA (TAP)	F(3.8) = 14.22, Sig. = 0.001 < 0.05, eta square = 110.25/130.92 = 0.84						

Table 7 shows the total amount of gliadin proteins and the amount of protein per fraction in the muffin samples with wheat flour (100, 75, 50, and 25%) and quinoa flour (0, 25, 50, and 75%) after four weeks of storage.

The highest amount of protein within the $\omega 5$ gliadin fraction belonged to the samples that contained no quinoa and reached $X_{av} = 2.33$. The lowest amount of protein was extracted from the samples with the following wheat vs. quinoa ratios: 100:0, 50:50, and 25:75 ($X_{av} = 2.00$). Within the $\omega 1,2$ gliadin fraction, the highest amount of protein was obtained from the samples with 25% wheat flour and 75% quinoa flour ($X_{av} = 4.33$) while the lowest came from the samples without quinoa ($X_{av} = 3.33$). As for gliadin $\alpha + \beta$, the highest amount of protein was isolated from the samples with 75% wheat flour and 25% quinoa flour ($X_{av} = 3.67$) whereas the lowest amount belonged to the samples with equal shares of the flours and the one with 25% wheat and 75% quinoa ($X_{av} = 3.00$). The highest amount of protein within the γ gliadin fraction was isolated from the samples that contained no quinoa ($X_{av} = 9.33$). The lowest amount of protein came from the samples with equal shares of wheat and quinoa ($X_{av} = 6.67$). The ANOVA recorded a statistical differ-

ence: $F(3.8) = 4.55$, Sig. = 0.04 < 0.05. The Tukey's test showed that the samples without quinoa and the sample with equal shares of the flour were significantly different. The highest total amount of proteins was extracted from the muffins that contained no quinoa flour ($X_{av} = 18.00$) whereas the lowest came from the samples with equal shares of both flours and equaled $X_{av} = 15.33$.

Bialek *et al.* could replace wheat flour with 33% pumpkin seed flour in muffins meant for children [17].

Bhaduri conducted a comprehensive study on the physical properties of gluten-free flour-fortified muffins [20]. Based on the obtained results, the muffins containing 100% rice flour and 75% rice flour + 25% quinoa flour were the softest and the most acceptable for consumers.

Kurek and Sokolova improved bread quality with quinoa flour of different particle sizes and percentages of wheat flour replacement [21]. The most suitable combination was 219 μm and 5.41%.

To our knowledge, no publications are available on the effect that replacing part of wheat flour with quinoa flour exerts on gliadin proteins in muffins. In this research, the highest amount of gliadin proteins was isolated from the muffin samples made from wheat flour

Table 7. Total gliadin and gliadin by fractions in muffins with wheat flour (100, 75, 50, and 25%) and quinoa flour (0, 25, 50, and 75%) stored for 4 weeks, with absorbance measurement at 210 nm

Таблица 7. Общий глиадин и глиадин по фракциям в кексах, изготовленных из пшеничной муки (100, 75, 50 и 25%) и муки киноа (0, 25, 50 и 75%), после 4 недель хранения (измерение оптической плотности проводилось при 210 нм)

Proteins	Wheat vs. quinoa, %	N	Average protein (Xav)	Standard deviation	Standard error	Minimal value	Maximal value
$\omega 5$ gliadins	100:0	3	2.00	1.00	0.58	1.00	3.00
	75:25	3	2.33	0.58	0.33	2.00	3.00
	50:50	3	2.00	0	0	2.00	2.00
	25:75	3	2.00	0	0	2.00	2.00
$\omega 1,2$ gliadins	100:0	3	3.33	0.58	0.33	3.00	4.00
	75:25	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
	50:50	3	3.67	0.58	0.33	3.00	4.00
	25:75	3	4.33	1.15	0.67	3.00	5.00
$\alpha + \beta$ gliadins	100:0	3	3.33	1.15	0.67	2.00	4.00
	75:25	3	3.67	1.15	0.67	3.00	5.00
	50:50	3	3.00	1.00	0.58	2.00	4.00
	25:75	3	3.00	1.00	0.58	2.00	4.00
γ gliadins	100:0	3	9.33	1.53	0.88	8.00	11.00
	75:25	3	8.33	0.58	0.33	8.00	9.00
	50:50	3	6.67	0.58	0.33	6.00	7.00
	25:75	3	7.00	1.00	0.58	6.00	8.00
Total proteins	100:0	3	18.00	2.00	1.15	16.00	20.00
	75:25	3	17.67	1.15	0.67	17.00	19.00
	50:50	3	15.33	0.58	0.33	15.00	16.00
	25:75	3	16.33	0.58	0.33	16.00	17.00
ANOVA ($\omega 5$)	F(3.8) = 0.25, Sig. = 0.86 > 0.05, eta square = 0.25/2.92 = 0.08						
ANOVA ($\omega 1,2$)	F(3.8) = 0.90, Sig. = 0.48 > 0.05, eta square = 1.58/6.25 = 0.25						
ANOVA ($\alpha + \beta$)	F(3.8) = 0.26, Sig. = 0.85 > 0.05, eta square = 0.92/10.25 = 0.09						
ANOVA (γ)	F(3.8) = 4.55, Sig. = 0.04 < 0.05, eta square = 13.67/21.67 = 0.63						
ANOVA (TAP)	F(3.8) = 3.04, Sig. = 0.09 > 0.05, eta square = 13.67/25.67 = 0.53						

only. We detected the lowest amount of gliadin proteins in the muffin samples made from 25% wheat flour and 75% quinoa.

Quinoa is rich in protein, but it is also gluten-free, so gliadin content was at its lowest in the samples with 25% wheat flour and 75% quinoa flour. In the samples with the wheat vs. quinoa ratios of 100:0, 75:25, and 50:50, the content of the gliadin protein decreased with the increase in the storage time (0, 2, and 4 weeks). However, the content of gliadin protein extracted from the samples with 25% wheat and 75% quinoa increased with time. This phenomenon can be explained by protein denaturation, modification of the amino acid chain, formation of protein polymers, reduction of protein solubility, aggregation, and carbonyl concentration increase [22]. Oxidized lysine, arginine, proline, and threonine can produce carbonyl derivatives, which, in their turn, can change the conformation of proteins, thus affecting their functional properties [23]. In the muffin samples with the wheat vs. quinoa ratios of 100:0, 75:25, 50:50, and 25:75, the total amount of protein decreased after 0 and 2 weeks of storage. However, the total amount of protein went up in the samples stored for 4 weeks.

Conclusion

In this study, we replaced part of wheat flour in muffins with quinoa flour and stored the obtained products for 0, 2, and 4 weeks. After extracting gliadin proteins, we obtained the following results. The highest amount of gliadin was isolated from the muffins that contained wheat flour only ($X_{av} = 26.00$). The lowest amount of protein was isolated from the muffin samples with 25% wheat flour and 75% quinoa flour ($X_{av} = 14.33$). The gliadin protein content decreased because quinoa is gluten-free, even though it is rich in protein. In the muffin samples with the wheat vs. quinoa ratios of 100:0, 75:25, and 50:50, the content of gliadin went down as the storage time reached four weeks. However, the samples with 25% wheat flour and 75% quinoa flour demonstrated an increase in the content of gliadin protein. The protein content decreased to the wheat vs. quinoa ratio of 50:50 during storage because of protein denaturation, modification of amino acid chains, formation of protein polymers, and low protein solubility.

Quinoa can be recommended to celiac disease patients because it is rich in proteins but contains no gluten. When we replaced part of wheat flour with qui-

noa flour in muffins, the amount of gliadin protein kept decreasing until the ratio of wheat flour and quinoa flour reached 50:50. The results obtained in this study could be a good starting point for the development of high-fiber, gluten-free, and more nutritionally valuable muffins.

Contribution

V.S. Gojković Cvjetković and Ž.R. Marjanović-Balaban developed the research concept, worked with the software. D.P. Vujadinović designed the methodology. D.M. Škuletić and D.Z. Rajić performed the formal analysis. V.S. Gojković Cvjetković is responsible for the data curation; the original draft belonged to V.S. Gojković Cvjetković and V.M. Tomović. V.S. Gojković Cvjetković, D.P. Vujadinović, and V.M. Tomović reviewed and edited the final version. All the authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflict of interest

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

Критерии авторства

В. С. Гойкович Цветкович и Ж. Р. Марьянович-Балабан – концепция исследования, программное обеспечение. Д. П. Вуядинович – методология исследования. Д. М. Шкулетич и Д. З. Раич – формальный анализ. В. С. Гойкович Цветкович – обработка данных. В. С. Гойкович Цветкович и В. М. Томович – первоначальный проект исследования. В. С. Гойкович Цветкович, Д. П. Вуядинович и В. М. Томович – редактирование окончательной версии статьи. Все авторы ознакомлены и согласны с итоговой версией рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

1. Rahaie S, Gharibzahedi SMT, Razavi SH, Jafari SM. Recent developments on new formulations based on nutrient-dense ingredients for the production of healthy-functional bread: A review. *Journal of Food Science and Technology*. 2014;51(11): 2896–2906. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0833-6>
2. Valková V, Ďuranová H, Havrlentová M, Ivanišová E, Mezey J, Tóthová Z, *et al.* Selected physico-chemical, nutritional, antioxidant and sensory properties of wheat bread supplemented with apple pomace powder as a by-product from juice production. *Plants*. 2022;11(9). <https://doi.org/10.3390/plants11091256>
3. Rajiv J, Soumya C, Indrani D, Rao Venkateswara G. Effect of replacement of wheat flour with finger millet flour (*Eleusine corcana*) on the batter microscopy, rheology and quality characteristics of muffins. *Journal of Texture Studies*. 2011;42(6):478–489. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2011.00309.x>
4. Kaur M, Singh B, Kaur A. Influence of different oilseed cake incorporation on batter rheology, proximate composition, texture, antioxidant and sensory properties of wheat flour muffins. *International Journal of Food Science and Technology*. 2022;57(11):7107–7115. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16050>
5. Ndinchout AS, Chattopadhyay D, Ascension NM, Kaur V, Singh N, Paul MF. Muffins fortified with *Dacryodes macrophylla* L. fruit: quality and sensory evaluation. *Foods and Raw Materials*. 2022;10(1):40–50. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-1-40-50>
6. Shewry P. What is gluten – Why is it special? *Frontiers in Nutrition*. 2019;6. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00101>
7. Gojković V, Marjanović-Balaban Ž, Grujić R, Vujadinović D, Vukić M. The influence of extraction and chromatographic separation on the ability to identify gliadins from the wheat flour. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2019; 26:118–126.
8. Schopf M, Wehrli MC, Becker T, Jekle M, Scherf KA. Fundamental characterization of wheat gluten. *European Food Research and Technology*. 2021;247:985–997.
9. Marjanović-Balaban Ž, Gojković Cvjetković V, Grujić R. Gliadin proteins from wheat flour: the optimal determination conditions by ELISA. *Foods and Raw Materials*. 2021;9(2):364–370. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-364-370>
10. de Bock P, Daelemans L, Selis L, Raes K, Vermeir P, Eeckhout M, *et al.* Comparison of the chemical and technological characteristics of wholemeal flours obtained from amaranth (*Amaranthus* sp.), quinoa (*Chenopodium quinoa*), and buckwheat (*Fagopyrum* sp.) seeds. *Foods*. 2021;10(3). <https://doi.org/10.3390/foods10030651>
11. Elsohaimy SA, Refaay TM, Zaytoun MAM. Physicochemical and functional properties of quinoa protein isolate. *Annals of Agricultural Sciences*. 2015;60(2):297–305. <https://doi.org/10.1016/j.a0as.2015.10.007>
12. Agrawal RS. Quinoa – supergrain of the future: A review. *The Pharma Innovation Journal*. 2018;7(11):249–251.
13. Bhathal S, Grover K, Gill N. Quinoa – a treasure trove of nutrients. *Journal of Nutrition Research*. 2015;3(1):45–49. <https://doi.org/10.55289/jnutres/v3i1.2>
14. Agarwal N, Kolba N, Khan N, Even C, Turjeman S, Koren O, *et al.* Quinoa soluble fiber and quercetin alter the composition of the gut microbiome and improve brush border membrane morphology in vivo (*Gallus gallus*). *Nutrients*. 2022; 14(3). <https://doi.org/10.3390/nu14030448>

15. Bazile D, Pulvento C, Verniau A, Al-Nusairi MS, Ba D, Breidy J, *et al.* Worldwide evaluations of quinoa: Preliminary results from post international year of quinoa FAO projects in nine countries. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00850>
16. The future of food and agriculture. Trends and challenges. Rome: FAO; 2017. 180 p.
17. Bialek M, Rutkowska J, Adamska A, Bajdalow E. Partial replacement of wheat flour with pumpkin seed flour in muffins offered to children. *CyTA – Journal of Food*. 2015;14(3):391–398. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1114529>
18. Wieser H, Antes S, Seilmeier W. Quantitative determination of gluten protein types in wheat flour by reversed-phase high-performance liquid chromatography. *Cereal Chemistry*. 1998;75(5):644–650. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.5.644>
19. Gojković Cvjetković V, Grujić R, Marjanović-Balaban Ž, Stanojević L, Stanojević JS, Cakić MD. Gliadin analysis by reversed-phase high performance liquid chromatography. *Advanced Technologies*. 2019;8(2):30–36. <https://doi.org/10.5937/savteh1902030G>
20. Bhaduri S. A comprehensive study on physical properties of two gluten-free flour fortified muffins. *Journal of Food Processing and Technology*. 2013;4(7). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000251>
21. Kurek MA, Sokolova N. Optimization of bread quality with quinoa flour of different particle size and degree of wheat flour replacement. *Food Science and Technology*. 2020;40(2):307–314. <https://doi.org/10.1590/fst.38318>
22. Savanović D, Grujić R. Protein changes during freezing and storage meat and products from meat. *Veterinary Journal of the Republic of Srpska*. 2017;17(1):105–118.
23. Stevanović J, Borozan S, Božić T, Jovičić S, Đekić T, Dimitrijević B. Oxidative stress. *Veterinarski Glasnik*. 2012; 66(3–4):273–283.

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2491>
<https://elibrary.ru/KCTXZN>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Математическая модель процесса СВЧ и конвективной выпечки хлеба из сбивного теста



А. А. Хвостов^{1,2}, Г. О. Магомедов²,
В. И. Ряжских^{1,3}, А. А. Журавлев³, М. Г. Магомедов^{2,*},
И. В. Плотникова², А. С. Таратухин²

¹ Воронежский государственный технический университет^{ROR}, Воронеж, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий^{ROR}, Воронеж, Россия

³ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Воронеж, Россия

Поступила в редакцию: 01.12.2022

Принята после рецензирования: 25.05.2023

Принята к публикации: 06.06.2023

*М. Г. Магомедов: mtmg@inbox.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-2494-4973>

А. А. Хвостов: <https://orcid.org/0000-0002-3836-9407>

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

В. И. Ряжских: <https://orcid.org/0000-0002-2834-3000>

А. А. Журавлев: <https://orcid.org/0000-0002-2194-767X>

И. В. Плотникова: <https://orcid.org/0000-0001-5959-6652>

А. С. Таратухин: <https://orcid.org/0000-0002-9880-9726>

© А. А. Хвостов, Г. О. Магомедов, В. И. Ряжских, А. А. Журавлев,
М. Г. Магомедов, И. В. Плотникова, А. С. Таратухин, 2024



Аннотация.

При выпечке сбивных бездрожжевых хлебобулочных изделий актуальным является внедрение эффективных источников подвода энергии к тестовым заготовкам для снижения энергозатрат и продолжительности выпечки, а также для повышения качества изделий. Целью работы являлась формализация математической модели процесса СВЧ и конвективной выпечки хлеба из сбивного теста на основе основных уравнений тепломассообмена и ее верификация.

Для проверки точности расчетов по разработанной математической модели провели натурный эксперимент. Он заключался в оценке нагрева сбивных тестовых заготовок влажностью 56 ± 1 % при СВЧ и конвективной выпечке до достижения температуры в центре мякиша хлеба 98 ± 1 °С.

Математическая модель выпечки формализована в виде уравнений сохранения энергии и массы. Это позволяет рассматривать процесс выпечки хлеба как нестационарный процесс тепло- и массопереноса влаги в изотропной несжимаемой сплошной среде в диффузионном приближении с учетом подвижной границы фазового перехода. Верификация математической модели показала, что оценка средней относительной погрешности составила для СВЧ-выпечки 14,5 % по температуре и 18,2 % по влагосодержанию, для конвективной выпечки 12,6 % по температуре и 9,7 % по влагосодержанию. Проведенные исследования позволили сделать вывод о адекватности математической модели реальным процессам тепломассообмена, а также приемлемой для оптимизации процесса погрешности расчета полей температуры и влагосодержания.

Разработанная физико-математическая модель процесса выпечки позволяет оценить динамику температурных и влагон-концентрационных полей в тестовой заготовке в зависимости от технологических параметров. Математическая модель и результаты вычислительных экспериментов могут быть использованы для идентификации статических и динамических характеристик процесса выпечки как объекта автоматического управления, выявления предпочтительных каналов управления и выбора управляющих воздействий, а также для синтеза системы автоматического управления процессом выпечки по заданным показателям качества.

Ключевые слова. Хлеб, сбивное тесто, хлебный мякиш, хлебная корка, СВЧ-выпечка, конвективная выпечка, тепломассоперенос, математическое моделирование, задача Стефана

Финансирование. Работа выполнена на базе Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ)^{ROR}.

Для цитирования: Математическая модель процесса СВЧ и конвективной выпечки хлеба из сбивного теста / А. А. Хвостов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 93–103. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2491>

Microwave-Convective Processing of Whipped Bread: Mathematical Modeling



Anatoly A. Khvostov^{1,2}, Gazibeg O. Magomedov²,
Victor I. Ryazhskih^{1,3}, Aleksey A. Zhuravlev³,
Magomed G. Magomedov^{2,*}, Inessa V. Plotnikova²,
Aleksei S. Taratukhin²

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

² Voronezh State University of Engineering Technologies^{ROR}, Voronezh, Russia

³ Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia

Received: 01.12.2022

Revised: 25.05.2023

Accepted: 06.06.2023

*Magomed G. Magomedov: mmg@inbox.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2494-4973>

Anatoly A. Khvostov: <https://orcid.org/0000-0002-3836-9407>

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

Victor I. Ryazhskih: <https://orcid.org/0000-0002-2834-3000>

Aleksey A. Zhuravlev: <https://orcid.org/0000-0002-2194-767X>

Inessa V. Plotnikova: <https://orcid.org/0000-0001-5959-6652>

Aleksei S. Taratukhin: <https://orcid.org/0000-0002-9880-9726>

© A.A. Khvostov, G.O. Magomedov, V.I. Ryazhskih, A.A. Zhuravlev,
M.G. Magomedov, I.V. Plotnikova, A.S. Taratukhin, 2024



Abstract.

Whipped yeast-free bakery products require effective energy supply to dough in order to optimize energy consumption, baking time, and quality. This article introduces a verified mathematical model of microwave and convective baking for whipped bread based on heat and mass exchange equations.

A full-scale experiment to verify the calculations involved dough samples with a humidity of $56 \pm 1\%$. The samples underwent microwave and convective processing until the temperature in the crumb center reached $98 \pm 1^\circ\text{C}$.

The mathematical model was formalized as energy and mass conservation equations, which made it possible to consider baking as a non-stationary process of heat and mass transfer of moisture in an isotropic incompressible continuous medium in the diffusion approximation. The equation took into account the unstable phase transition boundary. The practical verification showed the mean error for microwave baking as 14.5% in temperature and 18.2% in moisture content. For convective baking, the results included 12.6% in temperature and 9.7% in moisture content. The mathematical model proved adequate to the real processes of heat and mass transfer. The error in calculating the temperature and moisture content fields was sufficient to optimize the process.

The physical and mathematical model of the baking process made it possible to evaluate the effect of technological variables on the temperature and moisture concentration fields in the dough samples. The mathematical model and the computational experiment can be used to identify static and dynamic characteristics of baking as an object of automatic control, i.e., to identify optimal control channels and actions, as well as to adjust the automatic control system to specific quality indicators.

Keywords. Bread, aerated dough, bread crumb, bread crusts, microwave baking, convection baking, heat and mass transfer, mathematical modeling, Stefan problem

Funding. The research was performed on the premises of the Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET)^{ROR}.

For citation: Khvostov AA, Magomedov GO, Ryazhskih VI, Zhuravlev AA, Magomedov MG, Plotnikova IV, et al. Microwave-Convective Processing of Whipped Bread: Mathematical Modeling. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1): 93–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2491>

Введение

Процесс выпечки хлебобулочных изделий традиционными способами характеризуется энергозатратами, длительностью технологического процесса,

металлоемкостью оборудования и большими производственными площадями [1]. Поэтому актуальной задачей является внедрение эффективных источников подвода энергии к тестовым заготовкам для снижения

энергозатрат и продолжительности, а также для повышения качества при выпечке сбивных бездрожжевых хлебобулочных изделий.

Существуют различные механизмы генерации и подвода тепловой энергии, которая вызывает интенсивный нагрев выпекаемой тестовой заготовки: подвод тепловой энергии извне (радиационно-конвективная выпечка с подводом сухого или увлажненного воздуха); выделение тепла в объеме заготовки (электроконтактный прогрев или прогрев в электрическом поле токов высокой и сверхвысокой частоты (СВЧ)); комбинирование режимов выпечки [2, 3]. В работе Г. О. Магомедова и др. предложен комбинированный СВЧ и конвективный нагревы [4]. Сокращение времени выпечки достигается за счет интенсивного СВЧ-нагрева, а формирование показателей качества хлебобулочных изделий (вкус, запах, цвет, структура корки и мякиша) происходит путем оптимального сочетания интенсивности и продолжительности воздействия СВЧ и конвективного режимов выпечки в одном технологическом цикле.

Для идентификации оптимальных технологических режимов выпечки без использования натурных экспериментов необходима математическая модель процессов тепломассообмена в тестовой заготовке. Данная модель позволяет оценить динамику температурных и влажно-концентрационных полей в тестовой заготовке в зависимости от технологических параметров выпечки (масса и геометрия заготовки, ее начальная температура и влагосодержание, температура в печи, удельная мощность СВЧ-излучения, время выпечки при конвективном, СВЧ или комбинированном режимах).

Основные подходы к построению математических моделей процесса выпечки подробно изложены и систематизированы в работе Е. Purlis и др. [5]. Условно их можно разделить на группы:

1. Моделирование сопряженных процессов тепломассопереноса в пористой среде [6, 7]. Может учитываться фазовый переход, механизмы капиллярной и молекулярной диффузии, термодиффузии, многофазное течение в пористой среде (вода, пар, углекислый газ) [8–10];

2. Моделирование сопряженных процессов тепломассопереноса в сплошной среде, которая разделена на две зоны, соответствующие мякишу и корке заготовки. Раздел происходит на линии «фронта кипения» (evaporation front) при 100 °С [11]. В зоне мякиша слабо изменяется влагосодержание и температура асимптотически стремится к 100 °С, в зоне корки влагосодержание мало, а температура стремится к температуре пекарной камеры. Задача формулируется как тепломассообмен с фазовым переходом с подвижной границей (задача Стефана) [12];

3. Осреднение теплофизических свойств по объему тестовой заготовки дает возможность получить простые математические модели динамики температуры и влагосодержания тестовой заготовки в процессе выпечки относительно интегральных характеристик

в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, которые могут использоваться для отладки алгоритмов управления процессом выпечки, приближенной оценки продолжительности выпечки или подсистемы в иерархии более сложных математических моделей, включающих в себя пространство пекарной камеры, хлебопекарную форму, под печи и т. д. [13].

Модельное представление процессов тепломассопереноса в тестовой заготовке в ходе выпечки при допущении сплошности сред в области мякиша и корки и их сопряжение, формализованное в виде задачи Стефана, дает соответствие эксперименту и, несмотря на феноменологическое толкование основных теплофизических, массообменных и биохимических процессов, которые протекают в объекте моделирования, отражает основные закономерности процесса выпечки [11, 12].

Этот подход является компромиссом между детализацией теплофизических и биохимических процессов, которые происходят в тестовой заготовке в ходе выпечки, и качественно верным и приемлемым по точности описания экспериментальных данных подходом на основе задачи Стефана.

Целью работы являлась формализация математической модели процесса СВЧ и конвективной выпечки хлеба из сбивного теста на основе основных уравнений тепломассообмена, а также ее верификация.

Объекты и методы исследования

Для проверки точности расчетов по разработанной математической модели провели натурный эксперимент. Он заключается в оценке нагрева сбивных тестовых заготовок влажностью $56 \pm 1\%$ из муки цельнозернового зерна пшеницы при СВЧ и конвективной выпечке с различной интенсивностью и длительностью нагрева в микроволновой печи марки Panasonic NN-CSS 965 и кондитерской печи с электрообогревом PFS-9E до достижения температуры в центре мякиша хлеба 98 ± 1 °С. Температуру сбивного теста в центре мякиша при его нагреве контролировали с помощью термодатчика ОВЕН ДТПЛ054 и регистратора ТРМ-200 через заданные промежутки времени.

Математическая модель процесса выпечки хлеба формализует нестационарный процесс тепло- и массообмена влаги в изотропной несжимаемой сплошной среде в диффузионном приближении с учетом подвижной границы фазового перехода. Фазовый переход учитывает как баланс тепла, затрачиваемого на испарение, через скачкообразное изменение энтальпии при температуре фазового перехода и соответствующее изменение теплоемкости, так и учет потери массы жидкой фазы в граничном условии уравнения сохранения массы. Предполагается конвективный теплообмен и теплообмен излучением в ИК-спектре на границах σ_1 , а также температура основания T_{base} и массоизоляция на нижней поверхности заготовки σ_2 . Тепловой инерционностью силиконовой формы для выпечки на боковых поверхностях из-за ее малой

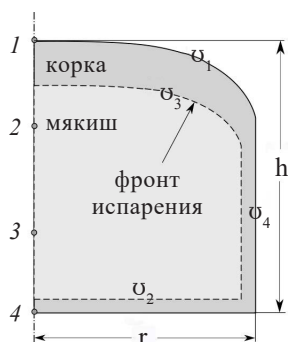


Рисунок 1. Расчетная область моделирования

Figure 1. Computational domain

толщины (0,5 мм) пренебрегаем, на границе u_4 только конвективный теплообмен и массоизоляция, на нижней поверхности принят идеальный тепловой контакт с поверхностью без учета тепловой инерционности формы. Подвод тепла за счет СВЧ-энергии осуществляется по всему объему заготовки. На рисунке 1 представлена расчетная область моделирования в виде поперечного сечения тестовой заготовки.

Для решения задачи использовали метод сквозного счета, который позволяет не выделять границу раздела фаз и использовать общее уравнение во всей расчетной области с разрывными (эффективными) коэффициентами на межфазных границах.

Результаты и их обсуждение

Математическая модель. Уравнения сохранения энергии и массы при заданных условиях и допущениях принимают вид [14]:

$$\begin{cases} \rho_{\text{eff}}(T) c_{p,\text{eff}}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k_{\text{eff}}(T) \nabla T + Q_{mw}; \\ \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla \cdot D_{\text{eff}}(T) \nabla W \end{cases} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$T|_{t=0} = T_0, \quad W|_{t=0} = W_0 \quad (2)$$

с граничными условиями на u_5 :

$$-k_{\text{eff}}(T) \nabla T = \alpha(T_{\text{Amb}} - T_S) + \sigma \varepsilon (T_{\text{Amb}}^4 - T_S^4) \quad (3)$$

$$-D_{\text{eff}}(T) \rho_S \nabla W = \beta [W_{\text{Amb}}(T_{\text{Amb}}) - W_S] \quad (4)$$

$$\text{на } u_2: \quad T = T_{\text{base}}, \quad \frac{\partial W}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

$$\text{на } u_4: \quad -k_{\text{eff}}(T) \nabla T = \alpha(T_S - T_{\text{Amb}}), \quad \frac{\partial W}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

где t – время, с; T – температура, К; W – влагосодержание, безразм.; ρ_{eff} – плотность, кг/м³; $c_{p,\text{eff}}$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); k_{eff} – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); D_{eff} – коэффициент диффузии,

м²/с; T_0 – начальная температура, К; W_0 – начальное влагосодержание, безразм.; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_S, T_{Amb} – температура поверхности заготовки и окружающего воздуха, К; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); ε – степень черноты поверхности хлебной заготовки, доля ед.; β – коэффициент массоотдачи, м²/с; W_S, W_{Amb} – влагосодержание поверхности заготовки и окружающего воздуха, безразм.; $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали к расчетной поверхности, м; Q_L – удельная скрытая теплота парообразования, Дж/м³; $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ – скорость движения границы раздела областей, м/с; Q_{mw} – удельная поглощенная мощность за счет подводимой СВЧ-энергии нагрева, Вт/м³.

Пренебрегая затуханием электромагнитного поля в нагреваемом образце, удельную поглощенную мощность за счет подводимой СВЧ-энергии нагрева можно записать как [15]

$$Q_{mw} = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega |E|^2 \quad (7)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м ($\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м); ε'' – коэффициент диэлектрических потерь в материале, безразм.; ω – частота излучения, Гц; E – напряженность электрического поля, В/м.

При выпечке имеет место фазовый переход жидкость-пар. Теплофизические параметры тестовой заготовки при температуре фазового перехода меняются скачкообразно, а функциональные зависимости этих параметров от температуры терпят разрыв. Устранение разрыва и получение гладких аппроксимирующих функций (эффективных коэффициентов) осуществили с помощью модифицированных сглаженных функций Хэвисайда и Дирака [16].

Условие Стефана на границе раздела расчетных областей учитывалось с помощью эффективной теплоемкости среды

$$c_{p,\text{eff}}(T) = c_p(T) + Q_L \delta(T - T^*) \quad (8)$$

где T^* – температура перехода, δ – дельта-функция.

Функциональные зависимости для разрывных коэффициентов с использованием значений теплофизических свойств тестовой заготовки в сопрягаемых областях по данным [17, 18]:

$$\rho_{\text{eff}} \approx 180,61 + \frac{321,31 - 180,61}{1 + e^{-8(T - 373,15)}} \quad (9)$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{0,9}{1 + e^{-0,1(T - 353,16)}} \times \tilde{\theta}(T) + 0,2 \quad (10)$$

$$c_{p,\text{eff}} = 5T + 5 + 1000W \left(5,207 - 73 \times 10^{-4}T + 1,35 \times 10^{-5}T^2 \right) + WQ_L \tilde{\delta}(T - T^*) \quad (11)$$

$$D_{\text{eff}}(T) = 1 \times 10^{-10} + \frac{f_{\text{crust}} 2,28 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.8} - 1 \times 10^{-10}}{1 + e^{-8(T-T^*)}} \quad (12)$$

где f_{crust} – коэффициент, характеризующий снижение диффузии в корке; $\tilde{\theta}(T)$ – модифицированная «сглаженная» функция Хэвисайда:

$$\tilde{\theta}(T) = \theta_{Up} + \frac{\theta_{Low} - \theta_{Up}}{1 + e^{-2s(T-T^*)}} \quad (13)$$

где θ_{Low} , θ_{Up} – верхнее и нижнее значения функции, «сглаженная» δ -функция

$$\tilde{\delta}(T) = \frac{k_{\text{norm}}}{d\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-T^*)^2}{2d^2}} \quad (14)$$

где s , d – характеристика ширины транзитного перехода; k_{norm} – коэффициент нормировки.

Разработанная математическая модель позволила оценить динамику температурных и влажно-концентрационных полей в тестовой заготовке, их зависимость от технологических параметров выпечки (массы и геометрии заготовки, ее начальной температуры и влагосодержания, температуры в печи, удельной мощности СВЧ-излучения, времени выпечки при конвективном, СВЧ или комбинированном режимах).

Массу заготовки m оценивали по начальной массе, а также по начальному и текущему среднееинтегральному объему влагосодержания тестовой заготовки

$$m = m_{\text{init}} \left(\frac{1 - \bar{W}_0}{1 - \bar{W}} \right) \quad (15)$$

где $\bar{W} = \frac{1}{V} \int_V W(x, y, z) dx dy dz$;

m_{init} – начальная масса тестовой заготовки, кг; V – объем заготовки, м³.

Вычислительные эксперименты. Для верификации разработанной математической модели провели вычислительные эксперименты в среде Comsol Multiphysics. Для решения системы дифференциальных уравнений использовали адаптивную сетку размером порядка 5000 элементов, метод конечных элементов и прямой решатель на основе алгоритма PARADISO.

Моделирование СВЧ-режима выпечки (вычислительный эксперимент № 1). В качестве контролируемых параметров приняты температура и влагосодержание, значения которых оценивались в контрольных точках: 1 – верхняя поверхность тестовой заготовки (корка); 2 – верхняя часть мякиша; 3 – нижняя часть мякиша; 4 – точка на расстоянии 1 мм от нижней точки тестовой заготовки (рис. 2). Исходные данные для моделирования приведены в таблице 1. Изменение

Таблица 1. Исходные данные вычислительного эксперимента № 1

Table 1. Computational experiment 1: input data

№ п/п	Параметр	Значение	Единица измерения
1	Радиус заготовки, г	60	мм
2	Высота заготовки, h	65	мм
3	Начальное влагосодержание	0,56	безразм.
4	Мощность СВЧ-нагрева	400	Вт
5	Масса	0,500	кг

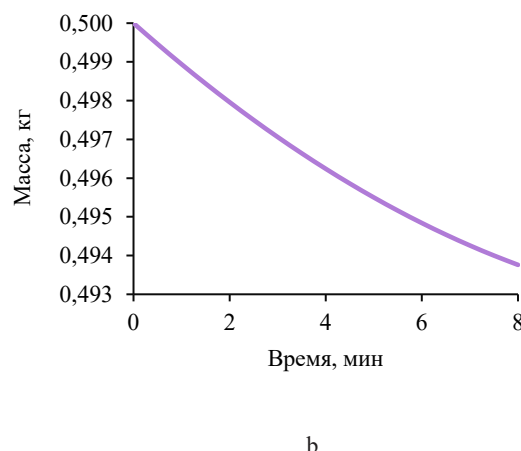
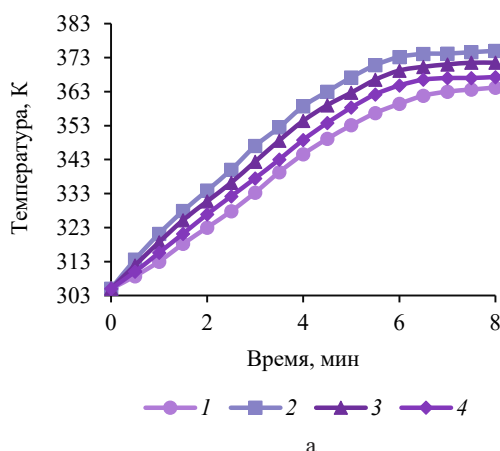


Рисунок 2. Изменение температуры тестовой заготовки в контрольных точках (а) и массы тестовой заготовки (б)

Figure 2. Dough temperatures at check points (a); dough mass (b)

температурного поля и поля влагосодержания при СВЧ-выпечке представлены на рисунке 3.

Представленные данные по СВЧ-нагреву согласуются с экспериментальными данными, представленными в литературе [15, 19].

Из графиков изменения температуры тестовой заготовки в контрольных точках видно, что разработанная математическая модель СВЧ-выпечки тестовых заготовок качественно верно описывает основные закономерности процесса. Также характер изменения температуры близок к линейному и происходит в контрольных точках с практически идентичной скоростью (рис. 2а). Рост температуры замедляется в области фронта испарения, где начинается поглощение тепла, необходимого для фазового перехода «вода-пар» (рис. 2а). По мере прогрева заготовки пространствен-

ная неоднородность температуры увеличивается. Это обусловлено повышением интенсивности охлаждающего конвективного теплообмена с окружающим воздухом за счет возрастающего температурного градиента. Центр тестовой заготовки прогревается быстрее за счет его отдаленности от поверхности, которая граничит с окружающим более холодным воздухом (рис. 2а). Снижение массы заготовки происходит практически линейно, но наблюдается небольшое снижение скорости убыли массы в ходе процесса выпечки (рис. 2б). Из графиков изотерм (рис. 3а и с) видно, что фронт испарения (100 °С) формируется в центре тестовой заготовки и перемещается к поверхности, не формируя область корки с низким влагосодержанием (рис. 3б и d).

Моделирование конвективного режима выпечки (вычислительный эксперимент № 2). Контроль тем-

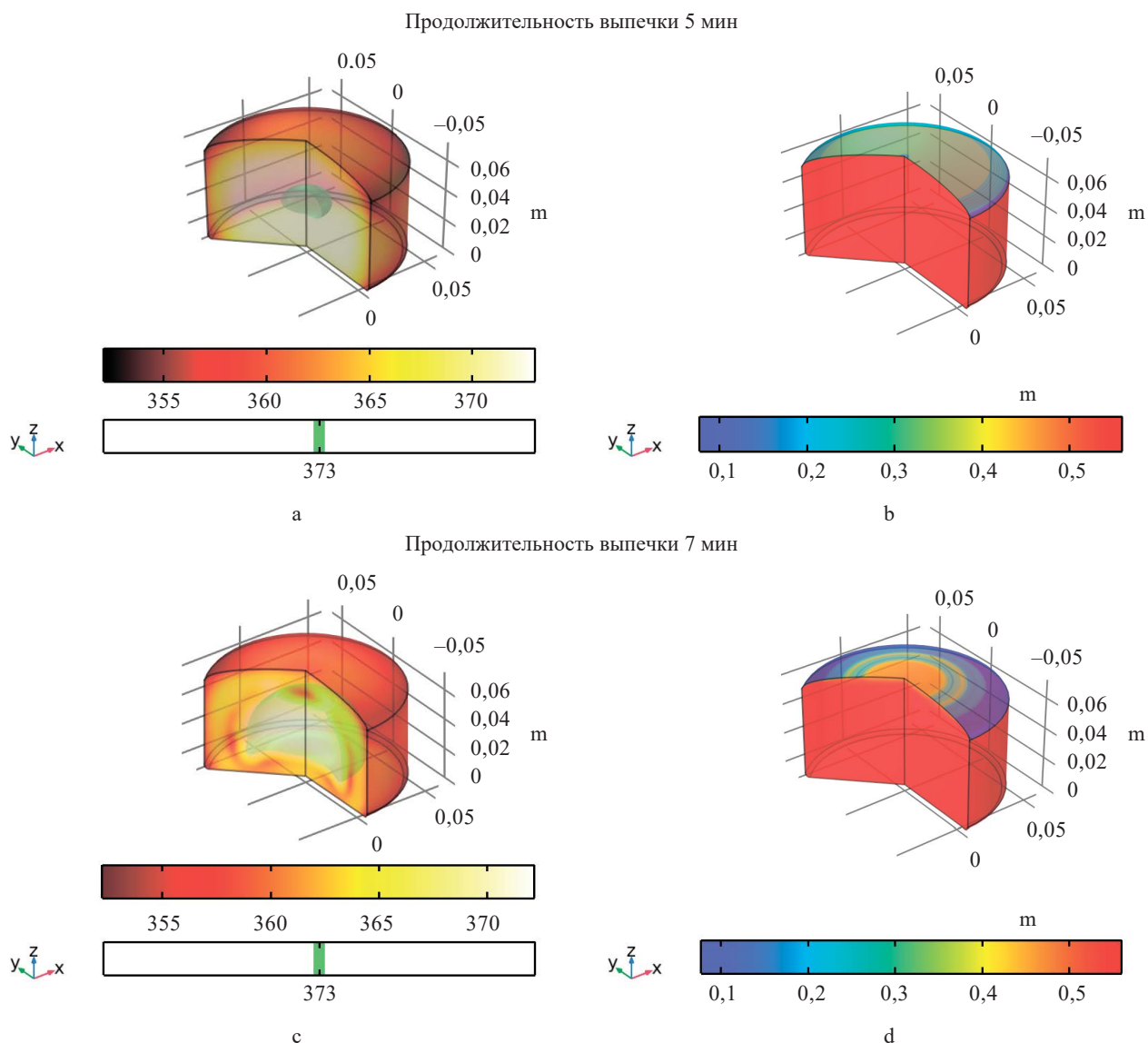


Рисунок 3. Изменение температурного поля (а и с) и поля влагосодержания (b и d) при СВЧ-выпечке

Figure 3. Temperature (a, c) and moisture (b, d) during microwave baking

пературы осуществлялся в тех же контрольных точках тестовой заготовки, что и в эксперименте № 1 (рис. 4). Исходные данные для моделирования приведены в таблице 2. На рисунке 5 представлены результаты изменения температурного поля и поля влагосодержания при конвективной выпечке.

Результаты вычислительных экспериментов конвективного нагрева согласуются с экспериментальными данными, представленными в работах [8–13, 17, 18, 20].

Из графиков изменения температуры тестовой заготовки в контрольных точках видно, что разработанная математическая модель конвективной выпечки тестовых заготовок качественно верно описывает основные закономерности процесса. Температура в центре заготовки до 15 мин выпечки практически не увеличивается. Это связано с начальной стадией формирования градиента температур по толщине заготовки. В интервале от 15 до 35 мин наблюдается характерный рост температуры в центре тестовой заготовки, обусловленный ее прогревом за счет сформировавшегося температурного градиента (рис. 4а). Затем рост температуры прекращается, т. к. ее значение приближается к температуре испарения воды, где начинается поглощение тепла, необходимого для фазового перехода «вода-пар» (рис. 4а). Наблюдается монотонное уменьшение массы заготовки, вызванное диффузией влаги за пределы

тестовой заготовки (рис. 4б). На поверхности тестовой заготовки в первую минуту нагрева происходит резкий рост температуры за счет большого температурного напора. После прогрева поверхности и подповерхностной области температурный напор снижается. Дальнейшее изменение температуры носит квазилинейный характер (рис. 4а). Из графиков (рис. 5а и с) видно, что фронт испарения (100 °С) формируется на поверхности тестовой заготовки и перемещается вглубь, моделируя область корки с низким влагосодержанием (рис. 5b и d).

Вычислительный эксперимент № 3 заключался в верификации математической модели на основе данных натурального эксперимента (табл. 3, рис. 6–9).

Представленная математическая модель позволяет моделировать различные сочетания этапов выпечки, достигая необходимого эффекта. Оценка средней относительной погрешности составила для СВЧ-выпечки 14,5 % по температуре и 18,2 % по влагосодержанию, для конвективной выпечки 12,6 % по температуре и 9,7 % по влагосодержанию. Проведенные исследования позволили сделать вывод об адекватности математической модели реальным процессам теплообмена, а также о приемлемой для оптимизации процесса погрешности расчета полей температуры и влагосодержания.

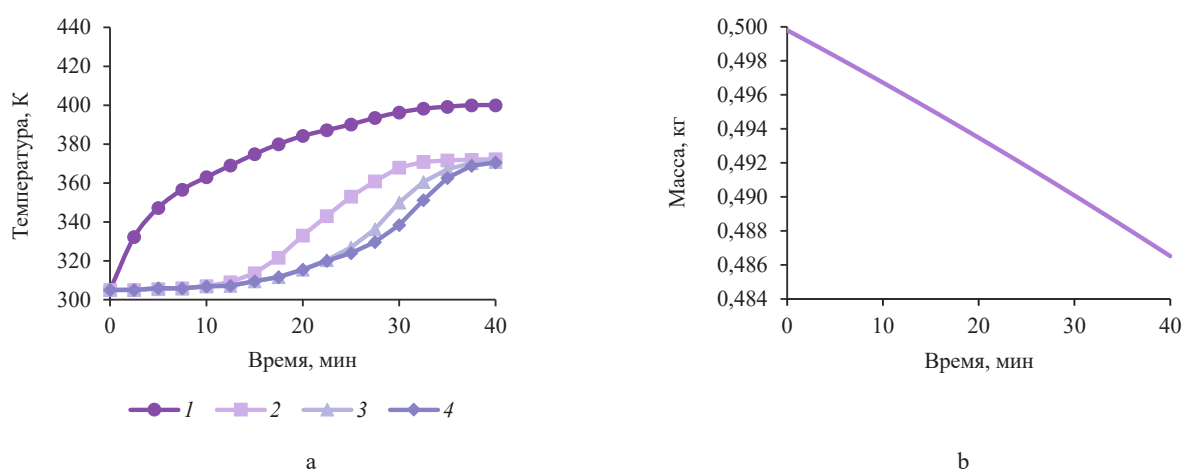


Рисунок 4. Изменение температуры тестовой заготовки в контрольных точках (а) и массы тестовой заготовки (б)

Figure 4. Dough temperatures at check points (a); dough mass (b)

Таблица 2. Исходные данные вычислительного эксперимента № 2

Table 2. Computational experiment 2: input data

№ п/п	Параметр	Значение	Единица измерения
1	Радиус заготовки	60	мм
2	Высота заготовки	65	мм
3	Начальное влагосодержание	0,56	безразм.
4	Температура в пекарной камере	493	К
5	Масса	0,500	кг

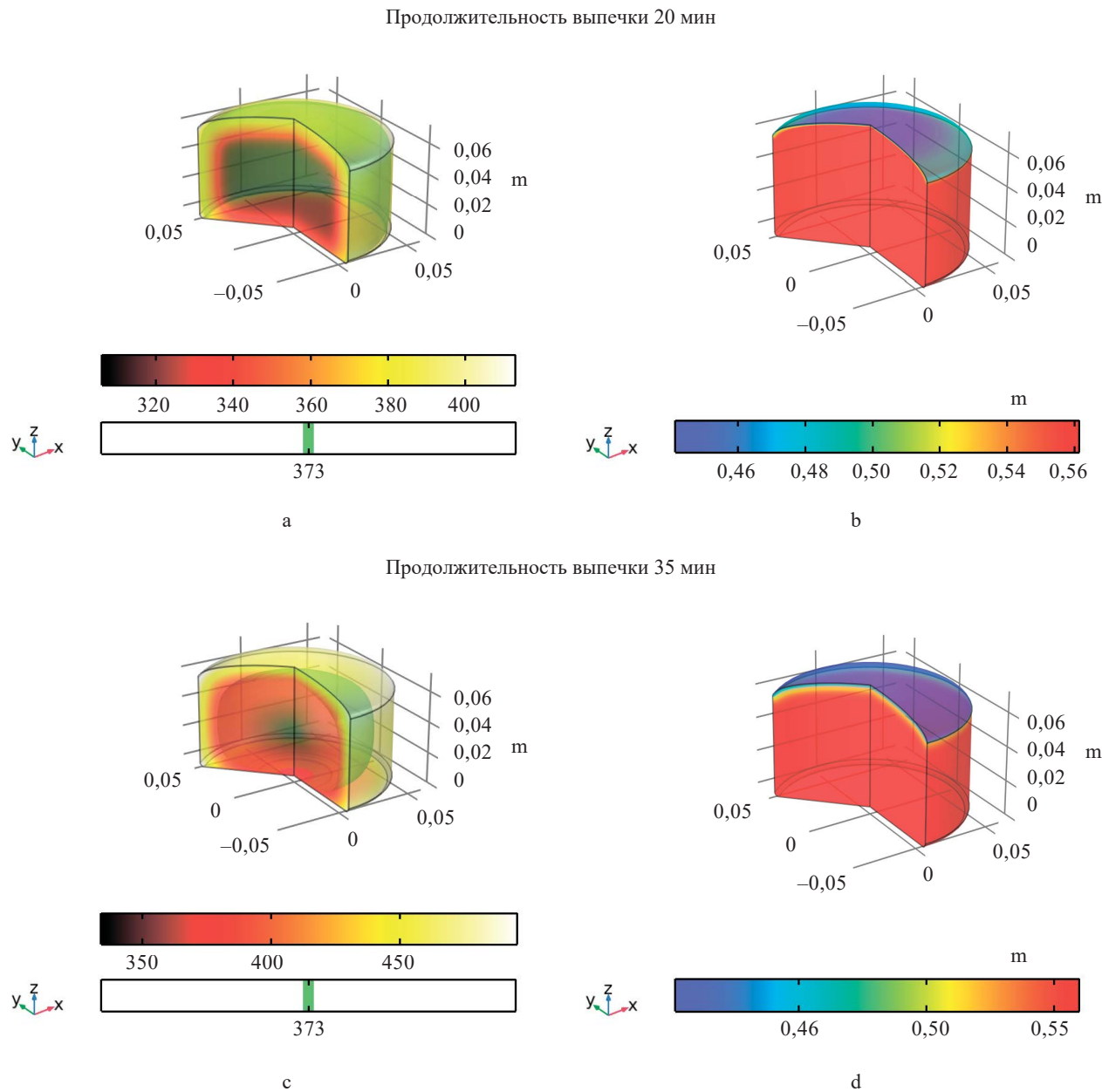


Рисунок 5. Изменение температурного поля (а и с) и поля влагосодержания (b и d) при конвективной выпечке

Figure 5. Temperature (a, c) and moisture (b, d) during convective baking

Таблица 3. Исходные данные вычислительного эксперимента № 3

Table 3. Computational experiment 3: input data

№ п/п	Параметр	Значение	Единица измерения
1	Радиус заготовки	60	мм
2	Высота заготовки	65	мм
3	Начальное влагосодержание	0,56	безразм.
5	Мощность СВЧ-излучателя	400 1000	Вт
6	Температура в пекарной камере	453 493	К
7	Масса	0,5	кг

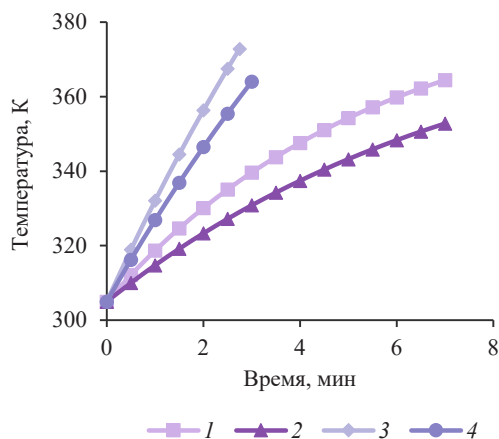


Рисунок 6. Изменение температуры при мощности СВЧ-нагрева: 1 – мякиш, 400 Вт; 2 – корка, 400 Вт; 3 – мякиш, 1000 Вт; 4 – корка, 1000 Вт (графические пиктограммы – экспериментальные значения)

Figure 6. Temperatures during microwave processing: 1 – crumb, 400 W; 2 – crust, 400 W; 3 – crumb, 1,000 W; 4 – crust, 1,000 W; pictograms illustrate experimental values

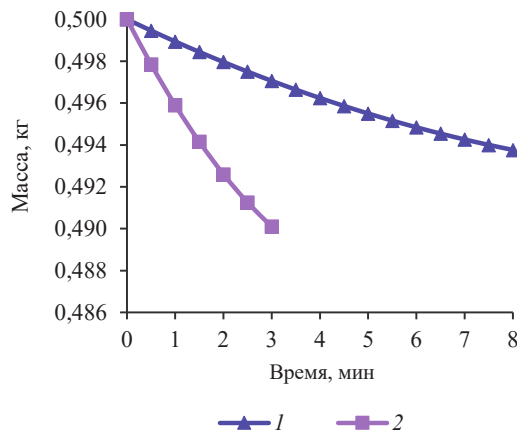


Рисунок 7. Изменение массы тестовой заготовки при мощности СВЧ-нагрева: 1 – 400 Вт; 2 – 1000 Вт (графические пиктограммы – экспериментальные значения)

Figure 7. Dough mass during microwave processing: 1 – 400 W; 2 – 1,000 W; pictograms illustrate experimental values

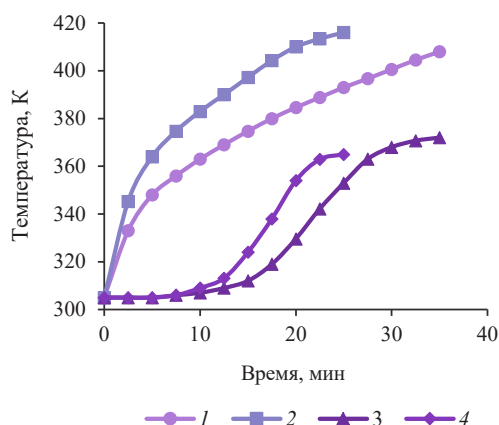


Рисунок 8. Изменение температуры при конвективном нагреве: 1 – корка, 453 К; 2 – корка, 493 К; 3 – мякиш, 453 К; 4 – мякиш, 493 К (графические пиктограммы – экспериментальные значения)

Figure 8. Temperature during convective heating: 1 – crust, 453 K; 2 – crust, 493 K; 3 – crumb, 453 K; 4 – crumb, 493 K; pictograms illustrate experimental values

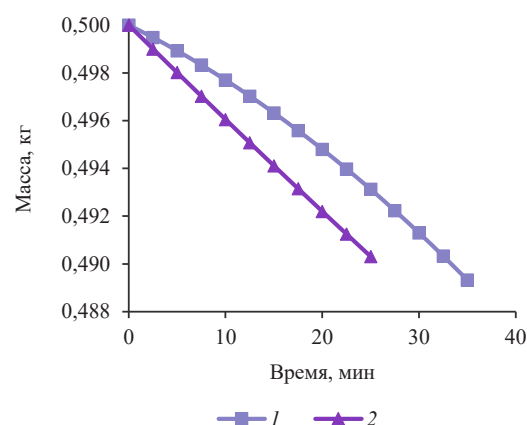


Рисунок 9. Изменение массы тестовой заготовки при конвективном нагреве: 1 – 453 К; 2 – 493 К (графические пиктограммы – экспериментальные значения)

Figure 9. Dough mass during convective heating: 1 – 453 K; 2 – 493 K; pictograms illustrate experimental values

Выводы

Разработали физико-математическую модель процесса СВЧ и конвективной выпечки сбивного бездрожжевого хлебобулочного изделия. Данная модель отличается учетом СВЧ и конвективного подвода энергии, введением двух сопряженных областей мякиша и корки, разделенных границей фазового перехода, для которых решалась задача тепломассообмена с подвижной границей раздела фаз, и эффективных теплофизических параметров, сопрягаемых на границе «сглаженными» функциями Хэвисайда на основе

логистической функции, а также скачка теплоемкости, формализованного «сглаженной» дельта-функцией на основе функции Гаусса.

Разработанная физико-математическая модель процесса СВЧ и конвективной выпечки сбивного бездрожжевого хлебобулочного изделия позволяет оценить динамику температурных и влажно-концентрационных полей в тестовой заготовке в зависимости от технологических параметров выпечки (массы и геометрии заготовки, ее начальной температуры и влагосодержания, температуры в печи, удельной мощности СВЧ-излучения,

времени выпечки при СВЧ и конвективном режимах). Это позволит идентифицировать технологические режимы, оптимальные в плане времени выпечки или энергетических затрат, в СВЧ и конвективном режимах без использования натуральных экспериментов.

Математическая модель и результаты вычислительных экспериментов могут быть использованы для идентификации статических и динамических характеристик процесса выпечки как объекта автоматического управления, выявления предпочтительных каналов управления и выбора управляющих воздействий, а также для синтеза системы автоматического управления процессом выпечки по заданным показателям качества.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность

Авторы выражают благодарность руководству АО «Хлебозавод № 7» (Воронеж) за предоставленную возможность проведения научного эксперимента в межрегиональном научно-исследовательском центре инновационных технологий хлебопечения.

Contribution

All the authors bear equal responsibility for the content of the article.

Conflict of interest

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

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the management of bakery plant Khlebozavod No. 7, Voronezh, for the access to the Interregional Research Center for Innovative Baking Technologies.

References

1. 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>
2. Kulishov BA, Novosyolov AG, Ivashchenko SYu, Gusarov NE. Electric contact heating in baking: A review. *Polzunovsky Vestnik*. 2019;(1):106–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.020>
3. Maklyukov VI. Analysis of methods for modeling the bread baking process. *Bread Products*. 2021;(7):26–32. (In Russ.). [Маклюков В. И. Анализ методов моделирования процесса выпечки хлеба // Хлебопродукты. 2021. № 7. С. 26–32.]. <https://elibrary.ru/IQUUCR>
4. Magomedov GO, Khvostov AA, Zhuravlev AA, Magomedov MG, Taratukhin AS, Plotnikova IV. Formation of whipped yeast-free bread crumb with intensive microwave convective baking. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(3):426–438. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2375>
5. Purlis E, Cevoli C, Fabbri A. Modeling volume change and deformation in food products/processes: An overview. *Foods*. 2021;10(4). <https://doi.org/10.3390/foods10040778>
6. Houšová J, Hoke K. Temperature profiles in dough products during microwave heating with susceptors. *Czech Journal of Food Sciences*. 2002;20(4):151–160. <https://doi.org/10.17221/3526-CJFS>
7. Kristiawan M, Valle GD, Kansou K, Ndiaye A, Vergnes B. Validation and use for product optimization of a phenomenological model of starch foods expansion by extrusion. *Journal of Food Engineering*. 2018;246:160–178. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.11.006>
8. Roohi R, Hashemi SMB. Experimental, heat transfer and microbial inactivation modeling of microwave pasteurization of carrot slices as an efficient and clean process. *Food and Bioprocess Processing*. 2020;121:113–122. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.015>
9. Pham ND, Khan MIH, Karim MA. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying. *Food Chemistry*. 2020;325. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126932>
10. Purlis E. Modeling convective drying of foods: A multiphase porous media model considering heat of sorption. *Journal of Food Engineering*. 2019;263:132–146. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.028>
11. Salah K, Olkhovatonov EA, Aider M. Effect of canola proteins on rice flour bread and mathematical modelling of the baking process. *Journal of Food Science and Technology*. 2019;56(8):3744–3753. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03842-2>
12. Garg A, Malafronte L, Windhab E. Baking kinetics of laminated dough using convective and microwave heating. *Food and Bioprocess Processing*. 2019;115:59–67. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.02.007>
13. Purlis E. Simple methods to predict the minimum baking time of bread. *Food Control*. 2019;104:217–223. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.04.021>

14. Mosalam H. Digital modeling of heat transfer during the baking process. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2021;2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8957148>
15. Hou L, Li R, Wang S, Datta AK. Numerical analysis of heat and mass transfers during intermitten microwave drying of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller). *Food and Bioproducts Processing*. 2021;129:10–23. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.06.005>
16. Schiano Di Cola V, Cuomo S, Severino G. Remarks on the numerical approximation of Dirac delta functions. *Results in Applied Mathematics*. 2021;12. <https://doi.org/10.1016/j.rinam.2021.100200>
17. Dien Vu K, Bazhenova S. Modeling the influence of input factors on foam concrete properties. *Magazine of Civil Engineering*. 2021;(3). <https://doi.org/10.34910/MCE.103.11>
18. Purlis E. Simple methods to predict the minimum baking time of bread. *Food Control*. 2019;104:217–223. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.04.021>
19. Thuengtung S, Ogawa Y. Comparative study of conventional steam cooking and microwave cooking on cooked pigmented rice texture and their phenolic antioxidant. *Food Science and Nutrition*. 2020;8(2):965–972. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1377>
20. Al-Nasser M, Fayssal I, Moukalled F. Numerical simulation of bread baking in a convection oven. *Applied Thermal Engineering*. 2020;184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116252>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2492>
<https://elibrary.ru/GUJYSR>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Применение вертикальных вибрационных смесителей в технологии получения мучных смесей



Д. М. Бородулин¹, М. Т. Шулбаева^{2,*},
О. Н. Мусина³, Д. В. Сухоруков²

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева^{ROR}, Москва, Россия

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

³ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова^{ROR}, Барнаул, Россия

Поступила в редакцию: 06.02.2023

Принята после рецензирования: 25.09.2023

Принята к публикации: 03.10.2023

*М. Т. Шулбаева: sh-m-t@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-4571-5571>

Д. М. Бородулин: <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

О. Н. Мусина: <https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>

Д. В. Сухоруков: <https://orcid.org/0000-0001-7995-3813>

© Д. М. Бородулин, М. Т. Шулбаева, О. Н. Мусина,
Д. В. Сухоруков, 2024



Аннотация.

В пищевой отрасли существует тенденция перехода с традиционных видов сырья, которые характеризуются высокой влажностью, на их аналоги в сухом виде. Цель исследования – обосновать возможные конструкции вертикальных вибрационных смесителей, предназначенных для получения мучных смесей.

Объектом исследования являлись характеристики вертикальных вибрационных смесителей при получении мучных смесей, изучение которых позволило бы спрогнозировать качество получаемого продукта. Для получения смесей использовали муку пшеничную хлебопекарную I сорта, сахар белый, соль пищевую, порошок яичный и молоко сухое.

Научно обосновали возможность расширения области применения вертикальных вибрационных смесителей, предназначенных для зернистых материалов. Предложили три вертикальных вибрационных смесителя непрерывного действия для получения мучных смесей: подъемный, прямоточный и каскадный. Пшеничная мука, которая является основой мучных смесей, переходит на рабочем органе смесителя в устойчивое виброкипящее состояние в слоях толщиной не более 35 мм при амплитуде колебаний 4,5 мм и частоте более 20 Гц. Скорость движения муки растет с увеличением частоты колебаний рабочего органа и размеров площади перфорации, но падает с повышением высоты слоя. Эффективность данных аппаратов возрастает пропорционально увеличению площади отверстий на рабочих витках смесителей, а также от максимального слоя высоты муки. Наиболее эффективным из предложенных конструкций является прямоточный вибрационный смеситель. Периодичность импульсного дозирования ингредиентов в смеситель для получения мучных смесей удовлетворительного качества ($V_c \leq 14,5\%$) не должна превышать половины, а хорошего ($V_c \leq 6\%$) четверти среднего времени пребывания частиц в аппарате.

Результаты работы представляют значимость при проектировании технологических линий производства мучных смесей.

Ключевые слова. Пищевая промышленность, порошок, смесь, смешивание, вибрация, псевдооживление, смеситель, производительность, качество

Для цитирования: Применение вертикальных вибрационных смесителей в технологии получения мучных смесей / Д. М. Бородулин [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 104–115. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2492>

Vertical Vibratory Mixers in Flour-Mixing Technology



Dmitry M. Borodulin¹, Margarita T. Shulbaeva^{2,*},
Olga N. Musina³, Dmitry V. Sukhorukov²

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy^{ROR}, Moscow, Russia

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

³ Polzunov Altai State Technical University^{ROR}, Barnaul, Russia

Received: 06.02.2023

Revised: 25.09.2023

Accepted: 03.10.2023

*Margarita T. Shulbaeva: sh-m-t@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-4571-5571>

Dmitry M. Borodulin: <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

Olga N. Musina: <https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>

Dmitry V. Sukhorukov: <https://orcid.org/0000-0001-7995-3813>

© D.M. Borodulin, M.T. Shulbaeva, O.N. Musina,
D.V. Sukhorukov, 2024



Abstract.

The food industry is currently demonstrating a tendency to substitute traditional high-humidity raw materials with their dry analogues. This research introduces new designs of vertical vibrating mixers that could preprogram flour mix quality. The vertical continuous vibration mixers designed for granular materials showed a good potential for a wider scope of application.

The experiment involved high-quality wheat flour, sugar, salt, egg powder, and powdered milk, as well as three vertical mixers, i.e., a lifting mixer, a flow mixer, and a cascade mixer.

Wheat flour entered the working body of the mixer and came into a stable vibration-boiling state in layers of ≤ 35 mm with a vibration amplitude of 4.5 mm and a frequency of ≥ 20 Hz. The speed rate of the flour increased together with the oscillation frequency of the working body and the size of the perforation area but went down as the layer grew wider. The efficiency increased following the increase in the perforation area on the spiral surface and depended on the maximal thickness of the dough layer. The flow vibrating mixer proved to be the most effective one. The frequency of pulse feeding of ingredients into the mixer was $\leq 50\%$ ($V_c \leq 14.5\%$) to obtain flour mixes of satisfactory quality while good-quality mixes required 25% average time the particles spent in the mixer ($V_c \leq 6\%$).

The results obtained can be used to design technological lines for flour mix production.

Keywords. Food industry, powder, mix, mixing, vibration, fluidization, mixer, productivity, quality

For citation: Borodulin DM, Shulbaeva MT, Musina ON, Sukhorukov DV. Vertical Vibratory Mixers in Flour-Mixing Technology. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):104–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2492>

Введение

Проблема повышения культуры питания и качества пищевых продуктов является актуальной для всех стран мира [1–7]. Корреляция между качеством пищевой продукции и качеством жизни населения находит подтверждение в работах ученых повсеместно [8–11]. Актуальным направлением является создание безопасных и качественных разработок на основе продуктов массового потребления, таких как продукты переработки зерна, в том числе смеси для домашнего хлебопечения и приготовления мучных кондитерских изделий [12, 13]. Качеству таких мучных смесей стоит уделить пристальное внимание.

Современной тенденцией в пищевой отрасли является переход с традиционных видов сырья, которые

характеризуются высокой влажностью, на их аналоги в сухом виде. Преимуществами сухой пищевой продукции являются хорошая сохраняемость без потери качества, пониженная потребность в складских помещениях, стабильные функционально-технологические свойства и удобство получения полуфабрикатов, таких как мучные смеси (для кондитерских изделий или домашних хлебопечек). Использование готовых мучных смесей позволяет эффективнее вести технологический процесс предприятиями малого и среднего бизнеса. Поэтому популярным сегодня направлением является приготовление хлебопекарных и мучных кондитерских изделий (в том числе в домашних условиях) на основе использования готовых сухих смесей (порошков). Работы по улучшению техники и технологии получения

мучных смесей активно ведутся во всем мире [14–16]. Сбалансированные рецептуры мучных смесей получают аналитическим путем с применением современных цифровых технологий [17–21].

Смешивание зернистых сыпучих компонентов и порошков является важной технологической операцией не только в пищевой промышленности, но и в других отраслях – химической, строительной, фармацевтической и т. д. [22–27]. В последние годы в научной литературе наблюдается рост количества публикаций, которые посвящены смешиванию сыпучих материалов с использованием вычислительных и экспериментальных подходов в смесителях горизонтального и вертикального типов [28–34].

Смешивание порошков происходит при конвективном перемешивании в результате относительного движения групп частиц или при диффузионном перемешивании отдельных частиц [35–39]. Детально процессы смешивания порошков, в том числе в потоке по поверхностям и во вращающихся цилиндрических аппаратах, рассмотрены в работах R. Hogg (США) и J. Bridgwater (Великобритания) [39, 40]. Особенности вибрационного смешивания порошков применительно к фармацевтической отрасли описаны в работе A. Kottlan и др., а для пищевой отрасли в работе M. Asachi и др. [41, 42].

Для достижения высокого качества смеси порошков должны обладать однородностью распределения компонентов. В рецептурах смесей для кондитерских изделий (например, печенья) основными сухими компонентами являются пшеничная мука и сахарная пудра, а соль, сода, сухое молоко, яичный порошок и другие компоненты входят в небольших количествах. Количество компонентов в рецептуре достигает 15 наименований, что не является пределом, а соотношение ингредиентов обычно не превышает 1:100. Существует несколько методов оценки однородности смеси порошков, которые различаются основами, точностью, аппаратным оформлением, стоимостью и условиями проведения анализа. В работах [24, 42–44] описаны современные методы оценки однородности смеси порошков, рассмотрены их преимущества и недостатки, дан обзор, классификация и сравнение существующих индексов смешивания, характеризующих качество смесей. Недостатком этих методов является высокая стоимость и сложное аппаратное оформление, которое не дает возможности их применения на предприятиях малого и среднего бизнеса. Для решения этой проблемы мы предложили новый способ определения коэффициента неоднородности смеси.

Хотя вертикальные вибрационные смесители хорошо себя зарекомендовали (коэффициент вариации $8\% \leq V_c \leq 15\%$) в пищевой отрасли для смешивания зернистых сыпучих материалов с небольшой долей порошков, эффективность получения порошковых смесей в существующих конструкциях вибрационных смесителей может быть повышена [45–50]. Например, путем

усовершенствования конструкции (как предложено нами), подбором амплитуды и частоты колебаний, предварительным смешиванием компонентов и другими методами [47–50].

Таким образом, усовершенствование конструкции вертикальных вибрационных смесителей для получения мучных смесей (порошков) и исследование характеристик таких смесителей является актуальной научно-прикладной задачей.

Цель исследования – обосновать возможные конструкции вертикальных вибрационных смесителей, предназначенных для получения мучных смесей (порошков), исследовать характеристики смесителей и на основе анализа кривых отклика смесителей, полученных на дискретный входной сигнал, спрогнозировать качество смесей.

Объекты и методы исследования

В работе использовали следующие материалы: мука пшеничная хлебопекарная I сорта, сахар белый, соль пищевая, порошок яичный и молоко сухое, соответствующие требованиям действующей нормативной документации и гигиеническим требованиям ГСЭН РФ к качеству и безопасности сырья и пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01).

В широкой трактовке под эффективностью понимают соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами. В данной работе под эффективностью предлагается понимать объем (масса или вес) смеси, отнесенный к единице затраченной энергии.

Для оценки эффективности работы смесителей в качестве условного обозначения параметра «эффективность работы» введем показатель E_f , $\text{м}^3/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$:

$$E_f = \frac{V}{N \times 1000} \quad (1)$$

где V – объемная производительность смесителя, $\text{м}^3/\text{ч}$; N – затрачиваемая мощность, Вт.

Объемная производительность смесителя рассчитывается по формуле (2):

$$V = 3600 \times v \times S \quad (2)$$

где v – средняя скорость муки, $\text{м}/\text{с}$; S – площадь живого сечения потока, м^2 .

Производительность смесителей зависит прямо пропорционально от скорости транспортирования сыпучего материала по рабочему органу аппарата. На скорость влияют частота и амплитуда колебаний рабочего органа, угол вибрации, размеры перфорации, высота дисперсного слоя и угол наклона поверхности рабочего органа. В ходе проведения исследований амплитуда колебаний и угол вибрации были неизменны – 4,5 мм и 45° соответственно. Варьировали лишь частоту, размеры перфорации, высоту слоя муки и угол наклона поверхности рабочего органа.

Поскольку время пребывания отдельных элементов потока (частиц смеси) и их концентрация являются непрерывной случайной величиной, т. е. имеют статистическую природу, то можно рассчитать математические ожидания $\Theta\tau$ (средние значения) этих величин, дисперсию $D\tau$ и коэффициенты вариации V_c . Зная параметры кривых отклика на одиночный δ -импульс, можно построить гипотетический отклик на цепочку входных импульсов с разным периодом следования. Вручную расчеты громоздки, поэтому мы разработали специальную программу ЭВМ «Определение коэффициента неоднородности смеси», зарегистрированную в Роспатенте (№ 2016617770). Сначала оператор вручную заполняет экспериментальными данными матрицу изменения концентрации индикатора во времени $C(t)$, а затем программа рассчитывает среднее время пребывания $\Theta\tau$ индикатора в смесителе и его дисперсию $D\tau$. Дисперсия характеризует близость смесителя к модели идеального смешения. Далее программа дает оценку влияния периода $t_{\text{доз}}$ (цикличности) подачи индикатора на качество смеси путем расчета коэффициента вариации V_c , который дает качественную оценку получаемой смеси. Чем меньше его величина, тем качественнее считается полученная смесь. Например, при V_c 3–6 % смесь можно считать хорошего качества.

Для расчета данных использовали программу MATSTAT (<http://matstat.eu>). Статистическую обработку данных осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 при уровне значимости 5 %. Средние значения сравнивали на предмет различий с использованием однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты и их обсуждение

Мы предложили три усовершенствованных конструкции вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия (рис. 1), которые предпола-

гается использовать для получения мучных смесей (порошков). При включении осцилляторов (1) смесители начинают совершать винтовые колебания с интенсивностью, которая обеспечивает одновременное перемещение и виброкипение (псевдооживление) дисперсной массы на рабочем органе (3), выполненном в виде ряда винтовых (рис. 1а и б) или кольцеобразных лотков (рис. 1с) с плоским перфорированным дном. В первой конструкции дисперсная фаза движется к выгрузочному патрубку вверх по винтовому лотку, во второй – вниз, в третьей – по кругу, проваливаясь в вырез на следующую ступень каскада.

Конструкция подъемного вертикального вибрационного смесителя (рис. 1а) позволяет повысить качество получаемых мучных смесей на фоне снижения потребления аппаратом электроэнергии. Вибрационный аппарат состоит из цилиндра, который является загрузочным бункером. На его внешней стороне закреплен винтовой желоб с перфорированным основанием, который заканчивается в верхней части аппарата выгрузочным патрубком. В цилиндрической части аппарата находятся сквозные отверстия. У нижнего отверстия закреплен малый перфорированный лоток с нижним сплошным основанием, а у верхнего отверстия расположен делитель потока.

Аппарат работает следующим образом: включенный вибропривод приводит смеситель в рабочее состояние, при котором начинается виброкипение смешиваемых компонентов смеси внутри винтового желоба. Компоненты начинают смешиваться и двигаться вверх по желобу, достигая необходимой однородности смеси. Однако часть компонентов через отверстия в перфорированном желобе сыпается на лежащий внизу виток желоба, обеспечивая т. н. рециркуляцию смеси. Такое действие приводит к «сглаживанию» флуктуаций питающих дозаторов. Помимо этого, отверстия в желобе способствуют

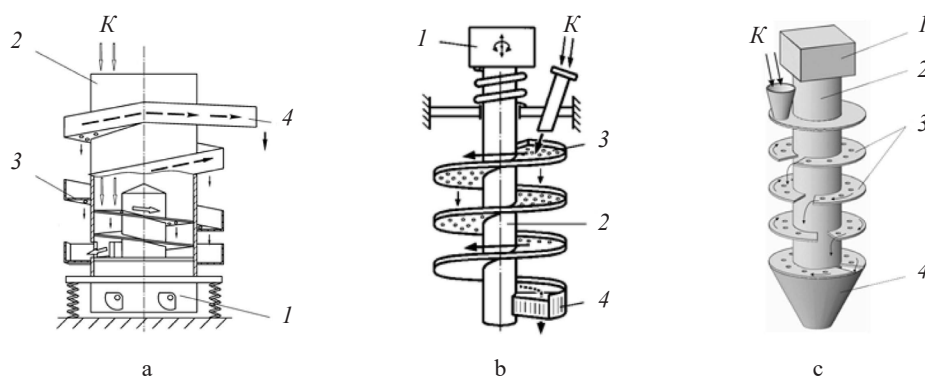


Рисунок 1. Конструкции вертикальных вибрационных смесителей: а – подъемный смеситель; б – проточный смеситель; в – каскадный смеситель (1 – вибропривод; 2 – цилиндрическая несущая колонна; 3 – перфорированный рабочий орган; 4 – выгрузочный патрубок; К – компоненты; стрелками показаны материальные потоки)

Figure 1. Vertical vibrating mixers: а – lifting mixer; б – flow mixer; в – cascade mixer (1 – vibration drive; 2 – cylindrical support column; 3 – perforated working body; 4 – discharge pipe; К – components; arrows mark material flows)

подсасыванию воздуха, в то время как основной материал подбрасывается вверх, а при его падении вытесняется обратно через отверстия и слой материала. За счет данного эффекта удастся уменьшить технологические параметры вибрации при стационарном режиме работы вибрационного смесителя, что приводит к снижению его энергопотребления.

Конструкция прямоточного вертикального вибрационного смесителя (рис. 1б) позволяет повысить качество получаемых мучных смесей и стабильность его работы. Это достигается путем движения основного потока смешиваемых компонентов смеси сверху вниз по перфорированному рабочему органу, а вспомогательный поток просеивается через отверстия. Это происходит за счет того, что внизу на сплошном витке смесителя закреплен разгрузочный патрубок для сбора полученной смеси. Это позволило изменить движение сыпучих компонентов внутри смесителя: основной поток компонентов под действием колебаний движется сверху вниз по перфорированному лотку рабочего органа, а часть смешиваемых компонентов ссыпается через отверстия. Таким образом, происходит наложение потоков материала с верхнего лотка на нижний. Также происходит их усреднение по ключевому компоненту смеси.

Конструкция каскадного вертикального вибрационного смесителя (рис. 1с) позволяет повысить качество получаемых мучных смесей путем поддержания на рабочем органе требуемого уровня компонентов 10–50 мм. Это достигается благодаря вырезанным секторам перфорированных плоских колец. Смешиваемые компоненты, двигаясь сверху вниз по плоским кольцам вокруг цилиндрической несущей колонны, сбрасываются на лежащую внизу ступень. Аналогично предыдущей конструкции через перфорацию часть материала опережающим потоком попадает на основной поток, идущий по нижнему лотку, тем самым усредняя качество получаемой смеси.

Вертикальные вибрационные смесители непрерывного действия (рис. 1), которые предполагается использовать для получения мучных смесей (порошков), мы изготовили для эмпирической оценки их производительности.

На рисунке 2 показано, как влияет высота слоя и частота колебаний при амплитуде 4,5 мм на скорость транспортирования муки вверх по сплошному рабочему органу с углом подъема $4^{\circ}31'$, а на рисунках 3 и 4 по перфорированному. В первом случае диаметр 10-ти отверстий составлял 5 мм, во втором 7 мм. Скорость движения муки растет с увеличением частоты колебаний рабочего органа f и размеров площади перфорации, а падает с повышением высоты слоя. В результате этой серии экспериментов установлено, что скорость движения муки выше по перфорированному лотку (рабочему органу). Это происходит за счет вибрационного подсасывания воздуха и вытеснения его сквозь слой материала, что создает более интенсивное витание твердой фазы.

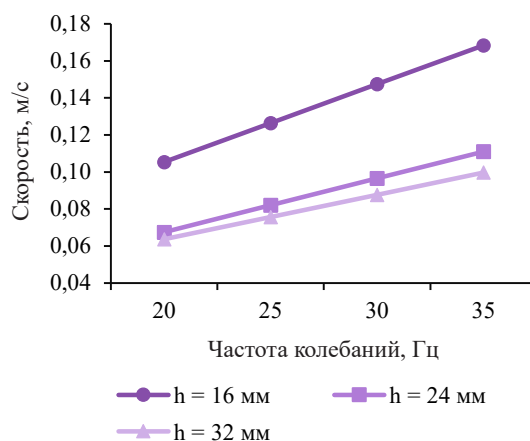


Рисунок 2. Скорость движения муки вверх по сплошному винтовому лотку

Figure 2. Feeding speed of flour up the screw tray

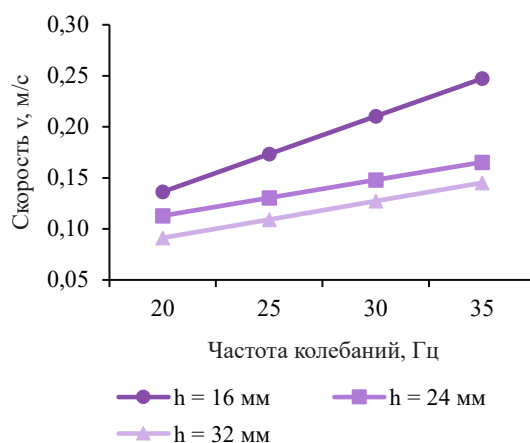


Рисунок 3. Скорость движения муки вверх по перфорированному винтовому лотку: $d_{отв} = 5$ мм

Figure 3. Feeding speed of flour up the perforated screw tray: hole diameter = 5 mm

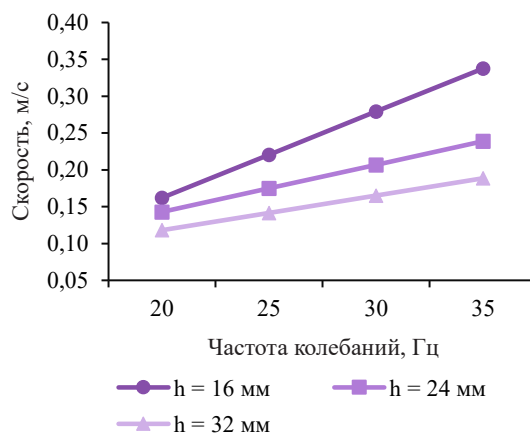


Рисунок 4. Скорость движения муки вверх по перфорированному винтовому лотку: $d_{отв} = 7$ мм

Figure 4. Feeding speed of flour up the perforated screw tray: hole diameter = 7 mm

Подобный эффект реализован нами в подъемном смесителе (рис. 1а). Поскольку его рабочий орган полностью перфорирован, то производительность смесителя возросла в среднем в 1,5 раза по сравнению с контрольной конструкцией со сплошным лотком.

В каскадном смесителе (рис. 1с), по сравнению с подъемным (рис. 1а), за счет уменьшения угла наклона рабочего органа до горизонтального состояния повышена скорость транспортирования сыпучего материала по перфорированному кольцевому лотку (рис. 5 и 6).

Прямоточный смеситель (рис 1б), по сравнению с подъемным и каскадным аппаратами, имеет еще большую производительность за счет повышения скорости движения сыпучего материала по рабочему органу под уклон (рис. 7 и 8).

Для всех предложенных конструкций смесителей экспериментальные данные в диапазоне частот колебаний рабочего органа от 20,87 (1250 кол/мин) до

33,33 Гц (2000 кол/мин) хорошо аппроксимируются линейными уравнениями.

Используя формулы (1) и (2), мы дали аналитическую оценку эффективности работы смесителей. Результаты представлены в таблице 1 и в графическом виде на рисунках 9–15, где условное обозначение оси ординат, например, d_5h_{16} , трактуется следующим образом: первое число – диаметр отверстия (5 мм), второе – высота слоя (16 мм); по оси абсцисс f – частота колебаний рабочего органа (Гц).

Экспериментально доказали, что эффективность данных аппаратов возрастает пропорционально увеличению площади отверстий на рабочих витках смесителей (ее максимальное значение достигается при десяти отверстиях с диаметром 7 мм), а также от максимального слоя высоты муки, который не должен превышать 32 мм. Наиболее эффективным является прямоточный вибрационный смеситель (рис. 1б).

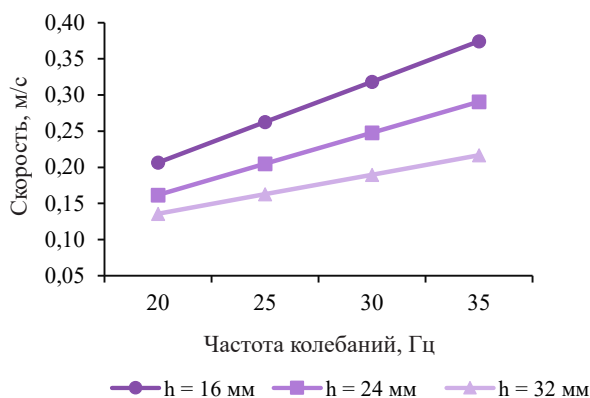


Рисунок 5. Скорость движения муки по перфорированному кольцевому лотку: $d_{отв} = 5$ мм

Figure 5. Feeding speed of flour along the perforated ring tray: hole diameter = 5 mm

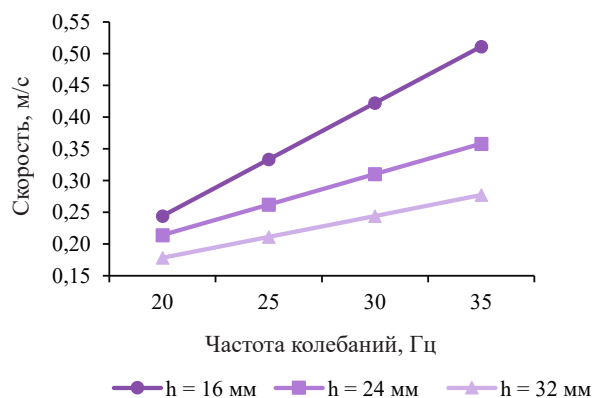


Рисунок 6. Скорость движения муки по перфорированному кольцевому лотку: $d_{отв} = 7$ мм

Figure 6. Feeding speed of flour along the perforated ring tray: hole diameter = 7 mm

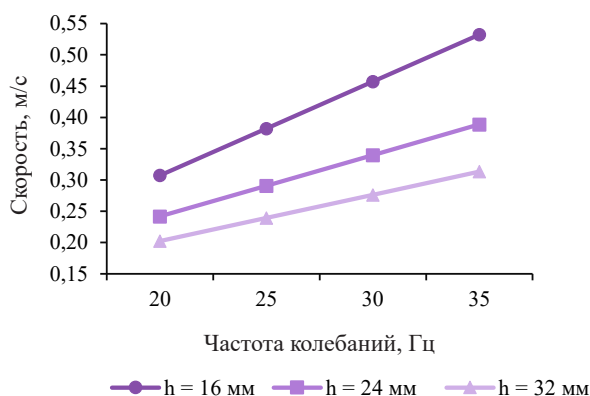


Рисунок 7. Скорость движения муки вниз по перфорированному кольцевому лотку: $d_{отв} = 5$ мм

Figure 7. Feeding speed of flour down the perforated ring tray: hole diameter = 5 mm

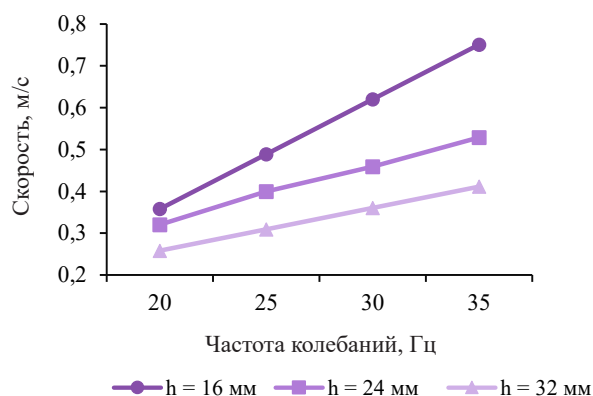


Рисунок 8. Скорость движения муки вниз по перфорированному кольцевому лотку: $d_{отв} = 7$ мм

Figure 8. Feeding speed of flour down the perforated ring tray: hole diameter = 7 mm

Таблица 1. Эффективность работы экспериментальных вертикальных вибрационных смесителей

Table 1. Operating efficiency of experimental vertical vibrating mixers

Показатели	Частота колебаний	20,83		33,33	
	Гц кол/мин	1250		2000	
Высота слоя, мм	—	16	32	16	32
Ширина лотка, мм	—	50	50	50	50
Мощность, Вт	—	330	330	816	816
Скорость на подъем, м/с (подъемный смеситель)	без перфорации	0,109	0,066	0,161	0,096
	d = 5 мм	0,142	0,094	0,235	0,139
	d = 7 мм	0,172	0,122	0,318	0,181
Скорость по кольцу, м/с (каскадный смеситель)	d = 5 мм	0,216	0,140	0,356	0,208
	d = 7 мм	0,259	0,184	0,482	0,266
Скорость под уклон, м/с (прямоточный смеситель)	d = 5 мм	0,320	0,209	0,507	0,301
	d = 7 мм	0,380	0,267	0,707	0,394
Эффективность (на подъем), кВт·ч/м ³ (подъемный смеситель)	без перфорации	0,952	1,149	0,570	0,676
	d = 5 мм	1,246	1,647	0,829	0,983
	d = 7 мм	1,502	2,134	1,123	1,276
Эффективность (по кольцу), кВт·ч/м ³ (каскадный смеситель)	d = 5 мм	1,887	2,452	1,256	1,466
	d = 7 мм	2,265	3,214	1,700	1,880
Эффективность (под уклон), кВт·ч/м ³ (прямоточный смеситель)	d = 5 мм	2,796	3,647	1,790	2,125
	d = 7 мм	3,320	4,664	2,496	2,782

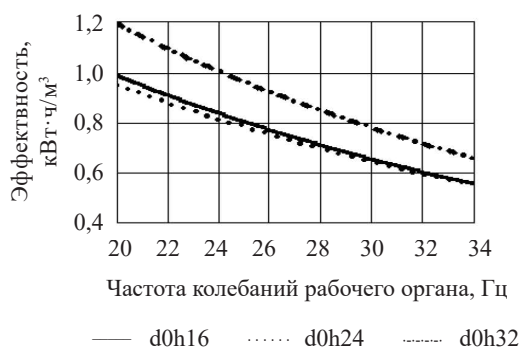


Рисунок 9. Эффективность подъемного смесителя со сплошным рабочим органом

Figure 9. Efficiency of the lifting mixer with a solid working body

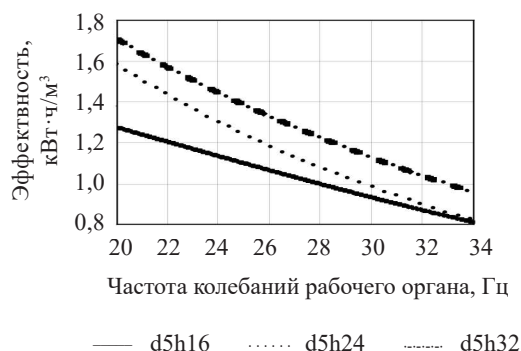


Рисунок 10. Эффективность подъемного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 10. Efficiency of the lifting mixer with a perforated working body

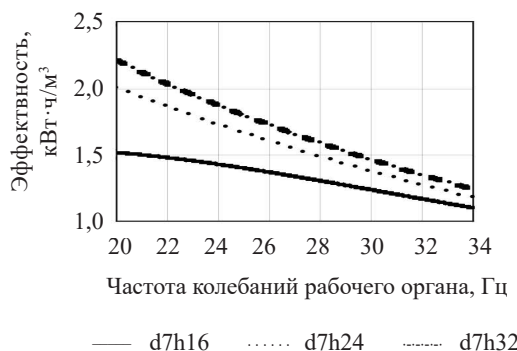


Рисунок 11. Эффективность подъемного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 11. Efficiency of the lifting mixer with a perforated working body

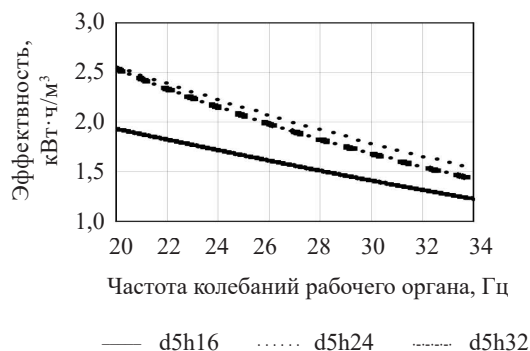


Рисунок 12. Эффективность каскадного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 12. Efficiency of the cascade mixer with a perforated working body

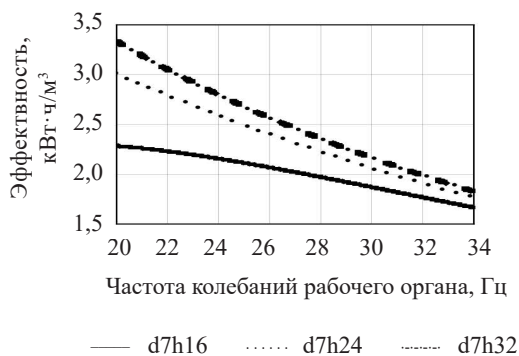


Рисунок 13. Эффективность каскадного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 13. Efficiency of the cascade mixer with a perforated working body

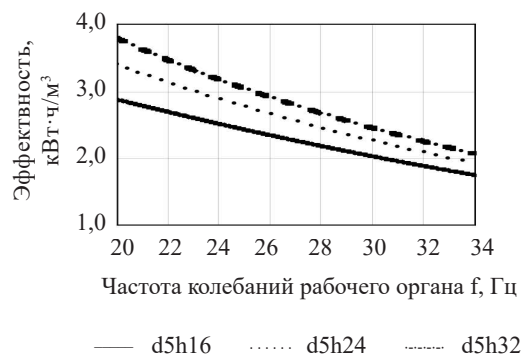


Рисунок 14. Эффективность проточного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 14. Efficiency of the flow mixer with a perforated working body

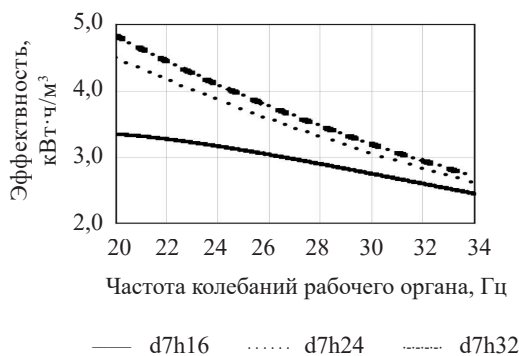


Рисунок 15. Эффективность проточного смесителя с перфорированным рабочим органом

Figure 15. Efficiency of the flow mixer with a perforated working body

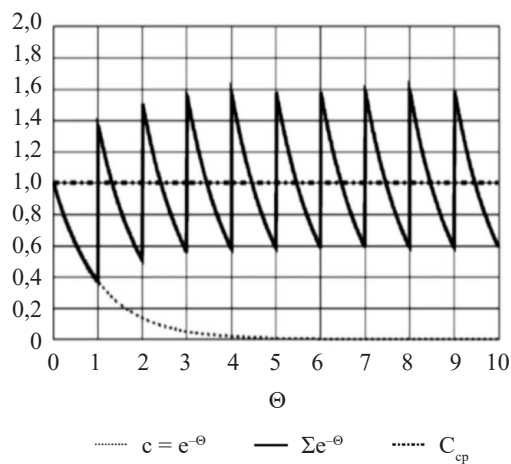


Рисунок 16. Расчетные кривые отклика проточного аппарата «идеального смешения» на цепочку входных δ -импульсов

Figure 16. Response curves of the flow “ideal mixer” calculated on a chain of input δ -pulses

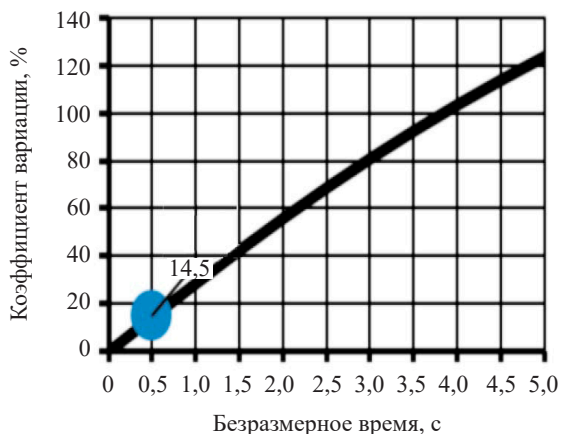


Рисунок 17. Зависимость изменения значения коэффициента вариации «ключевого» компонента в смеси от безразмерного времени его пребывания в аппарате «идеального смешения»

Figure 17. Effect of dimensionless time in the “ideal mixer” on the coefficient of variation of the key component in the mix

На основе анализа кривых отклика проточного смесителя на входной δ -импульс, полученных с помощью разработанной нами программы ЭВМ, теоретически спрогнозировали качество мучных смесей (рис. 16).

Периодичность импульсного дозирования ингредиентов в аппарат «идеального смешения» не должна превышать половины среднего времени пребывания. В этом случае качество смеси является удовлетворительным $V_c \leq 14,5\%$ (рис. 17).

Анализ данных об откликах предложенных нами усовершенствованных конструкций вертикальных вибрационных смесителей на импульсный ввод трассера показал, что они близки к аппарату «идеального вытеснения», т. к. дисперсия $D\tau$ времени пребывания не превышает 0,23 (рис. 18).

Периодичность импульсного дозирования ингредиентов в реальный смеситель для получения сы-

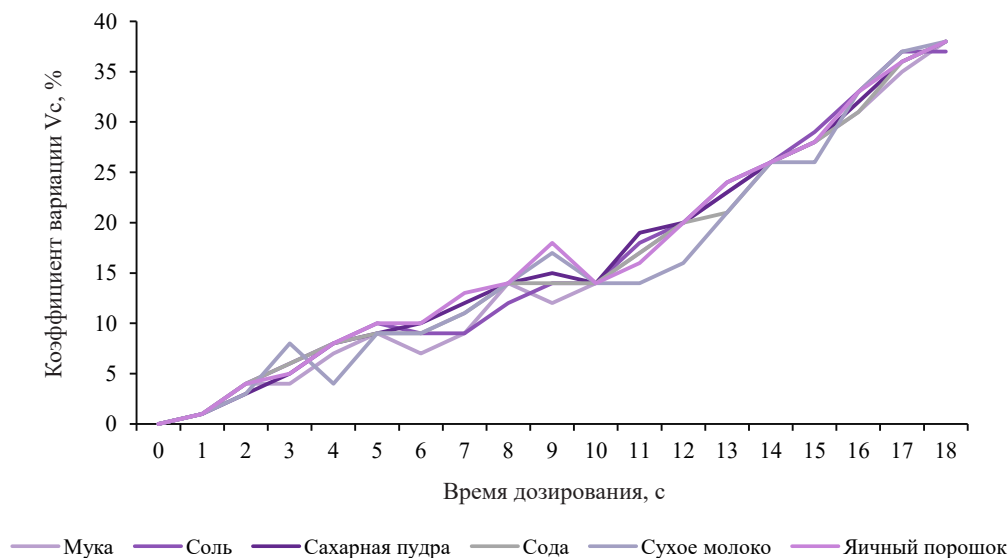


Рисунок 18. Зависимость коэффициента вариации смеси от периода дозирования при среднем времени пребывания трассера в смесителе 24,8 с

Figure 18. Effect of feeding period on the variation coefficient of the mix at 24.8 s average time of the tracer in the mixer

пучих композиций удовлетворительного качества ($V_c \leq 14,5\%$) не должна превышать половины, а хорошего ($V_c \leq 6\%$) четверти среднего времени пребывания частиц в аппарате.

Выводы

1. Научно обосновали возможность расширения области применения вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия, предназначенных для зернистых сыпучих материалов, на работу с мучными смесями (порошками). Предложили три конструктивных варианта вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия для получения мучных смесей (порошков): подъемный, прямоточный и каскадный;

2. Пшеничная мука, которая является основой мучных смесей, переходит на рабочем органе смесителя в устойчивое виброкипящее состояние в слоях толщиной не более 35 мм при амплитуде колебаний 4,5 мм и частоте более 20 Гц. Причем на перфорированной поверхности мука легче переходит в виброкипящее состояние по сравнению со сплошной поверхностью;

3. Скорость движения муки растет с увеличением частоты колебаний рабочего органа и размеров площади перфорации, но падает с повышением высоты слоя. Эффективность данных аппаратов возрастает пропорционально увеличению площади отверстий на рабочих витках смесителей (ее максимальное значение достигается при десяти отверстиях с диаметром 7 мм), а также от максимального слоя высоты муки, который не должен превышать 32 мм;

4. Предложенные конструкции смесителей близки к аппарату «идеального вытеснения». Наиболее эффек-

тивным из предложенных конструкций является прямоточный вибрационный смеситель;

5. Периодичность импульсного дозирования ингредиентов в смеситель для получения мучных смесей удовлетворительного качества ($V_c \leq 14,5\%$) не должна превышать половины, а хорошего ($V_c \leq 6\%$) четверти среднего времени пребывания частиц в аппарате.

Критерии авторства

Д. М. Бородулин – руководил работой, выполнял обзор и анализ публикаций по теме. М. Т. Шульбаева – проводила исследования и отвечала за написание рукописи. О. Н. Мусина – выполняла экспериментальные исследования и общую редакцию рукописи. Д. В. Сухоруков – выполнял расчеты, обработку и анализ полученных в ходе экспериментов данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

D.M. Borodulin supervised the research and reviewed scientific publications. M.T. Shulbaeva conducted the research and wrote the manuscript. O.N. Musina performed the experimental research and revised the manuscript. D.V. Sukhorukov was responsible for calculations, processing, and analysis of the experimental data.

Conflict of interest

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

References

1. van Zutphen KG, Lingala S, Bajoria M, Beesabathuni K, Kraemer K. The role of international agencies in achieving food security. In: Ferranti P, Berry EM, Anderson JR, editors. Encyclopedia of food security and sustainability. Elsevier; 2019. pp. 149–164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22447-5>
2. Brunstrom JM, Flynn AN, Rogers PJ, Zhai Yu, Schatzker M. Human nutritional intelligence underestimated? Exposing sensitivities to food composition in everyday dietary decisions. *Physiology and Behavior*. 2023;263. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114127>
3. Jeddi MZ, Boon PE, Cubadda F, Hoogenboom R, Mol H, Verhagen H, *et al.* A vision on the “foodture” role of dietary exposure sciences in the interplay between food safety and nutrition. *Trends in Food Science and Technology*. 2022; 120:288–300. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.024>
4. Ferreira H, Vasconcelos M, Gil AM, Pinto E. Benefits of pulse consumption on metabolism and health: A systematic review of randomized controlled trials. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021;61(1):85–96. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1716680>
5. Mariotti F, Gardner DC. Dietary protein and amino acids in vegetarian diets – A review. *Nutrients*. 2019;11(11). <https://doi.org/10.3390/nu11112661>
6. Nosworthy MG, Hernandez-Alvarez AJ, Franczyk AJ, Medina G, Neufeld J, Arcand Y, *et al.* Effect of cooking on the in vitro and in vivo protein quality of soy, oat and wheat varieties. *Cereal Chemistry*. 2023;100(2):460–472. <https://doi.org/10.1002/cche.10623>
7. Hafizov SG, Musina ON, Hafizov GK. Extracting hydrophilic components from pomegranate peel and pulp. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(1):168–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2425>
8. Afshin A, Sur PJ, Fay KA, Cornaby L, Ferrara G, Salama JS, *et al.* Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*. 2019;393(10184):1958–1972. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30041-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30041-8)
9. Livingstone KM, Ramos-Lopez O, Pérusse L, Kato H, Ordovas JM, Martínez JA. Reprint of: Precision nutrition: A review of current approaches and future endeavors. *Trends in Food Science and Technology*. 2022;130:51–62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.10.010>
10. Brennan L, de Roos B. Nutrigenomics: Lessons learned and future perspectives. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2021;113(3):503–516. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqaa366>
11. Bush CL, Blumberg JB, El-Sohehy A, Minich DM, Ordovás JM, Reed DG, *et al.* Toward the definition of personalized nutrition: A proposal by the American Nutrition Association. *Journal of the American College of Nutrition*. 2020; 39(1):5–15. <https://doi.org/10.1080/07315724.2019.1685332>
12. Rawat M, Varshney A, Rai M, Chikara A, Pohty AL, Joshi A, *et al.* A comprehensive review on nutraceutical potential of underutilized cereals and cereal-based products. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023;12. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100619>
13. Laskowski W, Górka-Warsewicz H, Rejman K, Czacotko M, Zwolińska J. How important are cereals and cereal products in the average polish diet? *Nutrients*. 2019;11(3). <https://doi.org/10.3390/nu11030679>
14. Martineau-Côté D, Achouri A, Pitre M, Wanasundara J, Karboune S, L'Hocine L. Investigation of the nutritional quality of raw and processed Canadian faba bean (*Vicia faba* L.) flours in comparison to pea and soy using a human *in vitro* gastrointestinal digestion model. *Food Research International*. 2023;173(1). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113264>
15. Vela AJ, Villanueva M, Ronda F. Physical modification caused by acoustic cavitation improves rice flour bread-making performance. *LWT*. 2023;183. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114950>
16. Borodulin DM, Sukhorukov DV, Musina ON, Shulbaeva MT, Zorina TV, Kiselev DI, *et al.* Flour baking mixes: Optimal operating parameters for vibration mixers. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(1):196–208. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-196-208>
17. Musina O, Putnik P, Koubaa M, Barba FJ, Greiner R, Granato D, *et al.* Application of modern computer algebra systems in food formulations and development: A case study. *Trends in Food Science and Technology*. 2017;64:48–59. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.011>
18. Angizeh F, Montero H, Vedpathak A, Parvania M. Optimal production scheduling for smart manufacturers with application to food production planning. *Computers and Electrical Engineering*. 2020;84. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106609>
19. Mensi A, Udenigwe CC. Emerging and practical food innovations for achieving the Sustainable Development Goals (SDG) target 2.2. *Trends in Food Science and Technology*. 2021;111:783–789. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.079>
20. Aguilera JM. The food matrix: Implications in processing, nutrition and health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019;59(22):3612–3629. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1502743>
21. Chadare FJ, Idohou R, Nago E, Affonfere M, Agossadou J, Fassinou TK, *et al.* Conventional and food-to-food fortification: An appraisal of past practices and lessons learned. *Food Sciences and Nutrition*. 2019;7(9):2781–2795. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1133>

22. Granato D, Barba FJ, Kovačević DB, Lorenzo JM, Cruz AG, Putnik P. Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2020;11:93–118. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032519-051708>
23. Jaspers M, Roelofs TP, Lohrmann A, Tegel F, Maqsood MK, Song YL, *et al.* Process intensification using a semi-continuous mini-blender to support continuous direct compression processing. *Powder Technology*. 2023;428. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118844>
24. Bhalode P, Ierapetritou M. A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. *Powder Technology*. 2020;373:195–209. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.043>
25. Tomita Y, Nagato T, Takeuchi Y, Takeuchi H. Control of residence time of pharmaceutical powder in a continuous mixer with impeller and scraper. *International Journal of Pharmaceutics*. 2020;586. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119520>
26. Tomita Y, Takeuchi Y, Natsuyama S, Takeuchi H. Characteristics of residence time distribution in a continuous high shear mixer granulation using scraper rotation. *International Journal of Pharmaceutics*. 2021;605. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120789>
27. Matuszek DB, Biłos ŁA. Computer image analysis as a method of evaluating the quality of selected fine-grained food mixtures. *Sustainability*. 2021;13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063018>
28. Florian M, Velázquez C, Méndez R. New continuous tumble mixer characterization. *Powder Technology*. 2014;256:188–195. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.023>
29. Lee KT, Kimber JA, Cogoni G, Brandon JK, Wilsdon D, Verrier HM, *et al.* Continuous mixing technology: Characterization of a vertical mixer using residence time distribution. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021;110(7):2694–2702. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2021.01.035>
30. Xiong H, Bao Y, Wang J, Cai Z. Power characteristic of adhesive particles mixing in a stirred tank. *The Chinese Journal of Process Engineering*. 2020;20(11):1273–1280. <https://doi.org/10.12034/j.issn.1009-606X.220040>
31. Zuo Z, Chen X, Gong S, Xie G. Numerical study of the mixing process of binary-density particles in a bladed mixer. *Advanced Powder Technology*. 2021;32(5):1502–1520. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.03.009>
32. Ebrahimi M, Yaraghi A, Jadidi B, Ein-Mozaffari F, Lohi A. Assessment of bi-disperse solid particles mixing in a horizontal paddle mixer through experiments and DEM. *Powder Technology*. 2021;381:129–140. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.041>
33. Yari B, Beaulieu C, Sauriol P, Bertrand F, Chaouki J. Size segregation of bidisperse granular mixtures in rotating drum. *Powder Technology*. 2020;374:172–184. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.030>
34. Golshan S, Blais B. Insights into granular mixing in vertical ribbon mixers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2021;99(7):1570–1581. <https://doi.org/10.1002/cjce.23965>
35. Palmer J, Reynolds GK, Tahir F, Yadav IK, Meehan E, Holman J, *et al.* Mapping key process parameters to the performance of a continuous dry powder blender in a continuous direct compression system. *Powder Technology*. 2020;362:659–670. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.12.028>
36. Deng T, Garg V, Salehi H, Bradley MSA. Correlations between segregation intensity and material properties such as particle sizes and adhesions and novel methods for assessment. *Powder Technology*. 2021;387:215–226. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.023>
37. Bridgwater J. The mixing of cohesionless powders. *Powder Technology*. 1972;5(4):257–260. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)80028-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)80028-7)
38. Hogg R. Characterization of relative homogeneity in particulate mixtures. *International Journal of Mineral Processing*. 2003;72(1–4):477–487. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00121-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00121-2)
39. Hogg R. Mixing and segregation in powders: Evaluation, mechanisms and processes. *KONA Powder and Particle Journal*. 2009;27:3–17. <https://doi.org/10.14356/kona.2009005>
40. Bridgwater J. Fundamental powder mixing mechanisms. *Powder Technology*. 1976;15(2):215–236. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(76\)80051-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)80051-4)
41. Kottlan A, Glasser BJ, Khinast JG. Vibratory mixing of pharmaceutical powders on a single-tablet-scale. *Powder Technology*. 2021;387:385–395. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.040>
42. Asachi M, Nourafkan E, Hassanpour A. A review of current techniques for the evaluation of powder mixing. *Advanced Powder Technology*. 2018;29(7):1525–1549. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.03.031>
43. Matuszek DB, Bieńczyński K, Jędrysiak A, Kraszewska A. Homogeneity of the selected food mixes. *Czech Journal of Food Sciences*. 2021;39(3):197–207. <https://doi.org/10.17221/225/2020-CJFS>
44. Bhalode P, Ierapetritou M. A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. *Powder Technology*. 2020;373:195–209. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.043>
45. Cuq B, Berthiaux H, Gatumel C. Powder mixing in the production of food powders. In: Bhandari B, Bansal N, Zhang M, Schuck P, editors. *Handbook of food powders: Processes and properties*. Woodhead Publishing. 2013. pp. 200–229. <https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.200>

46. Borodulin DM, Zorina TV, Ivanets VN, Nevskaya EV, Turina OE, Borisova AE. Key operation parameters of the vibration mixer in the production of flour baking mixes. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(1):77–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-77-84>
47. Mizonov V, Balagurov I, Berthiaux H, Gatumel C. Intensification of vibration mixing of particulate solids by means of multi-layer loading of components. Advanced Powder Technology. 2017;28(11):3049–3055. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.09.016>
48. Hashemnia K, Pourandi S. Study the effect of vibration frequency and amplitude on the quality of fluidization of a vibrated granular flow using discrete element method. Powder Technology. 2018;327:335–345. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.097>
49. Dubkova N, Kharkov V, Ziganshin B. Effect of mode amplitude on power consumption in vibrating mixer. In: Radionov AA, Gasiyarov VR, editors. Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. Cham: Springer; 2021. pp. 362–369. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_42
50. Menbari A, Hashemnia K. Effect of vibration characteristics on the performance of mixing in a vertically vibrated bed of a binary mixture of spherical particles. Chemical Engineering Science. 2019;207:942–957. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2019.07.026>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493>
<https://elibrary.ru/FTQVFJ>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Сушка зернового материала с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда



Е. Х. А. Мунассар^{ID}, И. А. Шорсткий*^{ID}

Кубанский государственный технологический университет^{ROR}, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 22.02.2023

Принята после рецензирования: 22.03.2023

Принята к публикации: 04.04.2023

*И. А. Шорсткий: i-shorstky@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

Е. Х. А. Мунассар: <https://orcid.org/0000-0002-8270-628X>

© Е. Х. А. Мунассар, И. А. Шорсткий, 2024



Аннотация.

В пищевой и сельскохозяйственной промышленности для увеличения сроков хранения пищевых продуктов и совершенствования процессов переработки пищевого сырья и подготовительных процессов применяются электрофизические технологии, такие как озонирование, обработка импульсным электрическим полем и низкотемпературная плазменная обработка. Цель работы – исследовать влияние предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда на эффективность сушки зерновых материалов.

В качестве объекта исследования выбрали семена мягкой пшеницы. Рассмотрели три варианта воздействия на материал: обработку при прямом контакте зернового материала с электродами, обработку на диэлектрической подложке и без обработки (контрольный образец). Изучение кинетики сушки семян пшеницы проводили с помощью теплового агента при температуре 110 °С после предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда. Для оценки возникающих в результате предварительной обработки эффектов использовали средства электронной сканирующей микроскопии для выявления изменений поверхности структуры, а также изучили кинетику процесса сушки.

Обработка семян пшеницы на диэлектрической подложке способствует более интенсивному процессу удаления влаги под действием возникающих эффектов травления поверхности с образованием нового континуума в структуре зернового материала. Обработка позволяет снизить длительность сушки зернового материала до достижения кондиционной влажности на 15–25 % по сравнению с контрольным образцом. Кривые скорости демонстрируют ускорение сушки в начальный период времени, что вызвано наличием дополнительных электроосмотических сил, и изменение абсорбционных характеристик зернового материала. Снижение общего удельного потребления энергии на 20 % получили для образцов с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда.

Электрофизическая технология на базе слаботочного плазменного канала искрового разряда может быть использована для подготовки зернового материала к последующей сушке. Перспективой дальнейшего развития данного направления является масштабирование технологии с обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда зернового материала в поточном режиме с выявлением новых эффектов, в том числе повышение сроков хранения зернового материала.

Ключевые слова. Пищевое сырье, зерновой материал, сушка, электрофизические технологии, искровой разряд, озонородушая смесь, эффективность сушки, кинетика сушки, электроосмотическая сила

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/42. Исследования выполнялись с использованием оборудования ЦКП «Исследовательский центр пищевых и химических технологий» Кубанского государственного технологического университета (КубГТУ)^{ROR} (СКР_3111), развитие которого поддерживается Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России)^{ROR} (Соглашение № 075-15-2021-679).

Для цитирования: Мунассар Е. Х. А., Шорсткий И. А. Сушка зернового материала с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 116–123. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493>

Drying Grain Pretreated by Low-Voltage Spark-Discharge Plasma Channel



Emad H.A. Mounasar^{ID}, Ivan A. Shorstkii*^{ID}

Kuban State Technological University^{ROR}, Krasnodar, Russia

Received: 22.02.2023

Revised: 22.03.2023

Accepted: 04.04.2023

*Ivan A. Shorstkii: i-shorstky@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

Emad H.A. Mounasar: <https://orcid.org/0000-0002-8270-628X>

© E.H.A. Mounasar, I.A. Shorstkii, 2024



Abstract.

The food industry and agriculture use such electrophysical technologies as ozonation, pulsed electric field, and low-temperature plasma. They increase the shelf-life of food products, as well as help to advance food processing. This article features pre-treatment with a low-voltage spark-discharge plasma channel as a means to increase the efficiency of grain drying.

The grain material involved three samples of soft wheat seeds. Sample 1 was subjected to direct contact with the electrodes while sample 2 underwent treatment on a dielectric substrate. The control remained untreated. The kinetics of grain-drying in the open air was studied using a thermal agent at 110°C after pre-treatment with a low-voltage spark-discharge plasma channel. This experiment also involved scanning electron microscopy tools to detect changes in surface structure.

The electron microscopy showed that the dielectric substrate accelerated moisture removal, probably as a result of the emerging surface effects that developed a new continuum in the grain structure. This treatment made it possible to reduce the drying time by 15–25%, compared to the control sample. The drying rate curves demonstrated acceleration in the initial period, associated with additional electroosmotic forces and changes in the absorption properties. The samples treated with low-voltage spark-discharge plasma channel showed a 20% reduction in total energy consumption.

Electrophysical technology based on a low-voltage spark-discharge plasma channel proved to be an effective pre-drying procedure. Further research is needed to scale the technology in a flow mode and to identify its effect on shelf-life.

Keywords. Food raw materials, grain material, drying, electrophysical technologies, spark discharge, ozone-air mix, drying efficiency, drying kinetics, electroosmotic force

Funding. The research was supported by the Kuban Science Foundation as part of research project No. MFI-20.1/42. The research was carried out using the equipment of the Research Center for Food and Chemical Technologies of Kuban State Technological University (KubSTU)^{ROR} (CKP_3111) financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki)^{ROR} (Agreement No. 075-15-2021-679).

For citation: Mounasar EHA, Shorstkii IA. Drying Grain Pretreated by Low-Voltage Spark-Discharge Plasma Channel. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):116–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493>

Введение

Передовые электрофизические технологии являются важным междисциплинарным направлением пищевой и сельскохозяйственной промышленности. Их целью является получение безопасных и качественных пищевых продуктов в необходимом количестве на базе возникающих электрогидродинамических эффектов и феноменов. За последнее время некоторые электрофизические технологии, такие как озонирование, обработка импульсным электрическим полем и низкотемпературная плазменная обработка, нашли широкое применение в технологиях увеличения сроков хранения пищевых продуктов, совершенствования процессов переработки пищевого сырья и подготовительных процессах [1–3]. Однако у перечисленных выше техно-

логий есть как преимущества, так и недостатки, среди которых высокие капитальные затраты их практической реализации и высокие требования электрической безопасности при организации производственного процесса [4]. Следовательно, необходимо постоянное совершенствование указанных технологий как с точки зрения их доступности для практической реализации, так и теоретической проработки возникающих эффектов и механизмов воздействия на пищевой продукт.

Перенос тепла в слаботочном плазменном канале искрового разряда с позиции электрогидродинамики объясняется наличием вторичного потока, исходящего от ионизирующего электрода к коллектору [6, 7]. Этот вторичный поток формирует течение (ионный ветер), которое добавляет импульс к объемному потоку

и разрушает тепловой пограничный слой на нагретой стенке. Это вызывает увеличение коэффициента теплопередачи [5]. Несмотря на то что энергия поля в пересчете на кинетическую энергию ионного ветра составляет всего 0,6–1,4 %, она вносит изменения в процессы переноса тепла [6]. Из этого следует, что линейный перенос импульса мал в общем энергетическом балансе. Возникает вопрос: куда расходуется оставшаяся энергия. Гипотеза о тепловыделении до сих пор не подтверждена экспериментально. Гипотеза о переходе энергии в энергию возбуждения атомов и молекул, которая увеличивает их электрохимический потенциал, была подтверждена фактом сильной коррозии и окисления, вызванного электрохимическими процессами на границе раздела металл-газ [8]. Однако более четкой картины происходящих процессов нет из-за отсутствия достаточного количества экспериментальных данных.

Интенсивный массоперенос при воздействии электрогидродинамического потока на пищевой продукт с низким содержанием влаги характеризуется морфологическими изменениями. В работе S. Rashidi и др. было продемонстрировано изменение структуры поверхности зернового материала при воздействии тлеющего разряда [9]. Это подтверждено исследованиями топографии поверхности и данными контактного угла смачивания. Длительность воздействия составила порядка 30 с. В работе Б. Б. Балданова и др. по снижению токсичности зернового материала с помощью обработки низкотемпературной плазмы отмечена длительность воздействия на продукт 90 с для достижения положительного эффекта [10]. Уменьшение длительности воздействия приводило к снижению получаемого эффекта. Применение низкотемпературной плазмы для сушки семян кукурузы с использованием низкотемпературной плазмы мощностью 500 Вт в течение 50 с позволило снизить ее длительность [12]. Описанные случаи характерны для варианта, при котором сушка продукта проводится с постоянным наложением электрогидродинамического потока. Данная система является статичной и сложно масштабируемой. При переходе на большие объемы использование процесса озонирования дало положительный эффект на сушку зернового материала при длительности более 40 мин [13]. Эффект сокращения длительности сушки установлен на уровне 80 %.

Особое место при использовании электрогидродинамических потоков в процессах сушки занимают комбинированные процессы при одновременном использовании сушильного агента и электроактивированного потока [14–16]. Данная комбинация позволяет сочетать традиционные эффекты на тепломассоперенос и формировать дополнительные силы интенсификации процессов сушки. Представленные выше технологии направлены на сопровождение процесса сушки различных материалов электрогидродинамическим потоком. Работы, направленные на подготовку зер-

нового материала к последующей сушке с помощью плазменного канала искрового разряда, практически не представлены.

С учетом данной характеристики состояния проблемы в работе планируется исследовать влияние предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда на эффективность сушки зерновых материалов.

Объекты и методы исследования

Объект исследования. Семена пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) хорошего и однородного качества были приобретены у местного производителя. Начальная влажность семян составила $26,1 \pm 0,1$ %, ее определяли с помощью анализатора влажности Эвлас 2М (СибагроПРИБОР, Россия). Семена в оболочке (без очистки) отправляли на электрофизическую обработку.

Обработка слаботочным плазменным каналом искрового разряда. В качестве основного метода воздействия на зерновой материал использовали слаботочный плазменный канал искрового разряда. Генерацию искрового разряда осуществляли с использованием высоковольтного блока питания с максимальным выходным напряжением 30 кВ. Частота следования искровых разрядов составила порядка 600 Гц. Контроль параметров обработки осуществляли с помощью цифрового осциллографа Tektronix. Обработка проводилась по схеме, представленной на рисунке 1. Через слой зерна толщиной 2 см пропускали слаботочный плазменный канал, представляющий собой озонозовоздушную смесь, и получаемые от искрового разряда ионы. Длительность обработки подобрали на основе предыдущих результатов, она составила 260 с. В качестве вариации было рассмотрено 3 опыта обработки зернового материала: контрольный образец без обработки (опыт А), при прямом контакте с электродом в режиме коронного разряда (опыт Б) и при нахождении зернового материала на диэлектрической подложке с формированием искрового разряда (опыт В). Объемная плотность электрического заряда для опыта с прямым контактом с электродами составила $10\text{--}2$ Кл/м³, а в опыте с диэлектрической подложкой $\sim 10\text{--}1$ Кл/м³. Тепловой эффект от обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда составил менее 3 °С. Для этого температуру поверхности зерна измерили с помощью инфракрасного пирометра.

Морфологический анализ. Для анализа структурных и поверхностных изменений зернового материала использовали средства сканирующей электронной микроскопии. В качестве инструментария применяли растровый электронный микроскоп EVO HD 15 (Zeiss, Великобритания). Параметры работы микроскопа соответствовали величине ускоряющегося напряжения 10,0 и 15,0 кВ. Дополнительно для оценки свойств поверхности на предмет появления новых компонентов использовали опцию энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Конвективная сушка. После обработки зерновой материал направлялся на этап конвективной сушки в сушильном шкафу Экрос 4620 (Экросхим, Россия) с циркуляцией воздуха при температуре 110 °С. Сушку проводили до момента снижения влажности зернового материала до кондиционной влажности 10 %. Во время эксперимента осуществляли оценку кинетики сушки. Для этого с интервалом в 10 мин брали навеску для определения влажности зернового материала.

Кривые сушки зернового материал без обработки и с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда были проанализированы с использованием безразмерного параметра влажности (MR), определяемого по формуле (1) [17]:

$$MR = \frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e} \quad (1)$$

где W_t – содержание влаги в любой момент времени t , кг воды/кг сухого вещества; W_0 – начальное содержание влаги, кг воды/кг сухого вещества; W_e – равновесное содержание влаги, кг воды/кг сухого вещества. В формуле (1) значение W_e мало, поэтому возможно ее упрощение до вида $MR = W_t/W_0$.

Скорость сушки (DR) образцов яблок в любой момент времени t может быть рассчитана по формуле (2):

$$DR = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{\Delta t} \quad (2)$$

где W_t – содержание влаги в момент времени t , кг воды/кг сухого вещества; $W_{t+\Delta t}$ – содержание влаги в момент времени $t + \Delta t$.

Оценка энергетических затрат. Для оценки технико-экономической эффективности предлагаемой технологии рассчитали удельное потребление энергии по формуле (3):

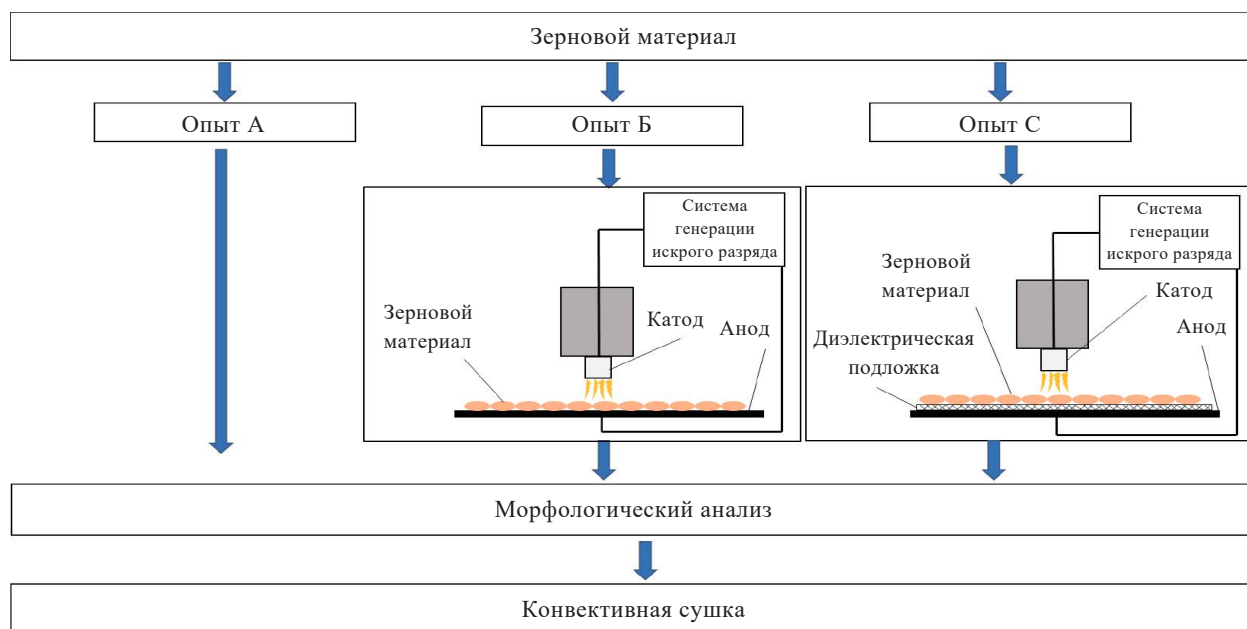
$$Q_{уд} = \frac{Q_{суш} + Q_{пл}}{M_b} \quad (3)$$

где $Q_{суш}$ – энергопотребление конвективной сушилки, кВт/ч; $Q_{пл}$ – энергопотребление обработки плазменным каналом на стадии предварительной подготовки, кВт/ч; M_b – масса выпаренной воды, кг. Данные потребления сушильного шкафа $Q_{суш}$ получили с помощью измерителя мощности при постановке эксперимента. Величину потребляемой энергии плазменного канала $Q_{пл}$ определяли по данным осциллограмм тока и напряжения в соответствии с формулой (4) [18]:

$$Q_{пл} = n \times \int U(t) \times I(t) \times dt \quad (4)$$

где n – количество разрядов за обработку; $I(t)$ – величина напряжения при разряде; $U(t)$ – ток разряда, проходящий через образец.

Статистический анализ. Поставленные эксперименты проводились с трехкратной повторностью. Для оценки достоверности различий между иссле-



опыт А – контрольный; опыт Б – обработка слаботочным плазменным каналом искрового разряда при прямом контакте с электродом в режиме коронного разряда; опыт В – обработка зернового материала на диэлектрической подложке с формированием искрового разряда

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для обработки зернового материала

Figure 1. Experimental device for processing grain material

двумя параметрами провели дисперсионный анализ по методике ANOVA при $p < 0,05$. Статистический анализ провели в программной среде Excel и специализированной программной среде STATISTICA 13 (Statsoft, США).

Результаты и их обсуждение

Морфологические изменения зернового материала после обработки слаботоковым плазменным каналом искрового разряда. Топография поверхности семян без обработки и после обработки слаботоковым плазменным каналом искрового разряда показана на рисунке 2. Для необработанных семян пшеницы, полученных по опыту А, характерно наличие ровной и гладкой поверхности. По результату обработки слаботоковым плазменным каналом в коронном разряде (опыт Б) на поверхности наблюдаются эффекты травления, для которых характерно резкое разделение границ

единичных клеток семян. При переходе обработки в искровой режим (опыт В) на поверхности семян наблюдаются эффекты механического разрушения кожицы семян и появления нового континуума (кратеров) на поверхности зерна. При дальнейшем увеличении энергетики обработки зернового материала возникают нежелательные термические деформации, сопровождающиеся интенсивным выделением Джоулева тепла от искрового разряда.

Кинетика сушки. Пропускание электроактивированного сушильного агента, содержащего озон-воздушную смесь и группы ионов $\text{OH}^\cdot$, $\text{O}^\cdot$ и $\text{H}^\cdot$ сквозь слой зернового материала при работе в режиме искрового (опыт В) и коронного разряда (опыт Б) при атмосферном давлении с объемной плотностью электрических зарядов 10^{-2} – 10^{-1} Кл/м³, позволяет сочетать в себе максимальный эффект ускорения процесса сушки зернового материала. На рисунке 3 пред-

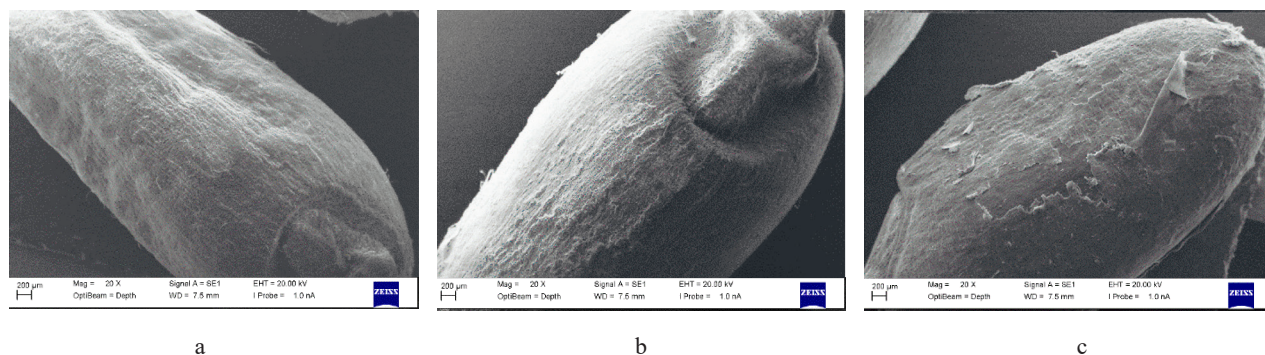


Рисунок 2. Топография поверхности семян без обработки и после обработки слаботоковым плазменным каналом искрового разряда: а – без обработки; б – обработка в режиме коронного разряда; с – обработка с формированием искрового разряда

Figure 2. Grain surface without treatment and after treatment with a low-voltage spark-discharge plasma channel: a – untreated; b – processed with corona discharge; c – processed with spark discharge

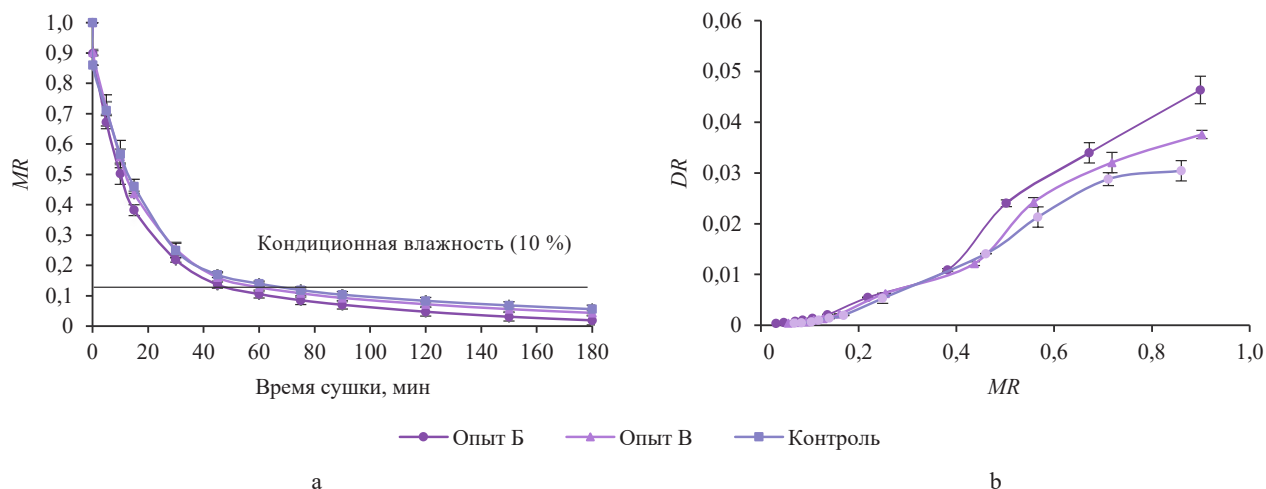


Рисунок 3. Кривая сушки (а) и скорости сушки (б) зернового материала для поставленных опытов

Figure 3. Curve of drying (a) and drying speed (b) of grain

ставлены кривые сушки зернового материала для поставленных опытов.

При одновременном участии озоновоздушной смеси и воздействии коронного разряда формируются три градиента, которые влияют на массоперенос: градиенты температуры, химического потенциала и электрического поля. При воздействии коронного разряда (опыт Б) влага, которая находится в зерновом материале, насыщается ионами. Возникает дополнительная сила движения влаги, основанная на эффекте электроосмоса, при котором влага, насыщенная ионами под действием электростатики, двигается к соответствующему по знаку электроду. Подобные эффекты были замечены в работах авторов, моделирующих коллоидно-пористые тела [19, 20].

Воздействие искровым разрядом атмосферного давления позволяет сочетать изменения массообменных характеристик сушки с поверхности зерна за счет изменения физико-механических характеристик влаги и микроструктурных изменений зернового материала. После электрофизического воздействия по опытам Б и В наблюдаются структурные изменения оболочки зерна: развивается мелкая ячеистая сетчатая структура с резко очерченными границами ячеек. В работах [21, 22] отмечено изменение влагоабсорбционной способности при обработке низкотемпературной плазмой, что связано с интенсивностью процесса сушки. Одной из гипотез данной работы является возникновение дополнительного континуума (канала), который способствует эффективному и равномерному процессу движения влаги внутри материала. Для проверки данной гипотезы в последующих работах будет детально изучена внутренняя структура зернового материала.

С точки зрения процесса сушки кривая представлена периодом падающей скорости сушки. Для опытов Б и В в начальный период времени (15 мин) скорость сушки выше на 15–20 % по сравнению с необработанным материалом. Максимальная скорость сушки установлена на уровне 0,046 кг/мин для образца зерна по опыту В при воздействии искровым разрядом.

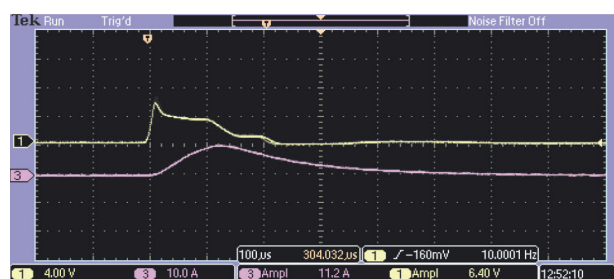
В работах, посвященных воздействию низкотемпературной плазмы на зерновой материал, были указаны эффекты, ускоряющие процесс сушки. В работе W. Cao и др. указано наличие эффекта применения электрогидродинамического потока коронного разряда на шлифованный рис и процесс его сушки [23]. Было установлено, что система игольчатых электродов при подаче на них высокого напряжения до 30 кВ способствовала изменению структурных особенностей. В работе W. Cao, Y. Nishiyama и S. Koide использование электрогидродинамического потока в процессе сушки увеличило скорость сушки семян пшеницы более чем в два раза [24].

Несмотря на то что полученные в данной работе эффекты интенсификации процесса сушки ниже, чем эффекты, наблюдаемые в работах по применению электрогидродинамического потока для сопровождения с процессами сушки, использованные режимы основаны на возможном практическом применении и масштабировании. Рассмотренный процесс электрофизической обработки представлен слаботорочным атмосферным разрядом, который позволяет осуществлять электрофизическую обработку без необходимости создания вакуума. Это влияет на техникоэкономическую эффективность данной технологии.

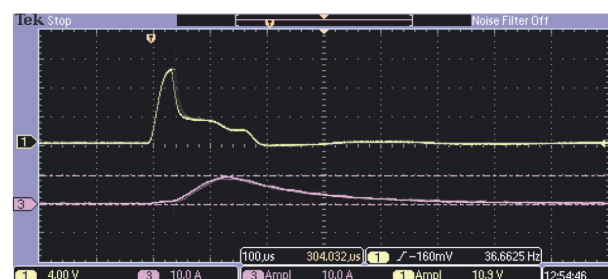
Таким образом, при работе представленной технологии на малотоннажной зерносушилке (100 т сырья в сутки) предварительная электрофизическая обработка может увеличить производство примерно на 10–15 т в сутки. Это может обеспечить дополнительный доход, который увеличит как норму прибыли, так и окупаемость инвестиций в оборудование обработки слаботорочным плазменным каналом искрового разряда. Разрабатываемые нашей исследовательской группой технологии предварительной электрофизической подготовки растительных материалов показывают высокие технологические эффекты.

Характеристики электрофизической обработки.

На рисунке 4 представлена визуализация обработки слоя зернового материала слаботорочным плазменным



а



б

Рисунок 4. Визуализация процедуры обработки для опытов Б (а) и В (б): осциллограмма напряжения (желтая линия) и тока (фиолетовая линия) для воздуха в качестве рабочего газа: 4 кВ/дел, 10 мА/дел, 100 мкс/дел

Figure 4. Processing procedure: voltage (yellow line) and current (purple line) oscillogram with air as the working gas, 4 kV/div, 10 mA/div, 100 μ s/div

каналом искрового разряда. При нахождении зернового материала на аноде режим обработки происходит при коронном разряде в межэлектродном пространстве. Для такой обработки характерно шипение, сопровождающееся генерацией электронов. В коронном режиме возникает эффект ионного ветра, описанный в работах [25, 26]. Ионный ветер представляет собой направленный аэродинамический поток заряженных частиц. Особую роль играет как конфигурация электродного пространства, так и подложка, на которой находится материал [27]. В поставленном эксперименте подложка представляется собой металлическую сетку, через которую свободно проникает ионный ветер, воздействуя на слой материала.

При размещении материала на диэлектрической подложке возникает режим работы искровым разрядом в виде шнура ярко-голубого свечения. Такая обработка характеризуется резким треском, появляющимся при возникновении искрового разряда. Осциллограммы тока разряда и напряжения представлены на рисунке 4. Для кривой тока характерно экспоненциальный рост и падение при достижении пикового значения 10 мА, величина напряжения составляет 6,4 кВ. При обработке на подложке возникает запаздывание кривой тока на 50 мкс относительно кривой напряжения, величина напряжения составляет 10,9 кВ.

Используя формулу (4) и данные осциллограммы тока и напряжения разряда, определили значение $Q_{пл}$.

Величина потребляемой энергии плазменного канала составила 1,4 и 6,8 Вт для опытов Б и В соответственно. Итоговое общее удельное потребление энергии $W_{уд}$ для предварительно обработанных слаботочным плазменным каналом искрового разряда зернового материала составило 4,2 и 4,3 кВт/ч·кг. Это ниже, чем у контрольных образцов ($p < 0,05$), и является важным показателем эффективности технологии [28]. Снижение общего удельного потребления энергии составило 22 и 25 % для опытов Б и В соответственно. Таким образом, подготовка зернового материала с помощью слаботочного плазменного канала искрового разряда может привести к снижению энергопотребления процедуры сушки.

Выводы

Предварительная обработка слаботочным плазменным каналом искрового разряда способствует снижению длительности сушки зернового материала до кондиционной влажности до 25 %. При расположении зернового материала на диэлектрической подложке эффект от электрофизической обработки выше, чем при прямом контакте зернового материала с электродом. Скорость сушки зернового материала, обработанного слаботочным плазменным каналом искрового разряда в начальный момент времени, выше, чем в материале без предварительной обработки. Процедура предварительной обработки слаботочным плазменным каналом искрового разряда может быть рекомендована при подготовке зернового материала к этапу сушки, учитывая факт сокращения общей длительности процесса.

Направление будущих исследований будет заключаться в изучении качественных характеристик обрабатываемого зернового материала слаботочным плазменным каналом искрового разряда, масштабировании технологии до обработки в поточном режиме и проведении поисковых работ по влиянию на хранимость зернового материала.

Критерии авторства

Е. Х. А. Мунасар занимался проведением лабораторных экспериментов, расчетом основных показателей сушки и написанием работы. И. А. Шорсткий руководил проектом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

E.H.A. Mounasar conducted the laboratory experiments, calculated the drying parameters and wrote the manuscript. I.A. Shorstkii supervised the project.

Conflict of interest

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

References

1. Chisch TV, Kozmin GV, Polyackova LP, Melnickova TV. Radiation treatment as a technology accepting for food safety. Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences. 2011;11(4):44–49. (In Russ.). [Радиационная обработка как технологический прием в целях повышения уровня продовольственной безопасности / Т. В. Чиж [и др.] // Вестник РАЕН. 2011. Т. 11. № 4. С. 44–49.]. <https://www.elibrary.ru/TXIKUJ>
2. Shorstkii IA. Cold plasma pretreatment in plant material drying. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):613–622. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2391>
3. Ganesan AR, Tiwari U, Ezhilarasi PN, Rajauria G. Application of cold plasma on food matrices: A review on current and future prospects. Journal of Food Processing and Preservation. 2021;45(1). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15070>
4. Priyadarshini A, Rajauria G, O'Donnell CP, Tiwari BK. Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2019;59(19):3082–3101. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1483890>
5. Zhakin AI. Electrohydrodynamics. Physics-USpekhi. 2012;182(5):495–520. (In Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201205b.0495>

6. Martynenko A, Bashkir I, Kudra T. The energy efficiency of electrohydrodynamic (EHD) drying of foods. *Trends in Food Science and Technology*. 2021;118:744–764. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.002>
7. Bashkir I, Martynenko A. Optimization of multiple-emitter discharge electrode for electrohydrodynamic (EHD) drying. *Journal of Food Engineering*. 2021;305. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110611>
8. Martynenko A, Misra NN. Thermal phenomena in electrohydrodynamic (EHD) drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021;74. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102859>
9. Rashidi S, Bafekr H, Masoodi R, Languri EM. EHD in thermal energy systems – A review of the applications, modelling, and experiments. *Journal of Electrostatics*. 2017;90:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.08.008>
10. Baldanov BB, Ranzhurov TsV, Sordonova MN, Budazhapov LV. Changes in the properties and surface structure of grain seeds under the influence of an atmospheric pressure glow discharge. *Advances in Applied Physics*. 2019;7(3):260–266. (In Russ.). [Изменение свойств и структуры поверхности семян зерновых культур под воздействием тлеющего разряда атмосферного давления / Б. Б. Балданов [и др.] // *Успехи прикладной физики*. 2019. Т. 7. № 3. С. 260–266.].
11. Misra NN, Yadav B, Roopesh MS, Jo C. Cold plasma for effective fungal and mycotoxin control in foods: Mechanisms, inactivation effects, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2019;18(1):106–120. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12398>
12. Li S, Chen S, Han F, Xv Y, Sun H, Ma Z, *et al.* Development and optimization of cold plasma pretreatment for drying on corn kernels. *Journal of Food Science*. 2019;84(8):2181–2189. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14708>
13. Shtan'ko RI. Electric ozonation device for grain drying. Cand. eng. sci. diss. Zernograd: Azov-Black Sea State Agricultural Engineering Academy; 2000. 143 p. (In Russ.). [Штанько Р. И. Электроозонаторная установка для сушки зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Зерноград, 2000. 143 с.]. <https://www.elibrary.ru/QDDZOD>
14. Mirzaei-Baktash H, Hamdami N, Torabi P, Fallah-Joshaqani S, Dalvi-Isfahan M. Impact of different pretreatments on drying kinetics and quality of button mushroom slices dried by hot-air or electrohydrodynamic drying. *LWT*. 2022;155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112894>
15. Xiao A, Ding C. Effect of electrohydrodynamic (EHD) on drying kinetics and quality characteristics of shiitake mushroom. *Foods*. 2022;11(9). <https://doi.org/10.3390/foods11091303>
16. Martynenko A, Iranshahi K, Defraeye T. Plate versus mesh collecting electrode for electrohydrodynamic (EHD) drying. *Drying Technology*. 2022;40(13):2759–2769. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1962338>
17. Voroshilin RA, Kurbanova MG, Ostapova EV, Makhambetov EM, Petrov AN, Khelef MEA. Effect of gelatin drying methods on its amphiphilicity. *Foods and Raw Materials*. 2022;10(2):252–261. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-534>
18. Shorstkiy IA. Pulsed electric field treatment of biomaterials in pre-drying. Krasnodar: Dom-Yug; 2020. 172 p. (In Russ.). [Шорсткий И. А. Применение обработки импульсным электрическим полем биоматериалов при подготовке к сушке. Краснодар: Дом-Юг, 2020. 172 с.]. <https://www.elibrary.ru/DRFQUI>
19. Polishchuk NV, Panchenko MS, Panchenko IM. Effect of the radii of quartz capillaries on water-rising in electric field. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2008;44(4):45–50. (In Russ.). [Полищук Н. В., Панченко М. С., Панченко И. М. Влияние радиусов кварцевых капилляров на высоту поднятия воды в электрическом поле // *Электронная обработка материалов*. 2008. Т. 44. № 4. С. 45–50.].
20. Sheikholeslami M, Seyednezhad M. Simulation of nanofluid flow and natural convection in a porous media under the influence of electric field using CVFEM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;120:772–781. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.087>
21. Los A, Ziuzina D, Boehm D, Cullen PJ, Bourke P. Investigation of mechanisms involved in germination enhancement of wheat (*Triticum aestivum*) by cold plasma: Effects on seed surface chemistry and characteristics. *Plasma Processes and Polymers*. 2019;16(4). <https://doi.org/10.1002/ppap.201800148>
22. Gao X, Zhang A, Héroux P, Sand W, Sun Z, Zhan J, *et al.* Effect of dielectric barrier discharge cold plasma on pea seed growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2019;67(39):10813–10822. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b03099>
23. Cao W, Nishiyama Y, Koide S, Lu ZH. Drying enhancement of rough rice by an electric field. *Biosystems Engineering*. 2004;87(4):445–451. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.12.007>
24. Cao W, Nishiyama Y, Koide S. Electrohydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field. *Journal of Food Engineering*. 2004;62(3):209–213. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00232-2)
25. Qu J, Zhang J, Li M, Tao W. Heat dissipation of electronic components by ionic wind from multi-needle electrodes discharge: Experimental and multi-physical analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;163. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120406>
26. Semenov VK, Belyakov AA, Ivanova NB. Mathematical modeling of a submerged jet of electric wind. *Vestnik IGEU*. 2021;(3):51–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2021.3.051-058>
27. Martynenko A, Kudra T. Electrohydrodynamic dryer: Effect of emitters' density and gap between discharge and collecting electrodes. *Drying Technology*. 2020;38(1–2):158–167. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1621338>
28. Pui LP, Saleena LAK. Effects of spray-drying parameters on physicochemical properties of powdered fruits. *Foods and Raw Materials*. 2022;10(2):235–251. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-533>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2494>
<https://elibrary.ru/HGUBMZ>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Пневмоцентробежная классификация дисперсных частиц в процессе переработки зерна в муку



О. Н. Терехова*^{ORCID}, Я. С. Дуюнова^{ORCID}

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова^{ORCID}, Барнаул, Россия

Поступила в редакцию: 26.05.2023
Принята после рецензирования: 29.09.2023
Принята к публикации: 03.10.2023

*О. Н. Терехова: onter@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3832-8111>
Я. С. Дуюнова: <https://orcid.org/0009-0003-1944-8841>

© О. Н. Терехова, Я. С. Дуюнова, 2024



Аннотация.

В России наблюдается спрос на мучную продукцию, вырабатываемую с использованием «сухого» метода получения крахмала и клейковины. Целью работы являлось исследование параметров пневмоцентробежной классификации тонкодисперсных частиц в спиральном классификаторе-отделителе, предназначенном для разделения продуктов размола зерна на фракции, которые отличаются комплексом свойств, отделения твердой фазы от воздуха и выделения из общего потока продуктов размола высокобелковой фракции муки.

Объект исследования – процесс пневмокласификации продуктов размола зерна. Применили математическое моделирование и провели эксперимент. Аналитически рассмотрели процесс движения и осаждения частиц в рабочей зоне классификатора. Изучили влияние на характер траекторий движения частиц, их осаждение массы и плотности, скорость воздуха и соотношение геометрических параметров канала. Экспериментально определили влияние на общую эффективность процесса классификации скорости движения воздуха и концентрации аэросмеси.

Получили результаты по режимам классификации для частиц с различных размольных и драных систем, которые отличаются скоростями витания, размерами и плотностью. При скорости воздуха от 6 до 8 м/с на первом витке спирального классификатора с отношением внутреннего радиуса змеевика к внутреннему диаметру трубы $r_1/d_{тр} = 7,9$, на втором витке при $r_1/d_{тр} = 7$, на третьем витке при $r_1/d_{тр} = 6,25$. На последующих витках при $r_1/d_{тр} < 5$ выделяется фракция размером до 160 мкм, в том числе мелкие высокобелковые фракции муки с размером частиц 17–20 мкм. Около 80 % продукта оседает на первом витке, на втором около 12 % продукта, а на третьем около 8 % продукта. Максимальная эффективность отделения продукта третьей драной системы достигает 98 % при входной скорости 6 м/с. Максимальная эффективность отделения муки высшего сорта достигает 99,2 % при входной скорости 4,2 м/с.

Полученные результаты подтверждают возможность использования классификатора для разделения продуктов измельчения зерна пшеницы на фракции по комплексу свойств с выделением высокобелковой фракции муки и отделением дисперсного продукта от воздушного потока как в качестве самостоятельного устройства, так и при работе в технологической схеме сортового помола зерна в муку на этапе работы сепараторов и разгрузчиков пневмотранспортных систем.

Ключевые слова. Мука, продукты размола, фракции муки, высокобелковая фракция, дисперсная частица, воздух, спираль, классификатор

Финансирование. Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы кафедры машины и аппараты пищевых производств на базе учебно-исследовательской лаборатории вентиляции Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова (АлтГТУ)^{ORCID}.

Для цитирования: Терехова О. Н., Дуюнова Я. С. Пневмоцентробежная классификация дисперсных частиц в процессе переработки зерна в муку // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 124–134. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2494>

Pneumocentrifugal Classification of Dispersed Particles during Grain Milling



Olga N. Terekhova*, Yana S. Duyunova

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Received: 26.05.2023

Revised: 29.09.2023

Accepted: 03.10.2023

*Olga N. Terekhova: onter@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-3832-8111>

Yana S. Duyunova: <https://orcid.org/0009-0003-1944-8841>

© O.N. Terekhova, Ya.S. Duyunova, 2024



Abstract.

Russia enjoys a stable demand for flour products, including those obtained by the dry method of starch and gluten production. This study featured pneumocentrifugal parameters of fine particles in a spiral separator that classified milled grain into fractions, separated the solid phase from air, and identified the high-protein flour fraction in the flow.

Pneumatically classified flour was subjected to mathematical modeling and experimental research. The analysis of movement and deposition of particles in the working area covered particle mass, density, air-flow rate, and geometry, as well as their effect on the trajectory of particle movement and deposition. The experiment also involved the effect of air-flow rate and air-mix concentration on the classification efficiency.

Particles from various grinding and break systems demonstrated classification modes that differed in soaring rate, size, and density. At an air-flow rate of 6–8 m/s, turn 1 of the spiral separator had the ratio of the internal coil radius to the inner pipe diameter as $r_1/d_{\text{pipe}} = 7.9$; it was $r_1/d_{\text{pipe}} = 7$ on turn 2 and fell down to $r_1/d_{\text{pipe}} = 6.25$ on turn 3; for all subsequent turns, the ratio was $r_1/d_{\text{pipe}} < 5$. Under these conditions, the fraction reached 160 μm and included small high-protein flour fractions with a particle size of 17–20 μm . The percentage of product accumulated on turns 1, 2, and 3 was 80, 12, and 8%, respectively. The maximal product separation efficiency of the third drain system was as high as 98% at an input rate of 6 m/s. The maximal separation efficiency for premium flour reached 99.2% at an input rate of 4.2 m/s.

The separator proved efficient in classifying wheat grain flour into fractions as it was able to separate high-protein fraction and dispersed particles from the air flow. The separator could be used both as an independent device and as part of a complex technological scheme at the stage of pneumatic separators and unloaders.

Keywords. Flour, milling products, flour fractions, high-protein fraction, dispersed particle, air, spiral, separator

Funding. The research was performed at the Department of Food Production Equipment and the Academic and Research Ventilation Laboratory, Polzunov Altai State Technical University (AltSTU).

For citation: Terekhova ON, Duyunova YaS. Pneumocentrifugal Classification of Dispersed Particles during Grain Milling. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):124–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2494>

Введение

Процессы переработки зерна в муку предусматривают многократное измельчение зерна и продуктов его размола и разделение полученных веществ на фракции. Эти фракции отличаются комплексом физико-механических свойств в соответствии с требованиями ведения технологического процесса, ассортиментом и назначением готового продукта. Существующие устройства и способы не всегда отвечают возросшим требованиям рынка потребления. Помимо стандартной сортовой классификации муки, есть потребность в ее видах с повышенным или пониженным содержанием отдельных компонентов. Например, белка или крахмала, которые используются для специальных видов хлеба и кондитерских изделий [1]. Процесс производства

муки всегда занимал важное место в перерабатывающем производстве, его нуждам были подчинены энергетические и сырьевые ресурсы. Однако современные реалии требуют рационального природопользования и энергосбережения при сохранении качественных показателей и соблюдении требований экологичности и безопасности производства. Не менее важно решение проблемы обеспечения населения качественными продуктами питания, в частности функционального назначения, спрос на которые возрос. Это подтверждают исследования в данной области [2, 3].

Химический состав хлеба и хлебобулочных изделий должен соответствовать возрастной категории, характеру занятий, особенностям здоровья и другим потребительским критериям выбора. Сегодня в ряде

стран актуальна такая проблема, как непереносимость белка злаковых культур – глютена [4]. Разработано большое количество продуктов на основе муки различных культур, которые не имеют в своем составе глютена, в том числе макаронных изделий [5]. Многие исследования в данной области направлены на изучение свойств глютена и снижение его токсичных свойств. Например, через удаление из него аллегренной фракции – глиадина [6].

Регулирование в составе муки и хлеба количества белка и крахмала требует создания новых способов и устройств для получения фракций с их различным содержанием, простых по своей конструкции, доступных по цене, легких в эксплуатации и многофункциональных. Это актуально для малого перерабатывающего производства и фермерских хозяйств, работающих в агропромышленном комплексе, которые не могут использовать развитую технологическую цепочку, как крупные переработчики. Сократить расходы на получение продуктов размола зерна без ущерба качеству и экологии возможно, например, при совмещении технологических и транспортных операций и процессов обеспыливания [7, 8]. Традиционный способ получения высокобелковой муки используется на хлебокомбинатах с пневмотранспортом муки и продуктов размола на этапе работы циклонов – разгрузителей – благодаря задержке в них только основной части продукта (более крупная фракция), а самая мелкая фракция, которая содержит больше белка, улетучивается с воздухом и улавливается на фильтре. Изучив теорию циклонной очистки воздуха, мы пришли к выводу, что в формируемых в циклоне спиральных потоках воздуха способен отделиться лишь определенный диапазон частиц. Дисперсность отделяемой в циклоне частицы зависит от вязкости воздуха, наружного радиуса циклона, плотности пыли и частоты ее вращения, числа витков, которые совершает частица [9, 10].

Эффективность сепарации центробежного пылеотделителя зависит от его конструктивного исполнения, оптимальной входной скорости воздуха и свойств самой пыли. Вязкость для данного состояния воздуха – это величина постоянная, как и плотность для пыли данного типа. Уменьшать отношение наружного радиуса циклона к внутреннему невозможно до бесконечности. Следовательно, чтобы повысить эффективность сепарации мелкодисперсной пыли в центробежном пылеотделителе, необходимо увеличить частоту вращения частиц или создать такие условия сепарации, при которых частица совершала бы максимальное число витков, двигаясь по винтовой траектории. Эффект воздушной классификации тонкодисперсного материала подтверждается исследованиями, направленными на разработку соответствующих устройств и способов [11–13].

Вопросы сепарации мелкодисперсных частиц привели к созданию конструкций, которые позволяют увеличить действие центробежных сил. Например, роторные центробежные сепараторы, используемые рядом

отраслей промышленности при производстве тонкодисперсных порошков, в газоочистке и центрифугировании жидких сред [14–18]. Однако конструкции с роторной частью требуют дополнительных энергозатрат на привод вращающихся элементов, они сложны в эксплуатации и обслуживании.

Идея создания спирального классификатора возникла на основе анализа поведения аэродисперсного потока в центробежно-гравитационном пылеотделителе – циклоне, где отделение твердой фракции осуществляется на витках спирали, образованной нисходящим потоком воздуха. Диаметр витка определяется размерами корпуса циклона и предполагает отделение фракций лишь какой-то одной дисперсности. В нашем способе возможен одновременный отбор различных частиц при одновременном отделении твердой фазы от воздуха. Мы предложили способ отделения мелкодисперсных частиц в спиральном классификаторе, который позволяет отбирать каждую фракцию дисперсной фазы в пределах своего витка гибкого трубопровода уменьшающегося диаметра. Данный способ защищен патентом РФ, его работоспособность подтверждена экспериментально [8, 19].

Посредством воздействия на продукт воздушного потока производят процесс классификации различных материалов в мукомолье, например, разделяя по добротности продукты размола на ситовечных машинах, а также выделяют крахмальную и белковую фракции из муки различных культур [20, 21]. «Сухой способ» получения крахмала из семян злаковых культур посредством пневмокласификации, основанный на разности плотностей белка и крахмала, представляет большой интерес, т. к. является более экологичным и экономичным [22, 23].

Научное исследование сегодня невозможно без современных методов моделирования и расчета: компьютерные системы и программные продукты используются при разработке новых функциональных пищевых продуктов, а также автоматизации технологических линий пищевых производств. При помощи современных средств компьютерного проектирования и моделирования создаются сбалансированные рецептурные решения и определяются оптимальные кинематические, аэродинамические и другие технические параметры различных пищевых систем [24–27].

Целью работы являлось исследование параметров пневмоцентробежной классификации тонкодисперсных частиц в спиральном классификаторе-отделителе, который предназначен для разделения продуктов размола зерна на фракции, отличающиеся комплексом свойств, отделения твердой фазы от воздуха и выделения из общего потока продуктов размола высокобелковой фракции муки, а также выявление общих закономерностей влияния на процесс классификации таких параметров, как концентрация исходной аэродисперсной смеси, скорость движения воздуха в канале и соотношение геометрических параметров спирального канала сепаратора.

Объекты и методы исследования

Объектами на разных этапах работы являлись:

- процесс пневмоцентробежной классификации полидисперсных частиц в спиральном классификаторе. Моделирование процесса производилось при помощи компьютерной программы, разработанной на основе решения дифференциальных уравнений движения частиц в рабочей зоне;
- мука высшего первого и второго сортов, произведенная по ГОСТ Р 52189-2003;
- продукты размола зерна пшеницы при сортовом помоле зерна с первой, второй и третьей драных систем;
- продукты размола с размольных систем;
- мука высокобелковая.

Определение размеров частиц отделяемых фракций осуществлялось по ГОСТ 27560-87. Количество клейковины устанавливали по ГОСТ 27839-88. Скорость движения воздуха в каналах спирального классификатора определяли по ГОСТ 17.2.4.06-90.

Измерение скорости и расхода воздуха осуществляли косвенным методом через измерение динамических давлений при помощи манометра дифференциального цифрового типа ДМЦ-01 модификации «М» (с обработкой данных) в комплекте с напорными трубками модификации Пито в соответствии с ГОСТ 8.361-79. Прибор ДМЦ-01М позволяет рассчитать скорость и объемный расход газа в одной точке поперечного сечения канала.

Планирование эксперимента, статистическую обработку опытных данных и анализ полученных результатов проводили классическим методом и с помощью стандартных программ. Для получения математической модели исследуемого процесса, которая учитывает изменение нескольких факторов, влияющих на процесс, использовали методы математического планирования эксперимента. Обработку результатов полных факторных экспериментов проводили по алгоритму Иойтса. Для статистического анализа значимости коэффициентов регрессии использовали метод наименьших квадратов.

Спланировали и поставили двухфакторный эксперимент ПФЭ2. Ввод данных и вывод результата осуществляется с экрана в виде матрицы или графика. Все исследования проводили в 3-кратной повторности с обработкой результатов в математическом редакторе Mathcad.

Основным критерием оптимизации параметров процесса пневмоцентробежной классификации являлась его эффективность, т. е. четкость разделения на фракции полидисперсного продукта на соответствующем витке и степень отделения от воздуха тонкой пылевой фракции дисперсной фазы. В качестве параметров оптимизации будем рассматривать соотношение таких конструктивных размеров, как диаметр витка к его радиусу для выделения фракции определенного размера, а также аэродинамических свойств: скорость движения воздушного потока в сепарационной зоне в зависимости от скорости витания отделяемых частиц.

С точки зрения математического моделирования критерием эффекта сепарации дисперсных частиц из воздушного потока является их осаждение на криволинейной поверхности спирального витка, т. е. момент, при котором частица достигает поверхности сепарационной зоны, в нашем случае внутренней поверхности внешней стенки спирального витка, т. е. путь, пройденный частицами, и разность в координатах частиц, которая определяется построением траекторий движения частиц, полученных на основе решения дифференциальных уравнений ее движения.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрели процесс пневмоцентробежной классификации мелкодисперсных частиц, которые поступают с потоком воздуха в спиральный классификатор, образованный витками гибкого трубопровода уменьшающегося радиуса. Полидисперсный продукт подается в спиральный классификатор потоком воздуха, где под действием комплекса сил разделяется на фракции, которые отличаются физико-механическими и аэродинамическими свойствами. Более крупные частицы проходят меньший путь до их оседания на поверхности витков спирального классификатора и раньше попадают в осадочную камеру первого витка, а затем выводятся из устройства [7, 8]. Подобные выводы представлены в других работах, авторы которых отметили, что часть газа, отобранная у внешней стенки, содержит пыль крупных фракций [12, 13]. Частицы средней дисперсности проделывают больший путь и оказываются в зоне осаждения второго витка, а для осаждения самых мелких частиц необходимо большее время релаксации. Их осаждение происходит на дальних витках самого меньшего радиуса.

Изучение траекторий движения частиц и их взаимовлияние на основе математического моделирования проводят с целью установления характера процесса классификации полидисперсного потока в пределах сепарационной зоны криволинейных каналов для определения оптимальных параметров процесса, размеров и конструктивных особенностей соответствующих устройств [28–31].

Рассмотрели движение частиц в пределах одного витка спирального сепаратора. Для этого провели анализ сил, действующих на одиночную частицу в потоке газа в криволинейном спиральном канале, для установления характера ее движения. Кроме силы тяжести, на частицу действуют силы аэродинамической природы, несущие двухмерный поток. Канал имеет криволинейную траекторию с радиусом кривизны r , а также постоянное сечение диаметром d . Дисперсный поток в винтовом криволинейном канале классификатора движется из-за разности давлений, создаваемых вентилятором. В спиральный канал подается воздушно-пылевой поток из аспирационной сети или продукты размола зерна системой пневмотранспортирования с параметрами Q , м³/с, и v , м/с. Частицы,

осевшие на поверхности канала, затем могут быть направлены в сборники для соответствующих фракций посредством виброперемещения.

При рассмотрении сил, действующих на частицу, предполагают, что скорость частицы может быть больше или меньше скорости потока. В общем случае характер движения частиц в криволинейном потоке и сил, действующих на частицы, указывает на наиболее значимые из них [32].

На рисунке 1 представлена схема сил, действующих на частицу, если скорость потока u больше скорости частицы v . Относительная скорость частицы $W = U - V$. Таким образом, при движении в криволинейном канале постоянного сечения на частицу в воздушном потоке действуют следующие силы:

– сила сопротивления

$$F_c = 0,5\rho_c \xi (\bar{u} - \bar{v}) |\bar{u} - \bar{v}| S_m \quad (1)$$

где ξ – коэффициент сопротивления, определяемый через критерий Рейнольдса, т. е. $\xi = f(Re)$; S_m – площадь миделева сечения сферической частицы, m^2 ;

– сила инерции частицы, обусловленная градиентом скорости потока воздуха

$$F_{\pm \dot{e}} = m(d\omega/dt) \quad (2)$$

– сила инерции частицы, вызываемая изменением относительной скорости

$$F_{a\dot{e}} = m(du/dt) \quad (3)$$

– тангенциальная сила инерции частицы

$$F_{\times \dot{O}} = -2m\omega_a \bar{u} \quad (4)$$

– сила Кориолиса

$$F_{ei\dot{O}} = -2m\omega_a \bar{\omega} \quad (5)$$

– сила тяжести

$$F_g = mg \quad (6)$$

– сила Архимеда

$$F_A = V_q \times \rho \times g = \frac{1}{6} \pi \times d_s^3 \times \rho \times g \quad (7)$$

– сила Магнуса, проекции которой на оси X и Y имеют вид

$$F_{Mx} = -\frac{1}{8} \pi^2 d^3 \rho_{\pm} (v_x - u_x) \times \omega_{\pm} \quad (8)$$

$$F_{My} = -\frac{1}{8} \pi^2 d^3 \rho_{\pm} (v_y - u_y) \times \omega_{\pm} \quad (9)$$

На частицу также будут действовать сила противодействия $\bar{F}_p$ и сила Бассе $\bar{F}_b$. Однако характер действия ряда сил не сопоставим по своей величине с аэродинамической силой $\bar{F}$. Поэтому они не оказывают

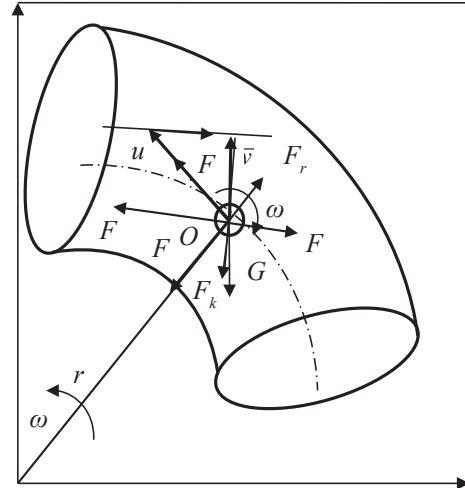


Рисунок. 1 Схема действующих на частицу сил в витке спирального классификатора

Figure 1. Forces that affect particles in the coil of the spiral classifier

большого влияния на поведение частиц. Для решения данной задачи газодинамики аэрозоля начнем с ее формализации. Мы задали следующие условия процесса: – в канале движется одиночная частица, не учитывая фактор взаимодействия частиц друг с другом, коагуляцию частиц и явление сцепления частиц с образованием укрупненных единиц – конгломератов, приняв условие постоянства массы частицы в процессе ее движения; – скорость и расход воздуха в любом сечении канала является величиной постоянной, поскольку перепад давления в классификаторе будет незначителен (до 1200 Па). Поэтому сжимаемостью воздуха можно пренебречь и объемный расход Q воздуха на входе и на выходе из спирального канала считать постоянным, применив уравнение неразрывности потока; – воспользуемся понятием средней скорости воздуха как фиктивной скорости, обеспечивающей заданный расход воздуха в любом сечении; – частицы равномерно распределены по сечению; – эффектом сепарации частицы будем считать момент достижения ею внешней стенки криволинейного канала; – частицы, достигшие поверхности криволинейного канала, непрерывно выводятся, не препятствуя осаждению других частиц; – концентрация аэрозоля не оказывает характерного влияния на движение дисперсных частиц; – движение частицы в газовом потоке подчиняется закону Стокса.

Движение дисперсного потока происходит в канале, поэтому представим уравнение в цилиндрических координатах z , r и φ . При этом

$$\frac{dz}{dt} = U_z \quad (10)$$

$$\frac{dr}{dt} = U_r \quad (11)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega^* \quad (12)$$

где U_z – скорость движения частицы вдоль оси Oz ; U_r – скорость радиального дрейфа частицы; ω^* – условная угловая скорость частицы, которую можно выразить через касательную составляющую скорости частицы. В общем случае $\omega^* \neq \omega$, т. е. угловой скорости потока, $\omega^* = \text{const}$.

В общем виде дифференциальное уравнение движения частицы в канале спирального классификатора в векторной форме можно записать в виде

$$m_{\text{ч}} \times \vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{G} + \vec{F}_A + \vec{F} \quad (13)$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса частицы; a – ускорение частицы; G – сила тяжести; F_A – сила Архимеда; F – аэродинамическая сила.

С учетом значимых сил, действующих на частицу и определяющих характер ее движения, записали дифференциальные уравнения движения частицы:

$$\left. \begin{aligned} m \times a_r &= F_r^{\text{соп}} \\ m \times a_\phi &= F_\phi^{\text{соп}} \\ m \times a_z &= -mg + F_z^{\text{соп}} \end{aligned} \right\} \text{ или } \left. \begin{aligned} a_r &= \ddot{r} - r \times \dot{\phi}^2 \\ a_\phi &= r \times \ddot{\phi} + 2\dot{r} \times \dot{\phi} \\ a_z &= \ddot{z} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\text{где } v_r = \dot{r}, \quad v_\phi = r \times \dot{\phi}, \quad v_z = \dot{z}. \quad (15)$$

Принимая во внимание указанные выше допущения, полагаем, что аэродисперсный поток движется в спиральном канале как твердое тело при винтовом движении с угловой скоростью ω и постоянной скоростью u_z . Тогда можно считать, что скорость воздуха в точке с координатами r, ϕ, z будет иметь следующие параметры: $u_r = 0, u_\phi = r \times \omega, u_z = u_z$.

Записали выражения для относительной скорости воздуха $\vec{v}^{\text{отн}}$ в виде

$$v_r^{\text{отн}} = \dot{r}, \quad v_\phi^{\text{отн}} = r \times (\dot{\phi} - \omega), \quad v_z^{\text{отн}} = \dot{z} - u_z. \quad (16)$$

В процессе движения сила аэродинамического сопротивления, действующая на частицу, уравновешена движущей силой, определяемой относительной скоростью $\vec{v}^{\text{отн}}$, и противоположна ей по направлению:

$$\vec{F}^{\text{соп}} = -k_l \times v_{\text{отн}}^2 \times \frac{\vec{v}^{\text{отн}}}{v_{\text{отн}}} = -k_l \times v_{\text{отн}} \times \vec{v}^{\text{отн}} \quad (17)$$

где $v_{\text{отн}}$ – модуль относительной скорости частицы

$$v_{\text{отн}} = \sqrt{\dot{r}^2 + r^2 (\dot{\phi} - \omega)^2 + (\dot{z} - u_z)^2} \quad (18)$$

k_l – постоянный коэффициент, определяемый свойствами частиц, такими как масса и скорость витания:

$$k_l = \frac{mg}{v_{\text{вит}}} \quad (19)$$

Преобразовали уравнение (14) к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{r} &= r \times \dot{\phi}^2 - \frac{k_l}{m} \dot{r} \times v_{\text{отн}} \\ r \ddot{\phi} &= -2\dot{r} \dot{\phi} - \frac{k_l}{m} r (\dot{\phi} - \omega) \times v_{\text{отн}} \\ \ddot{z} &= -g - \frac{k_l}{m} (\dot{z} - u_z) \times v_{\text{отн}} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Интегрируя уравнения (20) и вводя начальные условия, нашли уравнения движения частицы. Допустим, что частица в начальный момент времени при входе в первый виток криволинейного канала спирального сепаратора имела одинаковую скорость с потоком воздуха. Привели дифференциальные уравнения движения частицы в спиральном канале (21) к безразмерному виду, поделив каждое на $r_l \omega^2$

$$\left. \begin{aligned} \ddot{r} &= r(\dot{\phi} + 1)^2 - \tilde{k} \times \dot{r} \times v_{\text{отн}} \\ r \ddot{\phi} &= -2\dot{r}(\dot{\phi} + 1) - \tilde{k} r \dot{\phi} v_{\text{отн}} \\ \ddot{z} &= -\tilde{g} \tilde{k} (\dot{z} - \tilde{u}_z) \times v_{\text{отн}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\text{где } v_{\text{отн}} = \sqrt{\dot{r}^2 + (r \dot{\phi})^2 + (\dot{z} - \tilde{u}_z)^2}.$$

Безразмерные постоянные параметры определяются по формуле (22):

$$\begin{aligned} \tilde{u}_z &= u_z / (r_l \omega), & \tilde{g} &= g / (r_l \omega^2) \\ \tilde{k} &= \tilde{g} / \tilde{v}_{\text{вит}}^2, & \tilde{v}_{\text{вит}} &= v_{\text{вит}} / (r_l \omega) \end{aligned} \quad (22)$$

где r_l – радиус витка по внутренней поверхности трубки.

Получив ряд безразмерных параметров, включая коэффициент

$$\tilde{k}_v = \frac{g \times r_l}{v_{\text{вит}}^2},$$

и задавшись начальными условиями, дифференциальные уравнения (21) решались в специальной компьютерной программе Separator. Результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей (рис. 2–3).

Значение коэффициента $\tilde{k}_v$ связано со скоростями витания частиц, которые определяются ее физико-механическими и аэродинамическими свойствами. Как эти параметры отличаются для частиц продуктов с различными системами видно из таблицы 1.

Траектории движения частиц, построенные в безразмерных координатах при постоянном параметре соотношения диаметра витков к радиусу и входной скорости, дают представление о характере движения частиц в рабочей зоне классификатора. На рисунке 2 можно видеть, что частицы продукта с первой драной системы, имеющие $\tilde{k}_v = 0,03$, при соответствующей ему скорости витания 5,5 м/с, оказываются раньше к поверхности оседания, чем частицы муки высшего сорта с параметрами $\tilde{k}_v = 0,98$ и 1 м/с соответственно.

На рисунке 3 приведен характер изменения радиальной координаты частиц, отличающихся скоростями

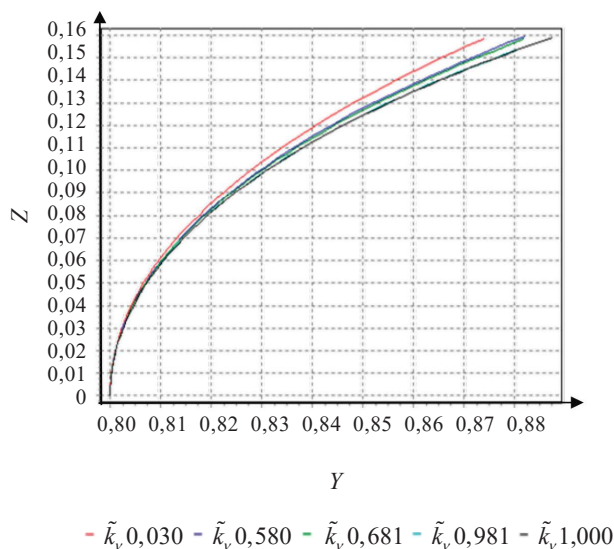


Рисунок 2. Траектории движения частиц в плоскости YZ

Figure 2. Particle trajectories, YZ

Таблица 1. Параметры продуктов размола зерна

Table 1. Parameters of grain milling products

№	Продукт	v_{aum} , м/с	$\tilde{k}_v$
1	Мука пшеничная в/с	1,00	0,981
2	Мука 1-го сорта	1,20	0,681
3	Мука 2-го сорта	1,30	0,580
4	I драная система	5,50	0,030
5	II драная система	3,80	0,070
6	III драная система	3,00	0,110
7	Первые размольные системы	1,80	0,300
8	Последние размольные системы	1,60	0,380
9	Высокобелковая фракция муки	0,05	392

витания, но имеющих тонкодисперсную структуру. Этот характер показывает теоретическую возможность делимости смеси даже для мелких частиц, которые не только характеризуются различной дисперсностью, но и обладают разной плотностью, а значит химическим составом.

Результаты моделирования процесса пневмоцентробежной классификации мелкодисперсных частиц в криволинейном канале спирального классификатора позволят создать устройства, которые имеют оптимальное соотношение размеров рабочей зоны классификатора и параметров воздушного потока, соответствующих физико-механическим свойствам частиц продуктов размола зерна, для создания условий их стабильного улавливания на соответствующем витке классификатора и вывода из рабочей зоны. Таким образом, в качестве оптимальных теоретических параметров процесса пневмоцентробежной классификации тонкодисперсных частиц в спиральном классифика-

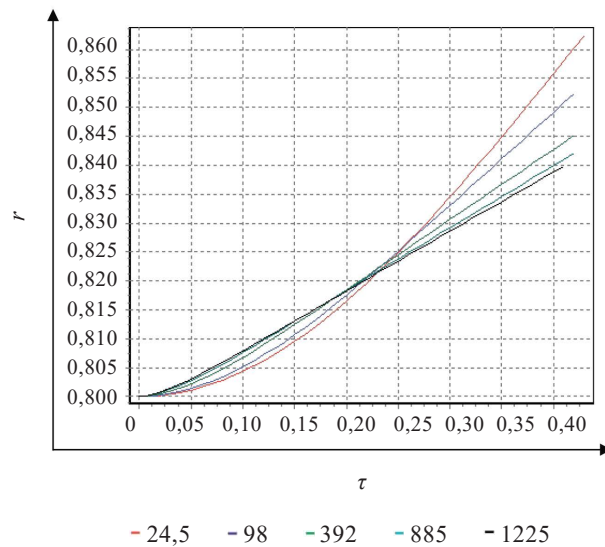


Рисунок 3. Изменение радиальной координаты от времени

Figure 3. Effect of processing time on radial coordinate

торе-отделителе, предназначенном для разделения продуктов размола зерна на фракции и отделения дисперсной фазы от воздуха частиц с первой драной системы, наилучшим соотношением внутреннего диаметра витка к его радиусу ($d_{tr}:r_1$) является 1:8 при скорости движения потока 6,5 м/с. Для частиц со второй драной системы $d_{tr}:r_1$ соотношение составило 1:7, для частиц муки $d_{tr}:r_1 = 1:4,5$ при той же скорости воздушного потока.

Экспериментальные исследования процесса пневмоцентробежной классификации проводились на экспериментальной установке (рис. 4).

Экспериментальному исследованию были подвергнуты продукты размола зерна с различных драных систем, мука и полидисперсные смеси с соотношением масс частиц различной дисперсности, таких как мука, манная крупа и просо. Отдельно исследовали муку высшего сорта и продукты с драных и размольных систем.

Продукт подавался в загрузочное устройство (2) дозатора (1). Затем он подхватывался воздушным потоком и транспортировался в спиральный воздушный классификатор (3) для разделения на четыре фракции по своим физико-механическим и аэродинамическим показателям. Продукт, осевший на каждом витке в осадочных камерах (4), (5) и (6), взвешивали, определяли общую и пофракционную эффективность, а также подвергали анализу дисперсного состава на ситовом лабораторном классификаторе. При классификации муки определили состав фракций на содержание белка и крахмала.

Техническая характеристика спирального классификатора следующая: расход воздуха $Q = 8,3-15$ м³/ч, входная скорость $V_{вх} = 1,5-12$ м/с, потери давления $H_{ц} = 78,2-270,6$ Па, коэффициент сопротивления: $\zeta_{ц} = 8,9$.

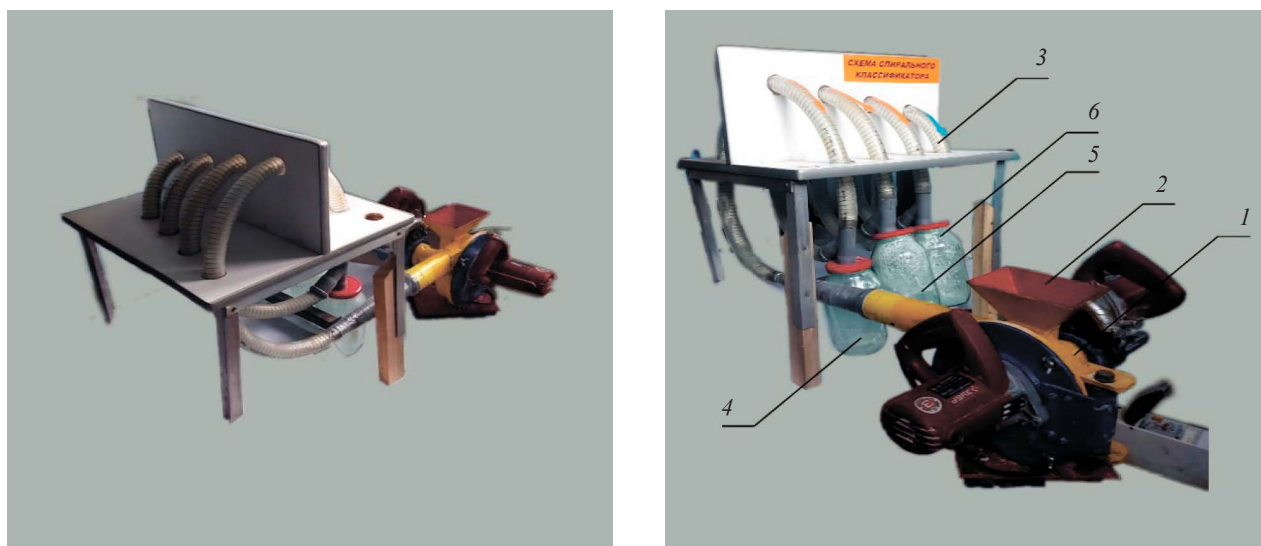


Рисунок 4. Экспериментальная установка: 1 – дозатор, 2 – загрузочное устройство, 3 – спиральный классификатор, 4–6 – осадочные камеры

Figure 4. Experimental separator: 1 – dispenser, 2 – loading device, 3 – spiral classifier, 4–6 – catch box

Таблица 2. Матрица эксперимента и результаты опыта

Table 2. Experiment matrix and results

Скорость воздушного потока на входе в классификатор (X_1), м/с	Концентрация аэрозоли (X_2), г/м ³	Эффективность отделения муки (Y_1), %									
		78,0	79,0	78,9	78,9	78,8	78,1	78,0	72,9	72,9	73,0
1,5	5	81,0	82,9	88,0	86,3	89,0	83,6	80,8	72,1	73,1	74,0
2	7	82,0	83,0	84,3	98,2	99,1	84,5	83,5	84,8	85,3	85,1
3	8	82,0	82,8	84,2	99,0	99,2	98,8	97,7	95,9	97,9	95,4
4,2	9	82,3	82,7	84,1	85,1	99,0	95,1	97,3	97,9	87,6	86,7
5,4	10	82,2	82,6	83,0	94,3	98,0	95,1	97,7	88,4	87,2	86,8
6,6	12	82,4	82,5	82,5	83,0	84,2	85,2	87,2	87,3	86,9	86,7
7,8	14	83,0	82,5	82,3	83,0	84,1	75,1	76,8	77,2	76,6	76,6
8,0	16	82,2	82,5	82,2	82,0	83,0	74,9	76,9	86,9	75,9	75,2
9,2	18	80,3	70,1	75,0	72,0	72,5	75,0	76,3	76,6	75,0	75,1
12	20										

Экспериментальные исследования были направлены на определение оптимальных режимов процесса пневмокласификации и отделение дисперсной фазы от воздушного потока. Установили влияние на эффективность процесса таких факторов, как скорость воздушного потока и объемная концентрация продуктов размола. Для муки высшего сорта скорость воздушного потока варьировалась в пределах 1,5–12 м/с, концентрация аэрозоли от 0,87 до 1,27 кг/кг, расход транспортируемого материала от 11 до 21 кг/ч. Конструкция классификатора обеспечивала соотношение геометрических размеров витков классификатора в соответствии с найденными расчетным путем значениями для различных дисперсных частиц.

В таблице 2 представлены результаты расчетных значений общей эффективности отделения муки от

воздуха в классификаторе в зависимости от скорости потока и концентрации аэрозоли.

По результатам эксперимента составили уравнение регрессии в виде полинома второй степени, которое включает члены, учитывающие эффект парного межфакторного взаимодействия. Для определения эффективности отделения муки в спиральном классификаторе получили зависимость (23) и поверхность отклика (рис. 5b):

$$Y = 49,52 + 15,96X_1 + 1,344X_2 - 2,448X_1^2 + 0,01X_2^2 + 0,04X_1X_2 \quad (23)$$

Экспериментальные исследования подтверждают результаты математического моделирования, говоря о возможности разделения фракций муки и продуктов размола по комплексу физико-механических свойств: размер, плотность и аэродинамические свойства.

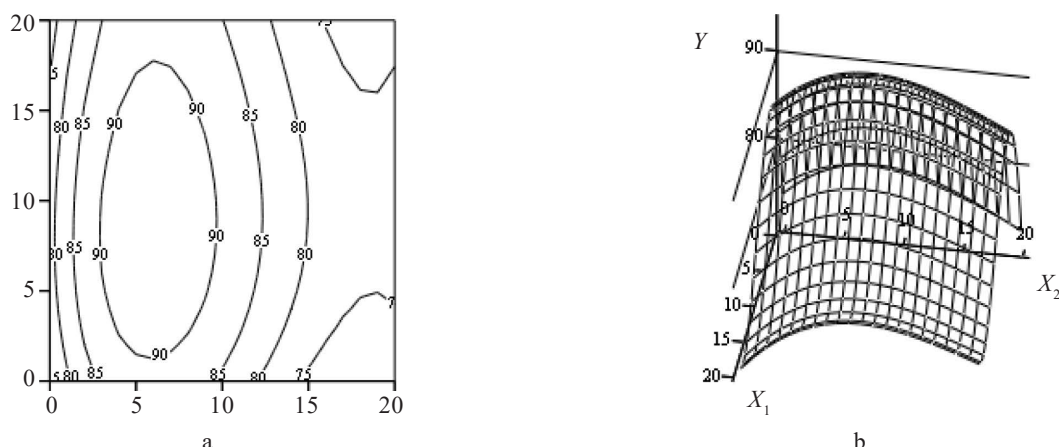


Рисунок 5. Графическое представление эффективности отделения муки в спиральном классификаторе, %: а) как карты линий равного уровня; б) как графика поверхности

Figure 5. Efficiency of flour separation in the spiral classifier, %: a) mapped same-level lines; b) surface graph

Выводы

Теоретические параметры, полученные математическим моделированием, а именно соотношение размеров внутреннего радиуса спирали к радиусу витка, легли в основу разработки конструкции лабораторного стенда. По результатам экспериментальных исследований, проведенных на спиральном классификаторе на муке и продуктах размолот с различных драных и размольных систем при изменении скорости воздушного потока, получили следующие оптимальные конструктивные и технологические параметры: в диапазоне скоростей воздуха от 6 до 8 м/с на первом витке спирального классификатора с соотношением внутреннего радиуса витка к внутреннему диаметру трубы $r_1/d_{тр} = 7,9$ отделяется фракция частиц с эквивалентным диаметром 450–630 мкм (крупная крупка). На втором витке при $r_1/d_{тр} = 7$ отделяется фракция с размерами 315–450 мкм (средняя и мелкая крупка). На третьем витке при $r_1/d_{тр} = 6,25$ отделяется фракция с размерами 160–315 мкм (дунсты и частично мука). На последующих витках при $r_1/d_{тр} < 5$ отделяется фракция с размерами до 160 мкм, в том числе тонкие высокобелковые фракции муки с размерами частиц 17–20 мкм.

По данным экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы: на первом витке оседает около 80 % продукта, на втором около 12 % продукта, а на третьем около 8 % продукта. Максимальная эффективность отделения продукта с третьей размольной системы достигает 98 % при скорости на входе в спиральный пылеотделитель 6 м/с. Максимальная эффективность отделения муки высшего сорта достигает 99,2 % при скорости на входе в спиральный классификатор-пылеотделитель 4,2 м/с. Относительная концентрация μ изменялась в пределах от 0,87 до 1,27 кг/кг.

Качественное разделение муки высшего сорта на белковые и крахмальные фракции соответствует следующим оптимальным параметрам работы установки:

пофракционная эффективность разделения варьировалась в пределах от 98 до 99 %, общая эффективность отделения дисперсной фазы от воздуха составила 99,2 %. Это соответствует входной скорости 4,2 м/с и концентрации 9 г/м³.

В рамках дальнейших экспериментальных исследований представляет интерес изучение влияния на процесс классификации импульсного воздействия воздушного потока на дисперсный материал в пределах каждого отдельно взятого витка благодаря созданию регулируемого подсоса через осадочные бункера.

Полученные результаты подтверждают возможность использования классификатора для разделения продуктов измельчения на фракции по комплексу свойств с выделением высокобелковой фракции муки и отделением дисперсного продукта от воздушного потока как в качестве самостоятельного устройства, так и при работе в технологической схеме сортового помола зерна в муку на этапе работы сепараторов и разгрузчиков пневмотранспортных систем пищевых производств и предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции.

Критерии авторства

О. Н. Терехова руководила проектом по теме исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

O.N. Terekhova supervised the project.

Conflict of interest

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

References

1. Renzyaeva TV, Tuboltseva AS, Renzyaev AO. Various flours in pastry production technology. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(2):407–416. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2373>
2. Gumerov TYu, Gafarova IA, Mingaleeva ZSh, Reshetnik OA. The food safety and quality of food products. Bezopasnost' Zhiznedeatel'nosti. 2022;257(5):3–9. (In Russ.). [Безопасность и качество пищевых продуктов / Т. Ю. Гумеров [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 257. № 5. С. 3–9.]. <https://www.elibrary.ru/SCYBVR>
3. Gumerov TYu, Mingaleeva ZSh, Reshetnik OA. Recipes development and evaluation of quality and safety indicators for cereal. Food Industry. 2022;7(1):70–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2022-7-1-9>
4. Marjanović-Balaban Ž, Gojković Cvjetković V, Grujić R. Gliadin proteins from wheat flour: the optimal determination conditions by ELISA. Foods and Raw Materials. 2021;9(2):364–370. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-364-370>
5. Faheid SMM, Rizk IRS, Kishk YFM, Ragab GH, Mostafa S. Carboxymethyl cellulose and psyllium husk in gluten-free pasta. Foods and Raw Materials. 2022;10(2):329–339. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2022-2-540>
6. Prikhodko DV, Krasnoshtanova AA. Using casein and gluten protein fractions to obtain functional ingredients. Foods and Raw Materials. 2023;11(2):223–231. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-2-569>
7. Terekhova ON, Glebov AA, Duyunova YaS. Fine air separation of dispersed particles in grain processing. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2019;175(5):140–147. (In Russ.). [Терехова О. Н., Глебов А. А., Дуюнова Я. С. Тонкая воздушная сепарация дисперсных частиц в процессах переработки зерна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. Т. 175. № 5. С. 140–147.]. <https://elibrary.ru/KNRGUK>
8. Terekhova ON. Pneumatic classification of grain grinding products. In: Anatskaya AS, Arganchieva DB, Akhmedov AT, Bardin VS, Belousov ON, Valiullina DM, *et al.*, editors. Innovative science: fundamental and applied issues. Petrozavodsk: New Science; 2021. pp. 330–352. (In Russ.). <https://doi.org/10.46916/03122021-1-978-5-00174-392-7>
9. Hosien M, Selim S. Effect of solid loading on the performance of gas-solids cyclone separators. Mansoura Engineering Journal. 2020;34(2):16–25. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2020.126001>
10. Artikov A, Karabaev D, Abdujabborov SA. On the question of calculation of the number of particle turns in the field of centrifugal forces in the cycloning apparatus. AIP Conference Proceedings. 2022;2432(1). <https://doi.org/10.1063/5.0090003>
11. Dubov GA, Muratova KM, Makhnin AA, Chistyakov YaV, Ivanova VV, Chistyakov VA. Classifying dust collector. Russia patent RU 195513U1. 2020. [Пылеуловитель-классификатор: пат. 195513U1 Рос. Федерация. № 2019118139 / Дубов Г. А. [и др.]; заявл. 11.06.2019; опубл. 30.01.2020. Бюл. № 15. 1 с.].
12. Butenko AG, Smyk SYu. Technology combined cleaning polydisperse airflow. Industrial Ecology. 2014;88(4):37–41. (In Russ.). [Бутенко А. Г., Смык С. Ю. Технология комбинированной очистки полидисперсного воздушного потока // Экология промышленного производства. 2014. Т. 88. № 4. С. 37–41.]. <https://elibrary.ru/TGTJBP>
13. Pavlenko IV, Yukhymenko MP, Lytvynenko AV, Bocko J. Solving the nonstationary problem of the disperse phase concentration during the pneumoclassification process of mechanical mixtures. Journal of Engineering Sciences. 2019;6(1):F1–F5.
14. Slavyanskiy AA, Mitroshina DP, Gribkova VA, Karamzin AV. Fractionation of bulk food products. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(1):89–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-89-97>
15. Semenov EV, Slavyanskii AA, Karamzin VA, Karamzin AV. Centrifugal fractionation of fine particles. Chemical and Petroleum Engineering. 2019;55(1–2):122–128. <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00591-z>
16. Semenov EV, Slavyanskiy AA, Mitroshina DP. Quantitative analysis of suspension clarification process in inter-tray space of separator drum. Chemical and Petroleum Engineering. 2021;57(5–6):361–369. <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00944-7>
17. Kim VA, Kashin YaM, Kopelevich LE. Characteristics of combined motor of separator drive. Journal of Physics: Conference Series. 2021;2096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012094>
18. Morozov YuP, Penkov PM. Studying the possibilities of improving centrifugal separation efficiency. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal. 2020;(3):80–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-3-80-86>
19. Zlochevskij VL, Terekhova ON. Method of separating fine particles from gas. Russia patent RU 2461410C1. 2012. [Способ отделения мелкодисперсных частиц от газовой среды: пат. 2461410C1 Рос. Федерация. № 2011122175/05 / Злочевский В. Л., Терехова О. Н.; заявл. 31.05.2011; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26. 8 с.].
20. Zhang L, Apea-Bah FB, Chen X, Hornung PS, Malunga LN, Beta T. The physicochemical and structural properties and in vitro digestibility of pea starch isolated from flour ground by milling and air classification. Food Chemistry. 2023;419. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136086>
21. Andreev NR, Goldstein VG, Kovalenok VA, Nosovskaya LP, Adikaeva LV, Miroshnikov AA. Investigation of the process of extraction of a highly starchy fraction of rye flour by air classification. Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(6):896–906. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.896-906>
22. Lobanov VG, Roslyakov YuF, Ermakov AI, Zabolotets AA, Litvyak VV. Dry method of obtaining of native starch fractionated by size. Russia patent RU 2710788C1. 2020. [Способ получения сухим методом нативного фракционированного по размеру гранул крахмала: пат. 2710788C1 Рос. Федерация. № 2019122198 / Лобанов В. Г. [и др.]; заявл. 11.07.2019; опубл. 13.01.2020. Бюл. № 2. 8 с.].

23. Kandrov RK, Tsybina GM, Budova AV. Pneumatic screen fractionation of barley and wheat flour for extraction of protein and carbohydrate fractions. *Bread Products*. 2022;(6):52–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2022-31-6-52-57>
24. 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>
25. Artikov AA, Karabaev DT. Computer simulation of particle velocity in a cyclone. *Universum: Technical Sciences*. 2023;110(5–1):34–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.110.5.15434>
26. Maslov AV, Biktagirova AI, Agzamova LI, Mingaleeva ZSh. Method application of generalized reduced gradient and fractional factor experiment in the composition optimization of the complex food additive for bread of increased nutritional value. *Food Industry*. 2021;6(3):5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-3-1>
27. Maslov AV, Mingaleeva ZSh, Yamashev TA, Shibaeva NF. Effect of a complex plant additive on flour mixes and wheat dough. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(3):511–525. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2385>
28. Martsulevich NA, Flisyuk OM, Meshalkin VP, Garabadzhiu AV. Dispersed material classification in multi-section air classifier. *ChemChemTech*. 2021;64(10):84–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216410.6455>
29. Martsulevich NA, Flisyuk OM, Chirkunova UG. Fractionation of dispersed material in a two-part air classifier. *Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2020;79(53):61–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-53-79-61-64>
30. Flisyuk OM, Toptalov VS, Martsulevich NA. Theoretical and experimental analysis of dependence of efficiency of direct-flow cyclone on geometry of separating chamber. *ChemChemTech*. 2021;64(8):99–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216408.6419>
31. Bogdanov LN, Biryukov AY, Afanas'eva SA-R, Belov NN, Ob'edkov AY, Polyushko VA. Parameters of the air-centrifugal classification zone in a pneumatic circulation device and their effect on the process of separation of finely-dispersed material. *Russian Physics Journal*. 2013;56(9–3):21–23. (In Russ.). [Исследование параметров зоны воздушно-центробежной классификации в пневмоциркуляционном аппарате, существенно влияющих на процесс разделения тонкодисперсного материала / Л. Н. Богданов [и др.] // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 9–3. С. 21–23.]. <https://elibrary.ru/SNVEJJ>
32. Zlochevskiy VL, Mukhopad KA. Ecology and innovative development of gas cleaning. *Industrial Ecology*. 2019;105(1):28–34. (In Russ.). [Злочевский В. Л., Мухопад К. А. Экология и инновационное развитие газоочистки // Экология промышленного производства. 2019. Т. 105. № 1. С. 28–34.]. <https://elibrary.ru/YZZWMP>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2495>
<https://elibrary.ru/RFEYTQ>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Параметры модульных микроволновых вакуум выпарных установок



А. В. Гаврилов*, Ю. Б. Гербер

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Россия

Поступила в редакцию: 14.03.2023

Принята после рецензирования: 06.06.2023

Принята к публикации: 04.07.2023

*А. В. Гаврилов: tehfac@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>

Ю. Б. Гербер: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>

© А. В. Гаврилов, Ю. Б. Гербер, 2024



Аннотация.

Применение микроволнового подвода энергии в процессе выпаривания позволяет получить продукты с более высокими концентрациями сухих веществ и более высокого качества по сравнению с другими методами концентрирования и традиционными выпарными аппаратами. Несмотря на эффективность процесса микроволнового выпаривания, отсутствуют методы проектирования промышленных установок для его реализации. Цель исследования заключалась в определении конструктивных и режимных параметров рабочего модуля микроволновой вакуум-выпарной установки.

Для концентрирования соков предложили использовать микроволновую вакуум-выпарную установку (МВВУ) модульного типа с модулями цилиндрической формы. В основе расчета высоты жидкой фазы МВВУ лежит учет динамики образования и роста паровых пузырьков во всем объеме жидкой фазы. Высота паровой зоны модуля определяется из учета обеспечения минимального объема парового сепаратора.

При рабочем давлении в модуле 7,4 кПа минимальный радиус парового пузырька составил $5,6 \times 10^{-5}$ м. На высоте 42 мм над уровнем зарождения паровых пузырьков наблюдалось 100 % паросодержание. Усредненная суммарная высота уровня жидкой фазы над излучателем составила 26 мм, что превышает глубину проникновения излучения в жидкость. Выполненные исследования легли в основу алгоритма расчета конструктивных и режимных параметров рабочего модуля МВВУ и разработанного типоразмерного ряда модулей с мощностями излучателей от 600 до 3000 Вт. Для модулей диаметром 150 мм высота паровой зоны составила 43–80 мм, высота переходной парожидкостной зоны – 9–16 мм. Высота зоны кипения лежит в пределах 45–60 мм.

Предложенные методики позволяют проектировать модульные МВВУ заданной производительности с использованием всего диапазона мощностей промышленно выпускаемых излучателей с воздушным охлаждением. Однако целесообразно использовать модули мощностью до 1100 Вт на финальной стадии процесса концентрирования продуктов до концентраций 60–80 % и более.

Ключевые слова. СВЧ-поле, паросодержание, кипение, сок, концентрат, металлоемкость, перегрев, парообразование, сепарация

Финансирование. Работа выполнена на базе Института «Агротехнологическая академия» Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (КФУ им. В. И. Вернадского) в рамках госбюджетной темы.

Для цитирования: Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Параметры модульных микроволновых вакуум выпарных установок // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 135–145. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2495>

Parameters of Modular Microwave Vacuum Evaporators

**Alexander V. Gavrilov***^{ID}, **Yuriy B. Gerber**^{ID}V.I. Vernadsky Crimean Federal University^{ROR}, Simferopol, Russia

Received: 14.03.2023

Revised: 06.06.2023

Accepted: 04.07.2023

*Alexander V. Gavrilov: tehfac@mail.ru,<https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>Yuriy B. Gerber: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>

© A.V. Gavrilov, Yu.B. Gerber, 2024



Abstract.

Microwave energy facilitates evaporation, thus producing more solids of higher quality than other concentration methods and traditional evaporators. Despite its effectiveness, the food industry has no methods for industrial microwave evaporation. This article introduces design and operating parameters for the working module of a novel microwave vacuum evaporation.

The new microwave vacuum evaporator with cylindrical modules was used for juice concentration. The fluid phase level was calculated based on the development and growth of vapor bubbles across the fluid phase volume. The steam phase level depended on the minimal volume of the steam separator.

When the operating pressure in the module was 7.4 kPa, the minimal radius of a vapor bubble was 5.6×10^{-5} m; 100% vapor content was observed 42 mm above the nucleation level of vapor bubbles. The average total height of the fluid phase level above the emitter was 26 mm, which exceeded the level of radiation penetration. The data obtained were used to develop an algorithm that made it possible to calculate the design and operating parameters of the microwave vacuum evaporator, as well as standard size modules with emitter powers of 600–3000 W. The modules with a diameter of 150 mm had the vapor zone at 43–80 mm and the transitional vapor-fluid zone at 9–16 mm. The boiling zone was at 45–60 mm.

The new microwave vacuum evaporator covered the entire power range of industrial air-cooled magnetrons. However, the final stage required modules of ≤ 1100 W for high concentrations of ≥ 60 –80%.

Keywords. UHF field, steam content, boiling, juice, concentrate, metal consumption, overheating, vaporization, separation

Funding. The research was conducted on the premises of the Agrotechnological Academy Institute, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Vernadsky CFU)^{ROR} as part of a state assignment.

For citation: Gavrilov AV, Gerber YuB. Parameters of Modular Microwave Vacuum Evaporators. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):135–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2495>

Введение

Фруктовые соки и сиропы обладают антиоксидантными свойствами, а также могут быть использованы для обогащения продуктов витаминами и минеральными веществами [1–3]. Для снижения стоимости хранения и транспортировки соков используется концентрирование путем удаления из них влаги. Несмотря на наличие перспективных технологий обезвоживания продуктов, выпаривание остается одной из распространенных и эффективных технологий концентрирования [4].

Анализ современных технологий выпаривания показал, что в традиционных технологиях (выпаривание с повышением концентрации продукта) снижается интенсивность перемешивания и растет толщина пограничного слоя и его термическое сопротивление. Качество продукта снижается. На практике ограничиваются конечной концентрацией продукта 26–60 % [5]. Эффективность выпаривания можно повысить, используя инновационные технологии адресной доставки энер-

гии. Поэтому целесообразно применять в технологиях выпаривания электромагнитные генераторы энергии микроволнового диапазона.

Сегодня перспективным является использование электромагнитной энергии СВЧ-диапазона для концентрирования растворов с полярным растворителем. Особенностью нагрева продукта в СВЧ-поле является его объемное действие и отсутствие теплопередающей поверхности. При микроволновом воздействии энергия подводится к молекулам воды в продукте, т. к. сухие вещества радиопрозрачны [6]. Очаги парообразования возникают во всем объеме и выполняют функцию греющей поверхности. Таким образом, эквивалентная площадь поверхности теплообмена должна возрастать. Отсутствие требования теплопроводности к стенкам аппарата, в котором концентрируется продукт, стимулирует его применение для концентрирования агрессивных сред. В работах [7, 8] предложено использовать аппараты с микроволновым подводом энергии для концентрирования кислот. Использование микроволнового

нагрева сказывается на интенсификации процессов выпаривания через мембраны [3, 10]. Однако большинство технологий находится на стадии лабораторных исследований, а их крупномасштабное промышленное применение задерживается из-за присущих им проблем. В работе Х. Ге предлагается использовать СВЧ-аппарат для непрерывного концентрирования яблочного сока [11]. Микроволновое концентрирование позволило увеличить производительность, коэффициент концентрирования и эффективность, но наблюдалось снижение качества соков из-за резкого возрастания температуры и возникновения локальных зон перегрева [11]. В работах [12, 13] было проведено сравнение концентрирования гранатового сока в условиях вакуума при использовании микроволнового подвода энергии с традиционной технологией концентрирования. Показано, что микроволновой нагрев позволяет получить продукцию более высокого качества за счет сокращения времени проведения процесса. Аналогичные сравнения были проведены при концентрировании яблочного сока [14–16]. Также было отмечено увеличение степени концентрирования и качества полученного концентрата. Улучшение качества продукта при использовании микроволнового выпаривания, по сравнению с традиционными способами, отмечено для сока барбариса, ананаса, черной моркови, вишневого нектара, апельсинового и виноградного соков [13, 16–20]. Для концентрирования поликомпонентных овощных смесей предложена технология двухстадийного вакуум-выпаривания с целью сохранения в них термолабильных веществ [21]. Показанные преимущества позволяют сделать вывод о перспективности использования вакуум-выпарных установок с микроволновым подводом энергии для производства высококачественных концентратов фруктовых и овощных соков, а также концентрирования сахарных и глюкозных сиропов [22–26]. Предложенный способ выпаривания показал свою эффективность для финальной стадии концентрирования растворов и достижения высоких концентраций сухих веществ в конечном продукте [24, 27].

Хотя многие исследователи доказали эффективность использования микроволновых установок для концентрирования, это относится к лабораторным установкам, а полученные зависимости не позволяют использовать их в проектировании промышленных образцов оборудования для концентрирования фруктовых и овощных соков [25]. Практическая реализация результатов экспериментальных исследований требует решения вопросов, связанных с поиском рациональных научно-технических предложений по конструкции инновационной микроволновой вакуум-выпарной установки.

Объекты и методы исследования

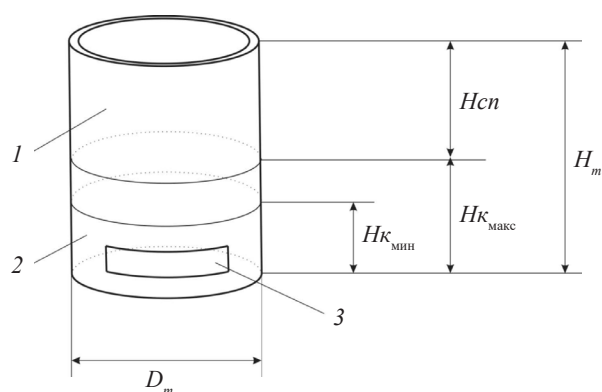
Современные тенденции совершенствования тепло-массообменного оборудования свидетельствуют о преимуществах многофункциональных установок модульного типа. В пищевых технологиях данное оборудо-

дование позволит загружать производство во время отсутствия сезонного сырья и легко перестраиваться к переработке разной растительной продукции. Главным требованием к модулю является простота управления при переходе на новый технологический регламент. При выборе геометрии рабочего объема модуля следует руководствоваться показателями его металлоемкости, технологичности изготовления и удобства эксплуатации. С точки зрения металлоемкости наиболее выгодной формой модуля является сфера. Однако аппараты цилиндрической формы более технологичны в изготовлении и удобны для использования в модульных аппаратах.

Основой конструкции модуля является цилиндрический корпус, изготовленный из радионепроницаемого металла. В корпусе имеется специальное окно для магнетрона, а с торцевых частей корпуса присоединены верхний и нижний фланцы. Верхний фланец оборудован патрубком для откачки воздуха перед началом процесса выпаривания и выхода вторичного пара. В нижнем фланце имеются патрубки для непрерывной подачи сырья и непрерывной выгрузки готового продукта [28].

Для модуля цилиндрической формы основными размерами являются диаметр (D_m) и высота (H_m) (рис. 1). Модуль условно делится на две зоны: зона кипения жидкого продукта и зона сепарации вторичного пара. Диаметр зоны кипения продукта должен быть не менее половины глубины проникновения СВЧ-поля в продукт. Диаметр зоны сепарации пара регламентируется влагонепрозрачностью парового пространства и скоростью движения пара в нем. Учитывая размеры модуля, целесообразно, чтобы обе зоны модуля имели одинаковый диаметр, т. е. были размещены в одной цилиндрической ёмкости. Это положительно скажется на надежности модуля, технологичности и стоимости его изготовления.

Таким образом, высота модуля складывается из высоты зоны кипения жидкости ($H_{к\max}$) и высоты зоны



1 – зона сепарации пара, 2 – зона кипения продукта,
3 – окно присоединения волновода

Рисунок 1. Схема МВ-модуля

Figure 1. Microwave module diagram

сепарации пара (H_{cn}). Минимальная высота зоны кипения ($H_{k_{\min}}$) определяется высотой окна волновода для подвода микроволновой энергии плюс две глубины проникновения микроволнового поля в продукт. Высота зоны сепарации зависит от необходимого объема парового пространства и диаметра сепаратора.

Глубина проникновения поля зависит от длины волны и диэлектрических свойств материала и определяется по зависимости из работы [29]. Однако наличие паровых пузырьков в жидкости, с одной стороны, увеличивает рассеивание микроволнового излучения за счет многократных частичных отражений в местах перехода из жидкой фазы в паровую и из паровой в жидкую, а с другой – в паровой фазе затухание электромагнитной волны происходит слабее. Это ведет к увеличению глубины проникновения микроволнового излучения. Для того чтобы обеспечить эффективное поглощение микроволновой энергии жидкой фазой и минимизировать перегрев паровой фазы и отражение энергии обратно в излучатель, необходимо поддерживать уровень продукта над точкой ввода микроволнового излучения, превышающий минимально допустимый. Для определения такого уровня рассмотрели процесс образования и роста паровых пузырьков в жидкости.

В отличие от традиционных технологий выпаривания с кондуктивным энергоподводом, при котором пузырьки пара образуются на перегретых поверхностях, при микроволновом подводе энергии зародышами парообразования являются пузырьки газов, которые имеются в жидкости. Начальный диаметр паровых

пузырьков может быть определен по значению минимальной температуры перегрева, при которой не происходит схлопывания паровых пузырьков:

$$\Delta T_{\min} > \frac{4T'' \times \sigma}{r \times \rho_{\text{vap}} \times Rp} \quad (1)$$

где T'' – температура насыщенного пара; r – удельная теплота парообразования; Rp – радиус газового пузырька.

Скорость роста парового пузырька можно определить с использованием числа Якоба [27]:

$$\frac{dRp}{d\tau} = \beta_1 \frac{a}{Rp} Ja^2 \quad (2)$$

где Ja – число Якоба; c_p – изобарная теплоемкость жидкости; a – коэффициент температуропроводности; τ – время; β_1 – коэффициент учета дополнительных факторов (форма пузыря, динамические эффекты).

После интегрирования формула (2) имеет вид

$$Rp(\tau) = \sqrt{Rp_0^2 + \beta_1 \times a \times Ja^2 \times \tau} \quad (3)$$

где Rp_0 – начальный радиус парового пузырька.

Скорость всплытия парового пузыря зависит от его размеров и режима всплытия. Для ламинарного режима скорость определяется по формуле Стокса, а для турбулентного используется зависимость Лященко между числами Архимеда и Рейнольдса.

Использование зависимости Тодеса позволяет описать скорость всплытия пузырьков единой формулой

$$wp(\tau) = \frac{4 \left[\sqrt{Rp_0^2 + \beta_1 \times a \times Ja^2 \times \tau} \right] g (\rho_{\text{lic}} - \rho_{\text{vap}})}{18\mu_{\text{lic}} + 0,575 \sqrt{\left[8(Rp_0^2 + \beta_1 \times a \times Ja^2 \times \tau)^{3/2} g \times \rho_{\text{lic}} \right] (\rho_{\text{lic}} - \rho_{\text{vap}})}} \quad (4)$$

где μ_{lic} – вязкость жидкости; $\rho_{\text{lic}}, \rho_{\text{vap}}$ – плотности жидкой и газовой фаз.

Так как основное количество паровых пузырей образуется на уровне расположения ввода СВЧ-излучения, то количество пузырей, которые образуются за необходимое для достижения паровым пузырем границы раздела фаз время, определено как отношение паропроизводительности модуля к паропроизводительности одного пузыря.

Паропроизводительность одного пузыря определяется как

$$Glp = \frac{4 \times \pi \times Rp^3 \times \rho_{\text{vap}}}{3 \times \tau} \quad (5)$$

где τ – время всплытия.

Предположили, что зарождение паровых пузырей происходит через равные промежутки времени. Поэтому объемное паросодержание определили как отношение объема паровых пузырьков к объему парожидкостной смеси. Усредненная высота слоя жидкости на каждом уровне получается как отношение объема

жидкой фазы, который определяется как разность объема парожидкостной смеси и объема пара, к площади поперечного сечения модуля.

При расчете общей высоты модуля необходимо принять во внимание возникновение в процессе кипения переходного парожидкостного слоя на границе жидкой и паровой фаз. Высота этой переходной зоны зависит от скорости образования и разрушения паровых пузырьков; может быть определена как

$$H_{pz} = 1,4 \times 10^3 \times \frac{v_p \times \sqrt{\sigma \times \rho_{\text{vap}}}}{g \times (\rho_{\text{lic}} - \rho_{\text{vap}})} \times \left(D_m \times \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{lic}} - \rho_{\text{vap}})}} \right)^{-1/4} \quad (6)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; v_p – скорость пара в модуле.

Высота паровой зоны модуля и диаметр парового сепаратора определяется из учета обеспечения его

минимального объема для заданной паропроизводительности, при котором максимальная скорость пара выбирается в зависимости от давления в модуле. Высота паровой зоны не должна превышать скорость витания капли [30].

Общая высота модуля H_m равна сумме высот жидкостной и паровой зон.

Результаты и их обсуждение

Выполненные теоретические исследования позволили разработать алгоритм расчета конструктивных параметров МВ-модуля (рис. 2). Исходными данными для расчета являются мощность магнетрона, частота

излучения, вид продукта и давление в модуле. На втором этапе определяются температура кипения продукта в модуле, теплота парообразования, плотность жидкой и газовой фаз, а также действительная и мнимая диэлектрические проницаемости среды. На третьем этапе по формуле (12) из работы О. Г. Burdo и др. рассчитывается параметрический комплекс безразмерного давления и симплекс удельной теплоты фазового перехода [31]. Это дает возможность по формуле (17) из работы О. Г. Burdo и др. определить число энергетического действия [32]. На четвертом этапе из формулы (3) из работы А. В. Гаврилова можно установить паропроизводительность модуля (скорость влагоизвлечения) [33].

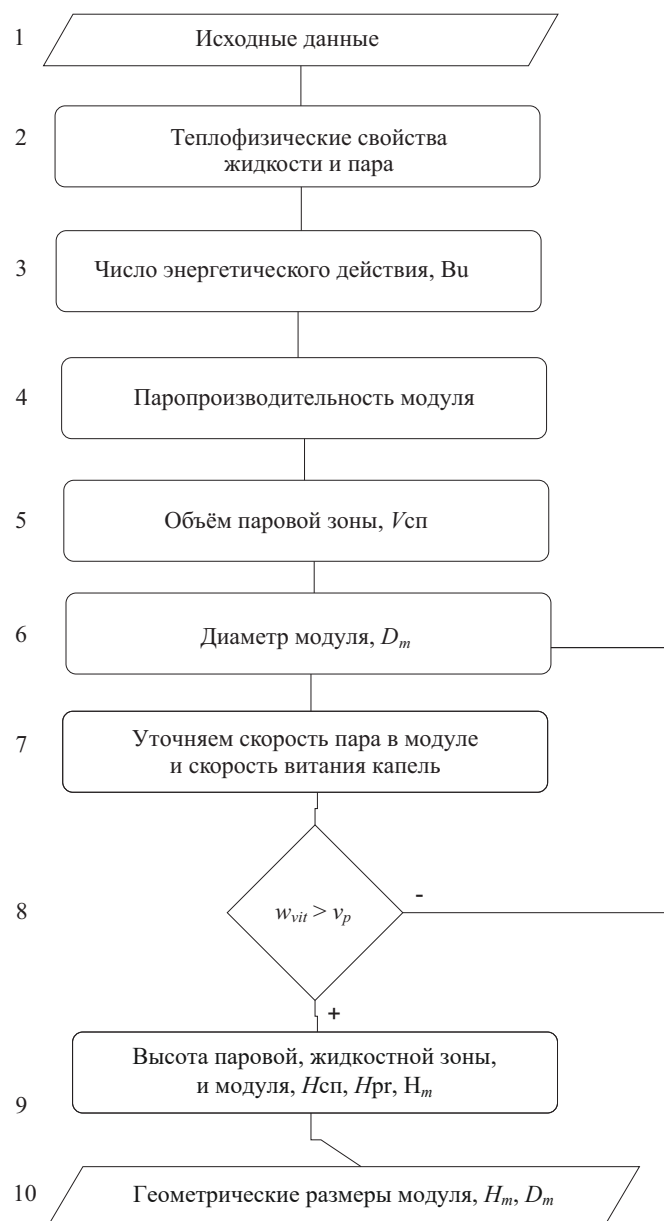


Рисунок 2. Алгоритм определения геометрических размеров модуля

Figure 2. Algorithm for determining the geometric dimensions of the module

На пятом этапе, в зависимости от вида сырья и давления в модуле, определяется допустимая паронапряженность паровой зоны, используя значение паронапряженности при атмосферном давлении и поправочный коэффициент, который учитывает давление в модуле и объем паровой зоны модуля как отношение паропроизводительности к допустимой паронапряженности. На следующем этапе устанавливается допустимая скорость пара в паровом пространстве модуля, а затем диаметр модуля. Получившееся значение Dm округляется до ближайшего типоразмера выпускаемых промышленностью труб. На седьмом этапе уточняется скорость пара в модуле, которая сравнивается на восьмом этапе со скоростью витания капли. Если скорость пара в модуле превышает скорость витания капли, то увеличивается диаметр модуля в соответствии с уточненным значением предельно допустимой скорости пара, которое равно скорости витания капли. Если скорость пара меньше скорости витания капли, то переходим к девятому этапу, на котором определяется высота паровой части модуля, используя зависимость, минимальный уровень жидкой фазы в модуле и общую высоту модуля. Алгоритм может быть дополнен блоком оптимизации массогабаритных показателей. В таком случае полученное отношение H_m/D_m сравнивается с заданным и в случае несоответствия корректируется значение диаметра модуля.

В соответствии с алгоритмом (рис. 2) для определения типовых размеров модуля приняли следующие начальные условия: рабочее давление в камере на уровне 7,4 кПа. Это соответствует температурам кипения водных растворов (около 40 °C). Такое условие принято исходя из условий эффективной работы данного модуля для использования в установках концентрирования термолабильных продуктов [33]. Для данного модуля предполагается использование излучателя электромагнитной энергии микроволнового диапазона с воздушным охлаждением. Диапазон мощностей промышленно выпускаемых излучателей находится в пределах 600–3000 Вт. Для данных условий комплекс безразмерного давления составил 1,48, симплекс удельной теплоты фазового перехода равен 4,57, а число энергетического действия $Bu = 1,46$.

Для магнетрона мощностью 600 Вт величина паропроизводительности составила 0,615 кг/ч. Напряженность парового пространства для водных растворов при атмосферном давлении находится в диапазоне 500–1000 кг/(м³·с), а коэффициент, учитывающий давление в модуле, равен 0,8 [34]. Для заданных условий напряженность парового пространства составила 800 кг/(м³·ч). Минимальный объем парового пространства для разделения парожидкостной смеси при таком значении напряженности составил 0,77 л. Максимальная скорость пара в паровом пространстве составила 6 м/с, а минимальный диаметр парового пространства 24 мм. Исходя из конструктивных соображений, а именно размеров сечения волновода, который

передает энергию от магнетрона к модулю, минимальный диаметр модуля ограничен 100 мм. Значение действительной скорости пара в паровом пространстве для диаметра модуля 100 мм составляет 0,33 м/с. Это меньше скорости витания капель жидкости, равной 1,6 м/с. Минимальная высота паровой части модуля определяется как высота цилиндра объемом 0,77 л, диаметром 100 и составляет 98 мм. Высота переходного парожидкостного слоя, определенная по формуле (6), равна 21 мм. При установленной мощности магнетрона 1100 Вт минимальный объем парового пространства составил 1,4 л при минимальном диаметре 32 мм. Скорость движения пара в модуле диаметром 100 мм равна 0,61 м/с. Тогда высота парового пространства равна 179 мм, а высота переходного слоя 39 мм. Для снижения металлоемкости модуля возможно увеличение его диаметра до 150 мм. В таком модуле скорость пара равна 0,15 и 0,27 м/с для 600 и 1100 Вт мощности излучателя соответственно. Минимальная высота парового пространства равна 43 и 79 мм, а высота переходной зоны 9 и 16 мм для 600 и 1100 Вт мощности излучателя соответственно.

Для обеспечения эффективного поглощения высота слоя жидкости над магнетроном должна быть больше глубины проникновения СВЧ-излучения в продукт. При частоте излучения 2,45 ГГц длина волны составляет 12,24 см. Глубина проникновения излучения в воду при значении действительной диэлектрической постоянной $\epsilon' = 76$ и мнимой диэлектрической постоянной $\epsilon'' = 10,9$ равна 15,6 мм. Параметры кипящего раствора зависят от начального радиуса парового пузырька. Радиус газовых пузырьков в воде находится в пределах от 6×10^{-10} до 3×10^{-5} м [35]. Согласно исследованию Б. Г. Емца усредненный радиус газового пузырька в воде приблизительно равен 2×10^{-7} м [36]. Для таких значений размеров газовых пузырьков минимальная температура перегрева составляет 9,3 К. Однако при снижении давления происходит рост диаметров газовых пузырьков, из-за чего температуры перегрева при экспериментальных исследованиях находились в пределах 5 К, что соответствует радиусу пузырька $5,6 \times 10^{-5}$ м [33]. В таких условиях для модуля диаметром 150 мм с излучателем мощностью 600 Вт определено распределение объемного паросодержания по высоте модуля (рис. 3). Усредненная высота слоя жидкости приведена на рисунке 4.

Как видно из зависимостей, на высоте слоя 42 мм над уровнем зарождения паровых пузырьков наблюдается 100 % паросодержание и практическое отсутствие жидкой фазы. Однако усредненная суммарная высота уровня жидкой фазы над излучателем составила 26 мм. Это превышает глубину проникновения излучения в жидкость и с учетом многократных частичных отражений от поверхностей раздела фаз обеспечивает эффективное поглощение СВЧ-энергии.

Для водных растворов при давлении 7,4 кПа по алгоритму из рисунка 2 рассчитали типоразмерный ряд

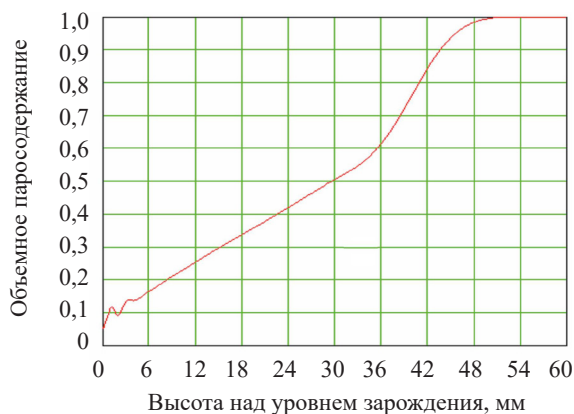


Рисунок 3. Зависимость объемного паросодержания от высоты над уровнем зарождения паровых пузырьков

Figure 3. Effect of nucleation level on the volumetric vapor content

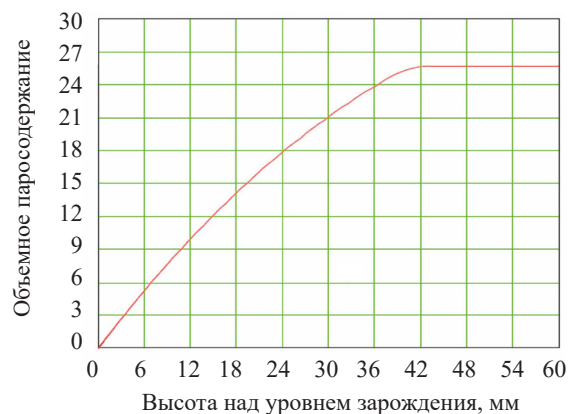


Рисунок 4. Зависимость суммарной высоты слоя жидкости от высоты над уровнем зарождения паровых пузырьков

Figure 4. Effect of nucleation level on total fluid level

Таблица 1. Типоразмерный ряд микроволновых выпарных модулей

Table 1. Size range of microwave evaporation modules

Наименование	Диаметр, мм	Высота, мм	Мощность, Вт	Производительность по выпаренной влаге, кг/ч
M1-06	100	250	600	0,615
M1-07			700	0,717
M1-09			900	0,922
M1-10			1000	1,024
M1-11			1100	1,127
M1Y-06		450	600	0,615
M1Y-07			700	0,717
M1Y-09			900	0,922
M1Y-10			1000	1,024
M1Y-11			1100	1,127
M2-06	150	150	600	0,615
M2-07			700	0,717
M2-09			900	0,922
M2-10			1000	1,024
M2-11			1100	1,127
M2Y-06		300	600	0,615
M2Y-07			700	0,717
M2Y-09			900	0,922
M2Y-10			1000	1,024
M2Y-11			1100	1,127
M2Y-20			2000	2,049
M2Y-30			3000	3,073

модулей с возможностью установки типовых выпускаемых промышленностью магнетронов с воздушным охлаждением мощностью от 600 до 3000 Вт. Для модулей диаметром 100 мм в целях унификации предусмотрена возможность установки излучателей электромагнитной энергии мощностью от 600 до 1100 Вт и принята высота модуля 250 мм, которая обеспечивает возможность концентрирования водных растворов при максимальной мощности излучателя. В случае концентрирования сильнопенящихся растворов мощность излучателя может быть снижена, например, для гранатового сока,

или можно использовать удлиненные модули длиной 450 мм, что обеспечивает удвоенную высоту парового пространства [12, 34]. Модуль диаметром 150 мм имеет две модификации: первая (высота 150 мм) обеспечивает наименьшую металлоемкость модуля, вторая (высота 300 мм) применяется для пенящихся растворов. Обе модификации позволяют устанавливать излучатели электромагнитной энергии микроволнового диапазона мощностью от 600 до 3000 Вт.

Представленные в таблице 1 модули могут использоваться как в установках, реализующих непрерывный

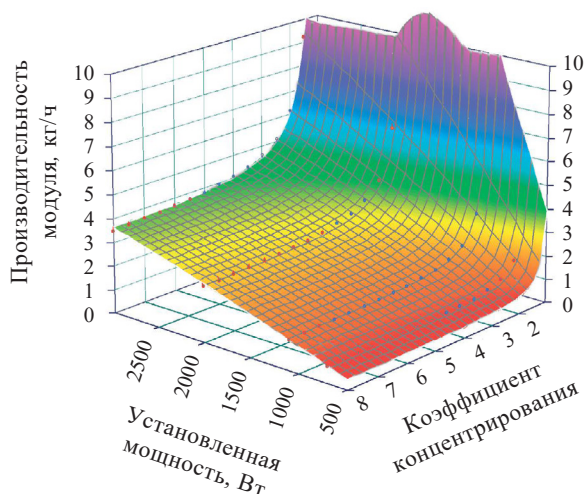


Рисунок 5. Зависимость производительности модуля по сырью от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона

Figure 5. Effect of Kk and magnetron power on raw material production

процесс выпаривания, так и в установках периодического действия. При реализации непрерывного режима основными параметрами являются производительность модуля по сырью и готовому продукту. Учитывая, что эти параметры зависят от начальной и конечной концентрации продукта, то был принят коэффициент концентрирования как отношение концентрации сухих веществ в продукте на выходе из модуля к концентрации сухих веществ в продукте на входе в модуль. Производительность модуля по сырью и концентрированному продукту зависит от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона. Такие зависимости для разработанных модулей в диапазоне коэффициента концентрирования от 1,5 до 8, представлены на рисунках 5 и 6.

Обобщение данных в программе Table Curve 3D позволило определить общий вид уравнения для инженерного расчета производительности модуля по сырью G_n , кг/ч, (рис. 5) и конечному продукту G_k , кг/ч, (рис. 6) при заданных параметрах мощности и коэффициента концентрирования в виде экспоненциальных зависимостей:

$$G_n = e^{8,42 + \frac{-57,4}{\ln(N)} + \frac{2,18}{Kk^2}} \quad (7)$$

$$G_k = e^{4,28 + \frac{-57,4}{\ln(N)} + \frac{5,74}{\sqrt{Kk^2}}} \quad (8)$$

где N – установленная мощность магнетрона, Вт; Kk – коэффициент концентрирования.

Увеличение установочной мощности в 2 раза (с 1000 до 2000 Вт) ведет к повышению производительности в 2 раза, а стоимости в 15 раз (резко возрастает стои-

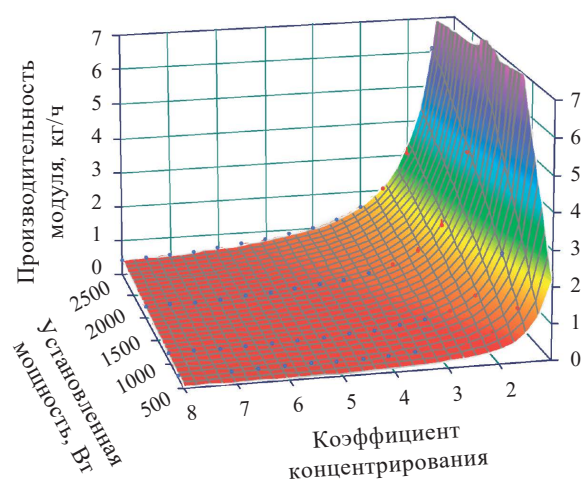


Рисунок 6. Зависимость производительности модуля по концентрированному продукту от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона

Figure 6. Effect of Kk and magnetron power on concentrate production

мость магнетрона). Это ограничивает экономическую целесообразность использования 2-ух и 3-х кВт магнетронов. Это также ограничивает максимальную производительность модуля, что увеличивает количество необходимых для достижения заданной производительности и усложняет саму установку модулей. Указанный недостаток становится менее существенным, если применение данных установок рекомендовано для финальной стадии концентрирования в том случае, если целесообразно повышение концентрации конечного продукта до значений, практически недостижимых в традиционных ВВУ, когда основная масса растворителя уже выпарена.

Выводы

С точки зрения материалоемкости, технологичности изготовления, удобства эксплуатации и монтажа наиболее удачной является цилиндрическая форма модуля с одинаковыми диаметрами жидкостной и паровой зон.

Полученный при помощи разработанных алгоритмов расчета и оптимизации геометрических параметров модулей типоразмерный ряд, который позволяет использовать весь диапазон мощностей промышленно выпускаемых излучателей электромагнитной энергии с воздушным охлаждением, позволяет проектировать микроволновые модульные вакуум выпарные установки заданной производительности, используя зависимость 7 или 8.

Применение в модулях излучателей электромагнитной энергии СВЧ-диапазона мощностью более 1,1 кВт приводит к увеличению стоимости модуля. Это позволяет рекомендовать разработанные модули

для использования в установках для финальной стадии концентрирования продуктов до концентраций 60–80 % и более.

Критерии авторства

А. В. Гаврилов – общая идея, обоснование цели и задач, проведение эксперимента. Ю. Б. Гербер – техническое обеспечение проведения экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» в предоставлении доступа к учебно-технологической лаборатории Института

«Агротехнологическая академия» для получения экспериментальных данных.

Contribution

A.V. Gavrilo developed the research concept, set up the objectives, and conducted the experiments. Yu.B. Gerber provided the technical support for the experiments.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the university management for providing access to the academic and technological laboratory of the Agrotechnological Academy Institute, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

References

1. Tabakaev AV, Tabakaeva OV, Prikhodko YuV. Functional instant beverages. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(2): 187–196. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-2-565>
2. Reznichenko IYu, Frolova NA, Kuchebo VV, Turov SV. Syrups in sugar confectionery products of high nutritional value. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(1):62–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-62-69>
3. Ojileh PC, Okechukwu QN. Value-added zobo drink with date juice. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(3):545–553. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2453>
4. Shalunov AV, Khmelev VN, Terentiev SA, Nesterov VA, Golykh RN. Ultrasonic dehydration of food products with moisture removal without phase transition. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(2):363–373. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-363-373>
5. Gavrilo AV. Researching of process energy technologies development of vegetative raw materials. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2018;179(16):82–89. (In Russ.). [Гаврилов А. В. Исследование энерготехнологий процессов обезвоживания растительного сырья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2018. Т. 179. № 16. С. 82–89.]. <https://elibrary.ru/MJXFAL>
6. Burdo OG, Ruzhitskaya NV, Makarenko TA, Malashevich SA. Concentrating stevia extracts in a microwave vacuum evaporation unit. *Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies*. 2015;47(2):67–70. (In Russ.). [Концентрирование экстрактов стевии в микроволновой вакуум-выпарной установке / О. Г. Бурдо [и др.] // Научные труды Одесской национальной академии пищевых технологий. 2015. Т. 47. № 2. С. 67–70.]. <https://elibrary.ru/YGUYAP>
7. Dzhangiryan VG, Krivenko IV, Namestnikov VV, Afanasev AG, Prokhorov EN. Method and installation for concentration of acids. Russia patent RU 2651253C1. 2018. [Способ и установка для концентрирования кислот: пат. 2651253C1 Рос. Федерация. № 2016141084 / Джангирян В. Г. [и др.]; заявл. 19.10.2016; опубл. 18.04.2018. Бюл. № 11. 25 с.].
8. Syomochkin AS, Khatsrinov AI, Khakimov MF, Namestnikov VV, Gatina RF. Microwave radiation for concentrating sulfuric acid in vacuum. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2010;(8):410–411. (In Russ.). [Применение СВЧ-излучения для концентрирования серной кислоты в вакууме / А. С. Сёмочкин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 8. С. 410–411.]. <https://elibrary.ru/MVNDYV>
9. Li H, Zhao Z, Xiouras C, Stefanidis GD, Li X, Gao X. Fundamentals and applications of microwave heating to chemicals separation processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;114. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109316>
10. Liu K, Zhao Z, Li H, Gao X. Microwave-induced vapor-liquid mass transfer separation technology – full of breakthrough opportunities in electrified chemical processes. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2023;39. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100890>
11. Ge X. Experimental study on concentrating apple juice by microwave. *Advance Journal of Food Science and Technologies*. 2014;6(4):544–546. <https://doi.org/10.19026/ajfst.6.70>
12. Yousefi S, Emam-Djomeh Z, Mousavi SMA, Askari GR. Comparing the effects of microwave and conventional heating methods on the evaporation rate and quality attributes of pomegranate (*Punica granatum L.*) juice concentrate. *Food and Bioprocess Technology*. 2012;5:1328–1339. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0603-x>

13. Dinçer C, ÇAM İB, TORUN M, Başunal Gülmez H, TOPUZ A. Mathematical modeling of concentrations of grape, pomegranate and black carrot juices by various methods. *The Journal of Food*. 2019;44(6):1092–1110. <https://doi.org/10.15237/gida.GD19080>
14. Bozkir H, Baysal T. Concentration of apple juice by vacuum microwave evaporator and in comparison to rotary evaporator. *Journal of Food Processing and Technology*. 2017;8(9):128. <https://doi.org/10.4172/2157-7110-C1-069>
15. Bozkir H, Baysal T. Concentration of apple juice using a vacuum microwave evaporator as a novel technique: Determination of quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering*. 2017;40(5). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12535>
16. Dinçer C. Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2021; 55(3):175–196. <https://doi.org/10.1080/08327823.2021.1952837>
17. Lohrasbi-Nejad S, Shahedi M, Fathi M. Comparative study of microwave-assisted vacuum evaporation, microwave-assisted evaporation, and conventional evaporation methods on physicochemical properties of barberry juice. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2021;23(2):307–317.
18. Chua LS, Leong CY. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020;44(10). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14786>
19. Kumar A, Shrivastava SL. Temperature, concentration, and frequency dependent dielectric properties of pineapple juice relevant to its concentration by microwave energy. *Journal of Food Process Engineering*. 2019;42(3). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13013>
20. Bozkir H, Tekgül Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: Thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022;46(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15902>
21. Trushechkin AV. Scientific support and equipment for two-stage vacuum evaporation of multicomponent vegetable mixes. Cand. eng. sci. abstract diss. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies; 2013. 18 p. (In Russ.). [Трушечкин А. В. Научное обеспечение процесса двухстадийного вакуум-выпаривания поликомпонентных овощных смесей и разработка оборудования для его реализации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Воронеж, 2013. 18 с.]
22. Tao Y, Yan B, Zhang N, Wang M, Zhao J, Zhang H, et al. Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: A study based on dielectric spectroscopy. *Journal of Food Engineering*. 2021;294. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110414>
23. Asghar MT, Yusof YA, Mokhtar MN, Yaacob ME, Ghazali HM, Varith J, et al. Processing of coconut sap into sugar syrup using rotary evaporation, microwave and open heat evaporation techniques. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020;100(10):4012–4019. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10446>
24. Alvi T, Khan MKI, Maan AA, Nazir A, Ahmad MH, Khan MI, et al. Modelling and kinetic study of novel and sustainable microwave-assisted dehydration of sugarcane juice. *Processes*. 2019;7(10). <https://doi.org/10.3390/pr7100712>
25. Tao Y, Yan B, Zhang N, Wang M, Zhao J, Zhang H, et al. Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: A study based on dielectric spectroscopy. *Journal of Food Engineering*. 2021;294. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110414>
26. Tao Y, Yan B, Zhang N, Zhao J, Zhang H, Chen W, et al. Decoupling thermal effects and possible non-thermal effects of microwaves in vacuum evaporation of glucose solutions. *Journal of Food Engineering*. 2023;338. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111257>
27. Burdo OG, Gavrilov AV, Sirotiyuk IV, Ruzhitskaya NV, Goncharov DS. Electrodynamical apparatuses for solutions' concentration. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2022;58(3):290–298. <https://doi.org/10.3103/S1068375522030073>
28. Gerber YuB, Gavrilov AV. The device of a continuous microwave vacuum evaporator. Russia patent RU 213932U1. 2022. [Устройство микроволновой вакуум-выпарной установки непрерывного действия: пат. 213932U1 Рос. Федерация. № 2022111823 / Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В.; заявл. 28.04.2022; опубл. 05.10.2022. Бюл. № 28. 6 с.]
29. Vankatesh MS, Raghavan GSV. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*. 2004;88(1):1–18. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.01.007>
30. Kutepov AM, Sterman LS, Styushin NG. Hydrodynamics and heat transfer during vaporization. Moscow: Vysshaya shkola; 1986. 447 p. (In Russ.). [Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986. 447 с.]
31. Burdo OG, Trishyn FA, Terziev SG, Gavrilov AV, Sirotiyuk IV. Electrodynamical processes as an effective solution of food industry problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021;57(3):330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
32. Burdo OG, Gavrilov AV, Sirotiyuk IV, Ruzhitskaya NV, Goncharov DS. Electrodynamical apparatuses for solutions' concentration. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2022;58(3):290–298. <https://doi.org/10.3103/S1068375522030073>

33. Gavrilov AV. Experimental modeling of the vaporization of liquid solutions under vacuum and microwave field conditions. Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agro-engineering University named after V.P. Goryachkin”. 2020;95(1):41–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2020-1-41-50>
34. Lashchinskiy AA, Tolchinskiy AR. Fundamentals of chemical equipment design and calculation. Moscow: Al'yans; 2011. 752 p. (In Russ.). [Лашчинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. М.: Альянс, 2011. 752 с.].
35. Borts BV, Kazarinov YuG, Skoromnaya SF, Tkachenko VI. An experimental study of air bubbles dynamics in water at the rapid decompression. Journal of Kharkiv University. Physical Series: Nuclei, Particles, Fields. 2012;999(1):95–101. (In Russ.). [Экспериментальное исследование динамики пузырьков воздуха в воде при быстрой декомпрессии / Б. В. Борц [и др.] // Журнал Харьковского университета. Физическая серия: Ядра, Частицы, Поля. 2012. Т. 991. № 1. С. 95–101.].
36. Emets BG. Nuclear magnetic resonance as a method to determine the average sizes and concentrations of air bubbles in water. Technical Physics Letters. 1997;23(13):42–45. (In Russ.). [Емец Б. Г. Определение методом ядерного магнитного резонанса средних размеров и концентраций воздушных пузырьков, содержащихся в воде // Письма в журнал технической физики. 1997. Т. 23. № 13. С. 42–45.]. <https://elibrary.ru/RYNFPZ>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2496>
<https://elibrary.ru/RAWUST>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Влияние антибактериального рассола на качество и микробиологическую безопасность продуктов из мяса



М. Б. Данилов^{1,*}, С. Ю. Лескова¹, А. В. Пурбуев¹,
С. Н. Павлова¹, Ю. Ю. Забалуева²

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления , Улан-Удэ, Россия

² Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет) , Москва, Россия

Поступила в редакцию: 18.05.2023

Принята после рецензирования: 03.10.2023

Принята к публикации: 07.11.2023

*М. Б. Данилов: tmkp@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8051-0702>

С. Ю. Лескова: <https://orcid.org/0000-0002-2938-4752>

А. В. Пурбуев: <https://orcid.org/0009-0006-2948-6560>

С. Н. Павлова: <https://orcid.org/0009-0009-9710-3172>

Ю. Ю. Забалуева: <https://orcid.org/0000-0001-5366-8811>

© М. Б. Данилов, С. Ю. Лескова, А. В. Пурбуев,
С. Н. Павлова, Ю. Ю. Забалуева, 2024



Аннотация.

Развитие nomadic livestock breeding as an additional raw material resource for regions with harsh climatic conditions is expedient. Production of products based on meat of indigenous animals will expand the assortment. Ensuring quality and safety of meat products is determined by the marinade. The purpose of the study – to study the influence of the marinade, which contains the extract of Icelandic cetraria (*Cetraria islandica* (L.) Ach.), on organoleptic characteristics and microbiological safety of products from meat.

Объектами исследования являлись мясо говядины бурятской породы (молодняк в возрасте 2-х лет) и многокомпонентный антибактериальный и стандартный шприцовочные рассолы. Посол осуществляли инъектором с полый перфорированной иглой шагом 20 мм. Тендеризацию проводили в универсальном экспресс-маринаторе со скоростью вращения 16 об/мин в течение 10 ч. Для определения показателей качества и безопасности применяли стандартные методы исследования. На основании микробиологических, химических и органолептических показателей устанавливали срок годности исследуемого образца.

На конец резервного срока годности изучаемых продуктов общее количество микроорганизмов составило $1,2 \times 10^3$ и $1,0 \times 10^3$ КОЕ/г в контроле и опыте соответственно. Условно-патогенные бактерии и микроорганизмы не были обнаружены. При исследовании микробиологических показателей опытных образцов мясопродукта в нормативном и увеличенном на порядок количествах условно-патогенные микроорганизмы не обнаружены. Изучение динамики изменения кислотного и перекисного чисел в процессе хранения продукта из мяса, изготовленного с использованием рассола с отваром цетрарии исландской, свидетельствует о стабилизации процессов окисления жирового компонента.

Органолептическая оценка продукта и изменения микробиологических и окислительных процессов показали возможность увеличения срока годности до 5 суток. Опытный образец продукта с указанным сроком годности по сумме баллов органолептических показателей был выше контрольного образца на 0,9 балла и соответствовал установленным требованиям. Контрольный образец уступал опытному по цвету, консистенции и запаху.

Ключевые слова. Мясопродукты, рассол, безопасность, перекисное число, *Cetraria islandica*, аборигенное животноводство

Для цитирования: Влияние антибактериального рассола на качество и микробиологическую безопасность продуктов из мяса / М. Б. Данилов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 146–155. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2496>

Effect of Antibacterial Brine on Quality and Microbiological Safety of Meat Products



Mikhail B. Danilov^{1,*}, Svetlana Yu. Leskova¹,
Aldar V. Purbuev¹, Svetlana N. Pavlova¹, Yuliya Yu. Zabalueva²

¹ East Siberia State University of Technology and Management^{ROR}, Ulan-Ude, Russia

² K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management
(the First Cossack University)^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 18.05.2023
Revised: 03.10.2023
Accepted: 07.11.2023

*Mikhail B. Danilov: tmkp@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8051-0702>
Svetlana Yu. Leskova: <https://orcid.org/0000-0002-2938-4752>
Aldar V. Purbuev: <https://orcid.org/0009-0006-2948-6560>
Svetlana N. Pavlova: <https://orcid.org/0009-0009-9710-3172>
Yuliya Yu. Zabalueva: <https://orcid.org/0000-0001-5366-8811>

© M.B. Danilov, S.Yu. Leskova, A.V. Purbuev, S.N. Pavlova,
Yu.Yu. Zabalueva, 2024



Abstract.

Nomad livestock farming is an extra raw material resource for regions with harsh climate. Foods based on meat of indigenous animals expand the range of products with high consumer properties. The quality and safety of meat products usually depend on the brine. The present research featured the effect of brine with Island moss (*Cetrária islándica* (L.) Ach.) on the sensory profile and microbiological safety of meat products.

The study involved meat of two-year-old indigenous cows, as well as multicomponent antibacterial and standard extrusion brines. The brine was injected with a syringe-injector with a hollow perforated needle at a 20 mm pitch. The tenderization took place in a universal express tenderizer with a rotation speed of 16 rpm and lasted for 10 h. The shelf-life was determined based on microbiological, chemical, and sensory indicators.

By the end of the reserve shelf-life, the total microbial count was 1.2×10^3 CFU/g in the control and 1.0×10^3 CFU/g in the experimental sample. No opportunistic pathogenic bacteria or microorganisms were detected. No opportunistic pathogenic microorganisms were revealed when the microbiological parameters were studied in standard quantities and in quantities increased by an order of magnitude.

The changes in acid and peroxide numbers during storage indicated a stable oxidation of the fat component in the experimental sample. Its sensory evaluation exceeded the control sample by 0.9 points in terms of color, texture, and smell. The meat marinated with *C. islándica* complied with the quality standard and had a shelf-life which exceeded that of the traditionally-marinated meat by 5 days.

Keywords. Meat products, brine, safety, peroxide value, *Cetrária islándica*, native animal husbandry

For citation: Danilov MB, Leskova SYu, Purbuev AV, Pavlova SN, Zabalueva YuYu. Effect of Antibacterial Brine on Quality and Microbiological Safety of Meat Products. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):146–155. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2496>

Введение

Мясные продукты являются частью рациона питания населения. Поэтому обеспечение соответствующих физиологическим потребностям организма состава и свойств мясных продуктов является приоритетом производственной деятельности мясоперерабатывающих предприятий.

Предприятия по производству продуктов питания, в том числе мясных, решают две задачи: с одной стороны, получить максимальную прибыль при меньших затратах, а с другой – обеспечить в продукте надле-

жащий уровень потребительских характеристик и его безопасность. В мясной отрасли основная часть затрат на производство продукции приходится на сырье. Поэтому его качество выступает ключевым фактором в формировании потребительских свойств готового продукта.

Сегодня не все мясоперерабатывающие предприятия располагают собственными сырьевыми ресурсами. Они работают на покупном сырье от разных поставщиков, что затрудняет обеспечение стабильности в ведении технологических процессов. Наряду с проблемами

бесперебойного обеспечения предприятий сырьем, которые связаны не только с производством сырья в стране, но и с трудностями из-за обострения геополитической ситуации, стоит задача увеличения объемов производства и расширения ассортимента продуктов, направленных на повышение качества жизни населения страны [1–6]. Качество жизни человека определяется не только уровнем материального состояния, но и состоянием здоровья, которое зависит от питания (как минимум на 50 %). В связи с этим государством принят ряд документов, в которых указывается на необходимость увеличения объемов производства функциональных и специализированных продуктов, направленных на предотвращение возникновения неинфекционных заболеваний и оздоровление организма (МР 2.3.1.0253-21) [7].

Мясная промышленность не является флагманом по ассортименту и объему производства функциональных и специализированных продуктов питания. Это связано с первоочередной задачей отрасли – обеспечить население страны мясными продуктами в соответствии с физиологическими нормами потребностей. С другой стороны, корректировать состав и свойства мясных продуктов нет необходимости, т. к. они содержат почти все необходимые для организма макро- и микрокомпоненты, а также обладают высокой биологической и энергетической ценностью [8].

Ассортимент функциональных продуктов расширился за счет использования пищевых добавок, которые содержат физиологически активные ингредиенты [9–11]. Кроме использования функциональных ингредиентов в технологии мясных продуктов, широкое распространение получили технологии их использования в составе белково-жировых эмульсий, пищевых добавок и другого пищевого сырья [12, 13]. Имеются сведения об использовании биологически активного рассола, который за счет добавления экстракта хвои позволил увеличить выход готового продукта на 26 % и замедлить окислительные процессы. Обнадеживающие результаты получены при использовании в составе рассолов селенсодержащей овсяной муки и йодированной пищевой добавки, позволяющих выработать функциональные продукты, которые обеспечивают 30 % суточной потребности организма в биоэлементах [14].

Сегодня ситуация на рынке мяса характеризуется снижением производства отечественной говядины и поставок импортного сырья. Прогнозируется снижение потребления говядины с 4,4 % в 2020 г. до 3,8 % в 2024 г. Эксперты связывают такое положение с высокой стоимостью сырья. Для решения сложившейся ситуации в регионах разрабатываются планы увеличения поголовья собственного крупного скота и производства говядины, а также решаются проблемы по использованию нетрадиционных видов сырья, в том числе диких животных [15].

Для регионов с суровыми климатическими условиями и исторически сложившимся потенциалом номад-

ного животноводства актуальным становится увеличение поголовья аборигенного скота. В Республике Бурятия наблюдается рост поголовья бурятской породы скота, экономическая целесообразность которого обоснована в работах [16, 17].

Номадное животноводство способствует формированию специфических характеристик как по составу, так и по свойствам сырья. В научных работах по исследованию свойств аборигенных пород животных были установлены особенности автолитических процессов и функционально-технологических свойств, которые характеризовались низкими значениями в сравнении с аналогичными видами других пород животных. В связи с этим для повышения эффективности переработки сырья аборигенных животных был предложен ряд технологических приемов и пищевых добавок, которые способствуют рациональной переработке сырья и производству мясных продуктов с высокими потребительскими свойствами [18, 19].

Анализ рынка мясных продуктов показывает увеличение доли продуктов из мяса в общем объеме потребительской корзины мясных продуктов. Несмотря на высокую цену на продукт, потребитель предпочитает приобрести натуральный продукт с высокими органолептическими характеристиками и гарантией безопасности.

Актуальной задачей отрасли является увеличение срока годности продукта без ухудшения его качества и микробиологической безопасности. Один из путей решения этой задачи – посол, у которого есть технический и технологический потенциал для регулирования биохимических и микробиологических процессов, обеспечивающих органолептические свойства, химическую и микробиологическую безопасность готовых мясных продуктов [20–22].

На основании анализа рынка мясного сырья и состояния мясной отрасли по производству функциональных мясных продуктов с увеличенным сроком годности и имеющихся научных достижений в данном направлении определили цель и задачи исследования. Целью работы являлась разработка продуктов из мяса с высокими потребительскими свойствами и увеличенным сроком годности за счет использования многокомпонентного рассола с антибактериальными свойствами.

Объекты и методы исследования

В качестве мясного сырья использовали говядину молодняка скота бурятской породы: возраст 2 года, категория низкая, класс Г, подкласс 1 (ГОСТ 34120-2017). Разделку охлажденных туш (0–4 °С) осуществляли по ГОСТ 31797-2012. Для производства продуктов из мяса использовали пашины, реберный и грудной отрубы без ребер, межреберного мяса, поясничных и грудных позвонков.

Для посола использовали многокомпонентный антибактериальный рассол (опыт) и стандартный многокомпонентный рассол (контроль). Их рецептуры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рецептуры многокомпонентных шприцовочных рассолов

Table 1. Formulations of multicomponent extrusion brines

Наименование компонентов	Состав рассола, кг, на 100 кг рассола	
	Контроль	Опыт
Вода/лед	82,633	83,205
Изолированный соевый белок Супро 595	3,350	–
Соль поваренная пищевая	4,562	3,866
Фосфат пищевой Биофос 90	1,667	1,667
Сахар-песок или глюкоза	2,000	–
Пищевая добавка каррагинан GPI 250	1,667	–
Смесь нитритно-посолочная	3,938	3,337
Эриторбат натрия	0,183	–
Отвар цетрарии исландской	–	3,125
Биф Про	–	4,800

В качестве антибактериального компонента в опытном варианте рассола использовали отвар цетрарии исландской (*Cetraria islandica* (L.) Ach.) (ТУ 9197-066-1766 4661-09). Для приготовления отвара использовали измельченные (4 ± 1 мм) сухие слоевища цетрарии исландской. Затем готовили гидромодуль 1:20 с добавлением карбоната натрия из расчета 2,5 г на 100 мл гидромодуля. Нагревали до 90 °C и выдерживали при этой температуре 60 мин, затем фильтровали и охлаждали.

Введение рассола в контрольный и опытный образцы с температурой не выше 4 °C осуществляли уколом в мышечную ткань. Для уколов использовали шприц – одноигольный инъектор с полый перфорированной иглой с шагом ее введения 20 мм. Для повышения эффективности посола и улучшения технологических характеристик сырья предусматривалась механическая тендеризация сырья путем отбивания в ёмкости с рифленой поверхностью. Коэффициент загрузки составил 0,6–0,7. Скорость вращения барабана универсального экспресс-маринатора составила 16 об/мин в течение 10 ч по режиму 50 мин работа, 10 мин покой. Общее время массирования составило 19 ч. Процесс созревания совмещался с массированием по времени (19 ч).

Посоленное сырье укладывали пластами в металлические формы, предварительно выстланные пергаментом с лавровым листом; пустоты заполняли обрезками из обрядки. После заполнения форм сырье сверху накрывали свободными концами пергаменты. Заполненные формы закрывали крышками и подпрессовывали. Затем контрольный и опытный образцы продуктов из мяса варили в воде. Продолжительность варки определяли из расчета 55 мин на 1 кг массы единицы продукта. Формы с образцами продуктов закладывали в ёмкость с водой при температуре 65–70 °C и варили при температуре 80–85 °C в течение 5 ч.

Это обеспечивало достижение температуры в толще продукта 72 ± 2 °C.

После тепловой обработки вареные изделия охлаждали до температуры не более +8 °C в толще продукта. Перед охлаждением металлические формы с продуктом в горячем виде подпрессовывали и опрокидывали над ёмкостью для стекания бульона и жира. Затем охлажденные формы опускали в горячую воду и опрокидывали для освобождения продукта, который зачищали от застывшего бульона и жира. Готовые образцы опытного и контрольного вариантов завертывали в целлофановую пленку, перевязанную шпагатом продольно-поперечно через каждые 3 см, и ставили на хранение.

Микробиологические исследования проводили в соответствии с ГОСТ Р 54-354-2011. Стабильность жировой фазы мясopодуKтов устанавливали по методам определения кислотного и перекисного чисел в мясе и мясopодуKтах (ГОСТ 55480-2013 и ГОСТ 34118-2017). Санитарно-эпидемиологическую оценку сроков годности мясopодуKтов выполнили в соответствии с общими требованиями и порядком проведения испытаний ГОСТ 70354-2022 и МУК 4.2.1847-04. Органолептическую оценку продуктов проводили в соответствии с общими условиями проведения органолептической оценки (ГОСТ 9959-2015) и техническими условиями на продукты из мяса (ТУ 9213-005-42855891-01). Состав контрольного образца продуктов из мяса установили по ТУ 9213-005-42855891-01. В опытном образце использовали мясо скота бурятской породы. Физико-химические показатели готовых продуктов из мяса определили по стандартным методам исследований.

В соответствии с гигиеническими требованиями к срокам годности и условиям хранения скоропортящихся продуктов «Говядина слободская вареная» должна храниться при температуре 4 ± 2 °C не более 72 ч (Сан ПиН 2.3.3.1324-03).

Для обоснования срока годности опытного образца продукта разработали программу испытания, которая включала микробиологические, химические и органолептические показатели с установлением пищевой ценности продукта на конец срока его годности. Изменение санитарно-микробиологических показателей контрольного и опытного образцов продукта изучали по перечню как обязательных, так и дополнительных микроорганизмов. В готовых мясных продуктах, в частности в «Говядине слободской вареной», дополнительно определяли содержание *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens* и *Proteus vulgaris*, а также представителей микробной порчи – дрожжи и плесени.

Результаты и их обсуждение

Согласно полученным данным патогенные и условно-патогенные микроорганизмы из обязательного и дополнительного перечня микроорганизмов на всех этапах процесса хранения контрольного и опытного образцов продукта не были обнаружены.

Определение общего числа микроорганизмов (КМАФАнМ) в пищевом продукте имеет важное санитарно-гигиеническое значение. КМАФАнМ устанавливает не только микробиологическую зараженность продукта, но и характеризует режимы процессов термической обработки сырья и общего санитарного состояния производства. Результаты исследования микробиологических показателей безопасности продукта в процессе хранения представлены на рисунках 1 и 2.

Исследования КМАФАнМ в динамике показали, что использование антибактериального рассола оказывает бактериостатическое действие на рост мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов.

В начале процесса хранения (фон) образцы имели различия в КМАФАнМ: в опытном образце выросло в 3 раза меньше микроорганизмов, чем в контроле.

На конец резервного срока годности исследуемых продуктов общее количество микроорганизмов составило $1,2 \times 10^3$ и $1,0 \times 10^3$ КОЕ/г в контроле и опыте соответственно. Результаты исследований показывают, что на конец резервного срока годности (7 суток) контрольный образец не соответствует требованиям микробиологической безопасности, а в опытном образце КМАФАнМ не превышает $1,0 \times 10^3$ КОЕ/г продукта, т. е. продукт считается микробиологически безопасным. Анализ количества микроорганизмов в установленном нормативным документом сроке годности для контрольного образца (800 КОЕ/г на третьи сутки) и рекомендуемом для опытного образца (600 КОЕ/г на пятые сутки) указывает на то, что оба продукта соответствуют требованиям технического регламента (ТР ТС 034-2013).

Исследования изменения количества дрожжей и плесеней в контрольном и опытном образцах предус-

мотрены программой санитарно-эпидемиологических требований установления сроков годности пищевых продуктов в качестве дополнительных тестов на микроорганизмы порчи.

Из рисунка 2 видно, что количество дрожжей в контрольном и опытном образцах не превышает 90 и 50 КОЕ/г соответственно. Количество плесеней на 3-и и 5-е сутки хранения контрольного образца составило 55 и 65 КОЕ/г соответственно. В мясных вареных продуктах количество микроорганизмов порчи не регламентируется, но, например, для вареной колбасы для детского питания регламентом допустимо не более 100 КОЕ/г каждого микроорганизма.

Шприцовочный рассол с антибактериальными свойствами оказывает бактериостатическое действие на развитие микроорганизмов различных таксономических групп и способствует увеличению срока годности продукта, которое обусловлено содержанием уксусной кислоты в отваре цетрарии исландской, обладающей антибиотической активностью к различным микроорганизмам.

В соответствии с общими требованиями и порядком проведения испытания для обоснования сроков годности мяса и мясных продуктов, кроме рассмотренных выше микроорганизмов, и дополнительного исследования необходимо изучить рост бактерии рода *Pseudomonas* (*Pseudomonas aerogenosa*), которого не должно быть в 1 мл взвеси мясного полуфабриката. В опытном образце мясопродукта установили отсутствие *P. aerogenosa* в 0,1 и в 1 г продукта на последней точке отбора пробы.

Программа испытаний санитарно-эпидемиологического обоснования срока годности опытного образца продукта предусматривала исследования условно-патогенных микроорганизмов в нормированном и расширенном объеме продукта. На последней точке

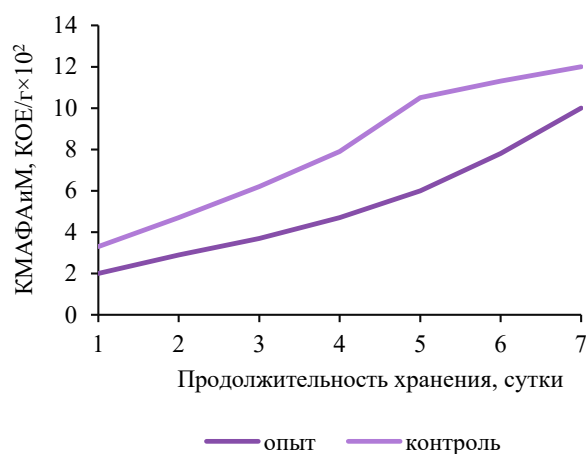


Рисунок 1. Изменение КМАФАнМ в динамике хранения

Figure 1. Total viable count during storage

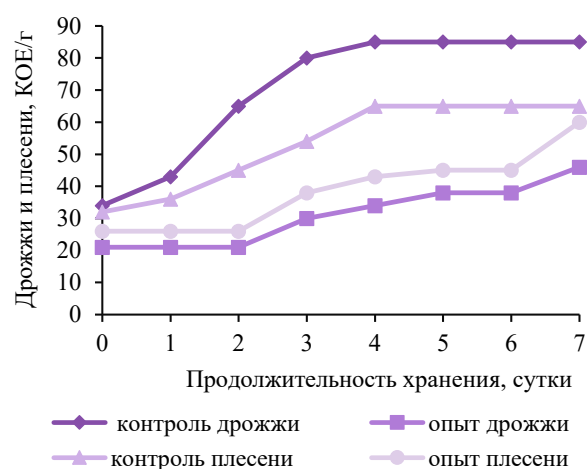


Рисунок 2. Изменение количества дрожжей и плесеней в динамике хранения

Figure 2. Yeast and mold count during storage

контроля опытного образца продукта условно-патогенные микроорганизмы (БГКП (колиформы), сульфитредуцирующие бактерии *Clostridium perfringenes*, бактерии рода *Proteus* (*Proteus vulgaris*) и стафилококки вида *Staphylococcus aureus*) не были обнаружены (табл. 2).

Обоснование срока годности мясопродукта, обеспечивающего соответствующие потребительские характеристики и безопасность, предусматривает проведение физико-химических исследований и органолептической оценки. Из физико-химических показателей важными являются показатели, которые характеризуют процессы изменения жирового компонента, а именно гидролитические и окислительные реакции липидов. Обеспечение окислительной стабильности мясопродуктов актуально из-за особенностей их состава и структуры [23, 24]. Окисление липидов в мясе и мясных продуктах начинается в фосфолипидах клеточных мембран мышц, среди которых красные мышцы содержат наибольшее количество фосфолипидов [25–27]. Продукты из говядины, по сравнению с продуктами из свинины и мяса птицы, характеризуются большей устойчивостью к окислительным процессам. Однако изученные образцы мясопродукта были подвержены окислительным процессам.

Учитывая, что изучение окислительной порчи жирового компонента, в соответствии с требованиями по организации санитарно-эпидемиологических исследований,

проводится в продуктах при сроках годности 10 и более суток, то резервный срок годности составил 7 суток.

В соответствии с требованиями СанПиН 2.3.3.1304-03 вареный мясопродукт должен храниться при температуре 4 ± 2 °С в течение 72 ч. С учетом увеличения срока годности опытного образца продукта до 5 суток контроль окислительной порчи жирового компонента проводили на последней точке резервного срока годности – на 7 сутки. При определении резервного срока годности применили коэффициент 1,3 (ГОСТ Р 7054-2022).

Результаты исследования перекисного и кислотного чисел в динамике хранения опытного и контрольного образцов мясопродукта показали, что жировой компонент подвержен окислительным и гидролитическим процессам (рис. 3 и 4). В контрольном и опытном образцах значения кислотного и перекисного чисел не превышают допустимые значения в течение установленного (для контроля) и рекомендуемого (для опытного образца) сроков хранения.

Допустимые значения кислотного числа устанавливали в соответствии с требованиями ГОСТ 25292-2017. По говяжьему жиру кислотное число, мл КОН/г, не более: для высшего сорта составило 1,1, для первого сорта – 2,2, для сборного жира – 3,5. По ГОСТ Р 70354-2022 при оценке порчи жирового компонента накопления продуктов окислительной порчи не должны превышать 6 мг КОН/г жира для кислотного числа.

Таблица 2. Исследования условно-патогенных микроорганизмов при посеве расширенного объема мясного продукта (последняя точка контроля)

Table 2. Opportunistic microorganisms after expanded inoculation (last control point)

Условно-патогенные микроорганизмы					
БГКП (колиформы)		<i>Clostridium perfringenes</i>		<i>Staphylococcus aureus</i>	
в 1 г	в 10 г	в 0,1 г	в 1 г	в 1 г	в 10 г
не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено

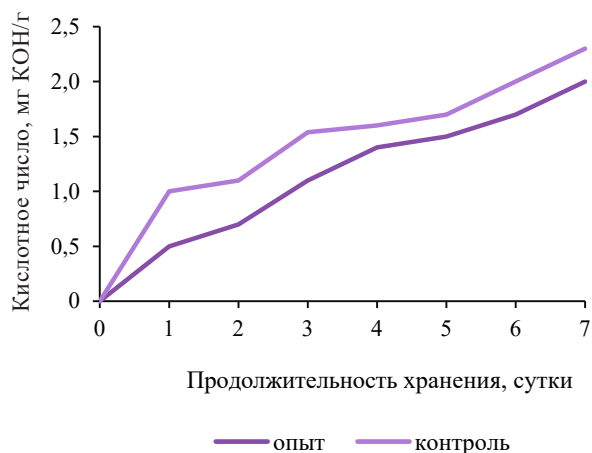


Рисунок 3. Изменение кислотного числа в динамике

Figure 3. Acid number during storage

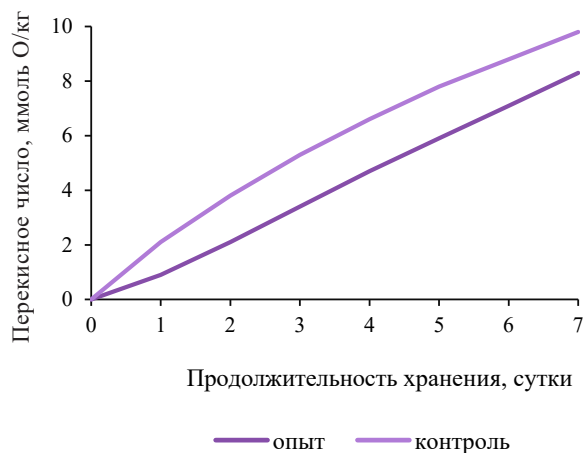


Рисунок 4. Динамика изменения перекисного числа в процессе хранения

Figure 4. Peroxide value during storage

По перекисному числу ориентировались на ГОСТ Р 54346-2011. В соответствии с требованиями данного ГОСТа продукты считаются свежими, если значение перекисного числа в них не превышает 10 ммоль О/кг жира, содержащегося в продукте. Однако использование рассола с антибактериальными свойствами придает продукту большую устойчивость к окислительному и гидролитическому процессам. Минимальная ингибирующая концентрация уксусной кислоты (1–16 мг/мл) подавляет рост большинства видов микроорганизмов, обладающих липолитической активностью. Кроме того, редуцирующие сахара и полисахариды отвара цетрарии исландской как антибактериального компонента рассола связывают активный кислород и свободную влагу в продукте. Это повышает устойчивость липидов мясной системы к окислительному и гидролитическому процессам [28–30].

Как показывают данные рисунков 3 и 4, срок годности опытного образца возможно увеличить до 5 суток, т. е. лишь к концу резервного срока годности (7 суток) кислотное число достигает предельно допустимых значений. Перекисное число приближено к верхнему пределу нормативного значения, а на конец рекомендуемого срока хранения (5 суток) они находятся в пределах нормы.

В соответствии с общими требованиями и порядком проведения испытаний для обоснования срока годности мясных продуктов изучение органолептических показателей является обязательной процедурой. Ее следует проводить в каждой контрольной точке. При оценке органолептических показателей изучаемых образцов мы руководствовались методическими указаниями по санитарно-эпидемиологической оценке обоснования сроков годности и условий хранения пищевых

продуктов. Поэтому дегустационные испытания мясопродуктов проводили один раз по 5-балльной системе в конце установленного срока годности для контрольного образца (3 суток) и рекомендуемого (5 суток) для опытного образца с учетом коэффициента весомости каждого показателя органолептической оценки.

При оценке внешнего вида продуктов и их потребительской упаковки было установлено полное соответствие требованиям (5 баллов).

Результаты оценки вида и цвета на разрезе, консистенции, запаха и вкуса исследуемых образцов мясопродуктов представлены в таблице 3.

При определении общей суммы баллов учитывали наименьшую оценку показателя. Расчет вели по формуле (1):

$$П = B \times K/10 \quad (1)$$

где $П$ – органолептический показатель; B – наименьшая оценка показателя, балл; K – коэффициент весомости показателя; 10 – сумма коэффициентов весомости показателей.

Уровень качества продукта с учетом коэффициента весомости органолептических показателей для контрольного и опытного образцов составил 4,1 и 5,0 баллов соответственно.

На рисунке 5 представлена сумма баллов органолептической оценки показателей, рассчитанная по формуле 1.

Опытный образец по органолептическим показателям превышает контрольный на 0,9 балла. Контрольный образец уступает опытному по цвету, консистенции и запаху. Использование отвара цетрарии исландской

Таблица 3. Органолептическая характеристика мясопродуктов на конец резервного срока годности

Table 3. Sensory profile at the end of reserve shelf-life

Показатели	Контроль, через 5 суток		Опыт, через 7 суток	
	Характеристика	Оценка, балл	Характеристика	Оценка, балл
Внешний вид продукта (1)*	Несоответствия отсутствуют	5	Несоответствия отсутствуют	5
Внешний вид упаковки (1)	Несоответствия отсутствуют	5	Несоответствия отсутствуют	5
Вид на разрезе (3)*	Несоответствия отсутствуют	15	Несоответствия отсутствуют	15
Цвет на разрезе (3)*	Красный с бледноватым оттенком	12	Красный, интенсивный	15
Рецептурный состав (3)*	Несоответствия отсутствуют	15	Несоответствия отсутствуют	15
Консистенция (2)*	Плотная	10	Плотная	10
	Упругая	10	Упругая	10
	Не сочная	8	Сочная	10
Запах (4)*	Слабовыраженный аромат	16	Приятный выраженный аромат	20
Вкус (4)	Свойственный данному продукту	20	Свойственный данному продукту	20

*коэффициент весомости показателя.

*weight factor.

в составе рассола не только оказывает бактериостатическое действие, но и улучшает органолептические характеристики готового изделия.

Характеристика «Говядины слободской формованной», выработанной с использованием многокомпонентного рассола с антибактериальными свойствами, представлена в таблице 4.

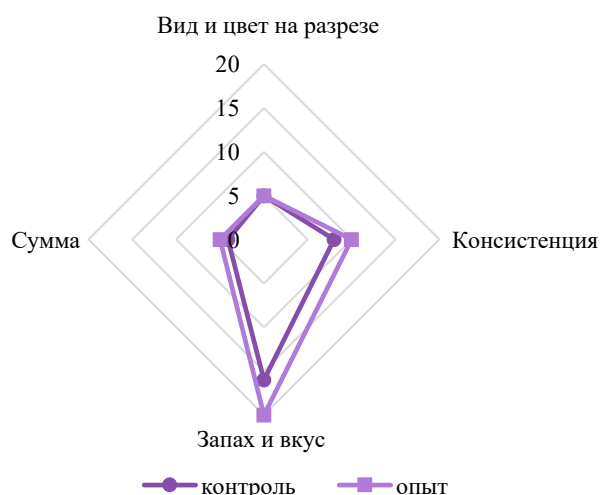


Рисунок 5. Органолептическая оценка мясопродуктов, баллы

Figure 5. Sensory evaluation, points

Выводы

1. Развитие домашнего животноводства для увеличения поголовья аборигенных животных как дополнительный сырьевой ресурс мяса (говядины) актуально для регионов с суровыми климатическими условиями и ограниченной кормовой базой.

2. Доказали возможность использования многокомпонентного рассола с антибактериальными свойствами, обусловленными отваром цетрарии исландской (*Cetrária islándica* (L.) Ach.).

3. На основании микробиологических, физико-химических и органолептических исследований продуктов из мяса бурятской породы скота в процессе хранения обосновали увеличение срока годности продукта на двое суток (до 5 суток) без ухудшения органолептических показателей.

4. Изучили показатели качества и микробиологической безопасности «Говядины слободской вареной» при хранении в течение 5 суток, на основании которых возможно увеличить срок годности продукта до 5 суток.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Идея и анализ принадлежит М. Б. Данилову. С. Ю. Лескова, С. Н. Павлова, А. В. Пурбуев и Ю. Ю. Забалуева собрали данные, повели анализ и написали статью.

Таблица 4. Показатели качества и микробиологической безопасности «Говядины слободской вареной»

Table 4. Sloboda boiled beef: quality and microbiological safety

Наименование показателей	Характеристика и норма для «Говядины слободской вареной»
Внешний вид	Поверхность чистая и сухая, без выхватов мяса и бахромок с наличием частиц специй и лаврового листа. Пластами в целлофановой пленке, перевязанной шпагатом
Форма	Прямоугольная
Консистенция	Упругая
Вид на разрезе	Чередующиеся слои мышечной ткани интенсивно красного цвета с прослойками жировой и соединительной тканей в естественном соотношении, жировая ткань желтого цвета
Запах и вкус	Свойственный продукту без посторонних привкуса и запаха, в меру соленый с ароматом специй и лаврового листа
Массовая доля поваренной соли, %, не более	3,5
Массовая доля белка, %, не менее	16,0
Массовая доля жира, %, не более	22,0
Содержание общего фосфора в пересчете на P_2O_5 , не более	0,4
Остаточная активность кислой фосфатазы, %, не более	0,006
Микробиологические показатели: КМАФАиМ, КОЕ/г, не более	1×10^3
БГКП (колиформы), в 1 г продукта	не допускаются
Сульфитредуцирующие клостридии, в 0,01 г продукта	не обнаружены
Патогенные микроорганизмы, в т. ч. сальмонеллы, в 25 г продукта	не обнаружены

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в связи с публикацией этой статьи.

idea and analysis belonged to M.B. Danilov. S.Yu. Leskova, S.N. Pavlova, A.V. Purbuev, and Yu.Yu. Zabalueva collected the data, carried out the analysis, and wrote the article.

Contribution

The authors contributed equally to the writing of the manuscript and bear equal responsibility for plagiarism. The

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest with respect to the publication of this article.

References

1. Vovk NS, Barbashin DI. Analysis of offers on the world market of gastronomic products from beef meat. In: Grinev VE, editor. Development trajectories. Moscow: Vest-Ost-Ferlag Berlin; 2020. pp. 21–25. (In Russ.). [Вовк Н. С., Барбашин Д. И. Анализ предложений на мировом рынке гастрономических продуктов из мяса говядины // Траектории развития / под ред. В. Е. Гринёва. М.: Вест-Ост-Ферлаг Берлин, 2020. С. 21–25.]. <https://www.elibrary.ru/KSKUBB>
2. Izhmulkina EA, Sartakova OA. Analysis and investment attractiveness of the market Russian beef. Regional Problems of Transforming the Economy. 2019;110(12):58–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2019-12-58-67>
3. Leskova SYu, Zhargalova ATs, Danilov MB, Khankhalaeva IA, Andreeva SV. Prospects for rational processing of native cattle. ESSUTM Bulletin. 2022;86(3):14–20. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2022_3_14
4. Sukhov MA, Giro TM, Kozlov SV, Ziruk IV. Raw cured poultry meat fortified with bee pollen: biomedical research on laboratory animals. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(4):775–785. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2476>
5. Korotkiy IA, Korotkaya EV, Raschepkin AN, Sakhabutdinova GF. Frozen meat-containing semi-finished minced products: Biopolymer packaging materials. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(1):6–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-6-16>
6. Rincón Soledad EM, Arredondo Nontién MA, Castro JW, Barrios D, Vásquez Mejía SM. Chorizo sausage with shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) as a fat substitute: quality evaluation. Foods and Raw Materials. 2024;12(1):168–178. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-598>
7. Pame K, Daimary B, Borah S. Utilization of dietary fibre in meat products as functional foods. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology. 2022;15(01):147–151. <https://doi.org/10.30954/0974-1712.01.2022.19>
8. Kausar T, Hanan E, Ayob O, Praween B, Azad ZRAA. A review on functional ingredients in red meat products. Bioinformation. 2019;15(5):358–363. <https://doi.org/10.6026/97320630015358>
9. Parés D, Saguier E, Pap N, Toldrà M, Carretero C. Low-salt porcine serum concentrate as functional ingredient in frankfurters. Meat Science; 2012;92(2):151–156. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.029>
10. Haque A, Ahmad S, Azad ZRAA, Adnan M, Ashraf SA. Incorporating dietary fiber from fruit and vegetable waste in meat products: a systematic approach for sustainable meat processing and improving the functional, nutritional and health attributes. PeerJ. 2023;11. <https://doi.org/10.7717/peerj.14977>
11. Pogorelska-Nowiska E, Atanasov AG, Horbanczuk J, Wierzbicka A. Bioactive compounds in functional meat products. Molecules. 2018;23(2). <https://doi.org/10.3390/molecules23020307>
12. Leskova SYu, Danilov MB, Aslaliyev AD, Badmaeva TM, Zhargalova ATs, Zarya IA. About the possibility of using β -cyclodextrin to create functional products in the meat food system. Bulletin of Ryskulbekov Kyrgyz Economic University. 2021;52(3):104–107. (In Russ.). [О возможности использования β -циклодекстрина для создания функциональных продуктов в мясной пищевой системе / С. Ю. Лескова [и др.] // Вестник Кыргызского экономического университета им. М. Рыскулбекова. 2021. Т. 52. № 3. С. 104–107.]. <https://www.elibrary.ru/PCLQLZ>
13. Bohrer BM, Izadifar M, Barbut S. Structural and functional properties of modified cellulose ingredients and their application in reduced-fat meat batters. Meat Science. 2023;195. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109011>
14. Leskova SYu, Merzlyakov AA, Purbuev AV, Danilov MB, Bitueva EB. Multi-component brine for creating functional meat products. ESSUTM Bulletin. 2023;88(1):14–21. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2023_1_14
15. 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>
16. Garmayev DTs, Tsydyypova AV. Cattle breeding in the republic of Buryatia: Problems and prospects for development. Science Review: Theory and Practice. 2021;11(7):2070–2082. (In Russ.). <https://doi.org/10.35679/2226-0226-2021-11-7-2070-2082>
17. Garmayev DTs, Tsydyypova AV. The current state of cattle breeding in the Republic of Buryatia: problems and prospects. Alley of Science. 2021;2(5):270–273. (In Russ.). [Гармаев Д. Ц., Цыдыпова А. В. Современное состояние скотоводства Республики Бурятия: проблемы и перспективы развития // Аллея науки. 2021. Т. 2. № 5. С. 270–273.]. <https://elibrary.ru/WKDCRE>

18. Pavlova SN, Danilov MB, Bitueva EB, Zhargalova ATs, Aslaliyev AD. Boiled sausage technologies using the gallolean cattle meat. ESSUTM Bulletin. 2019;75(4):54–61. (In Russ.). [Технология вареной колбасы с использованием мяса галловейской породы скота / С. Н. Павлова [и др.] // Вестник ВСГУТУ. 2019. Т. 75. № 4. С. 54–61.]. <https://elibrary.ru/OXUXWR>
19. Danilov MB, Leskova SYu, Merzlyakov AA, Lamazhapova GP, Smirnova IA. Rational method of processing the meat of the native breed of sheep “Buubey”. ESSUTM Bulletin. 2019;75(4):40–45. (In Russ.). [Рациональный способ переработки мяса овец аборигенной породы «Буубэй» / М. Б. Данилов [и др.] // Вестник ВСГУТУ. 2019. Т. 75. № 4. С. 40–45.]. <https://elibrary.ru/OMTFLH>
20. Kerner K, Kazernavičiūtė R, Jõudu I, Rocchetti G, Lucini L, Tānavots A, *et al.* Evaluation of different blackcurrant seed ingredients in meatballs by using conventional quality assessment and untargeted metabolomics. Meat Science. 2023;200. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109160>
21. Moiseeva NS, Chekryga GP, Motovilov OK, Golub OV. Fluorescence method in measuring the degree of brine penetration into boneless whole-muscle turkey meat. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):209–219. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-209-219>
22. Gurinovich GV, Patrakova IS, Khrenov VA. Effect of dry maturation time and the curing composition on proteins in high quality beef. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(1):98–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-98-107>
23. Lisitsyn AB, Tuniyeva EK, Gorbunova NA. Oxidation of lipids: the mechanism, dynamics, inhibition (on materials of foreign literature). Vsyо о Myase. 2015;(1):10–15. (In Russ.). [Лисицын А. Б., Туниева Е. К., Горбунова Н. А. Окисление липидов: механизм, динамика, ингибирование // Все о мясе. 2015. № 1. С. 10–15.]. <https://elibrary.ru/TJZEYN>
24. Gurinovich GV, Patrakova IS, Kudryashov LS. Study of the Effect of curing mixture compositions on oxidation of lipids in meat systems. Food Processing: Techniques and Technology. 2018;48(1):31–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-1-31-40>
25. Cheng JH. Lipid oxidation in meat. Journal of Nutrition and Food Sciences. 2016;6(3). <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000494>
26. Sun Y-E, Wang W-D, Chen H-W, Li C. Autoxidation of unsaturated lipids in food emulsion. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2011;51(5):453–466. <https://doi.org/10.1080/10408391003672086>
27. Gurinovich GV, Malyutina KV, Seregin SA, Patrakova IS. The Effect of acid composition on the fermentation process of pork fat. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(1):32–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-32-43>
28. Ahmed M, Pickova J, Ahmad T, Liaquat M, Farid A, Jahangir M. Oxidation of lipids in foods. Sarhad Journal of Agriculture. 2016;32(3):230–238. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2016.32.3.230.238>
29. Choe E, Min DB. Chemistry and reactions of reactive oxygen species in foods. Journal of Food Science. 2005;70(9):R142–R159. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb08329.x>
30. Novakovich S, Djekic I, Pesic M, Kostic A, Milincic D, Stanisavljevic N, *et al.* Bee pollen powder as a functional ingredient in frankfurters. Meat Science. 2021;182. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108621>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2497>
<https://elibrary.ru/TTFIQO>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Температурные изменения в мясных изделиях при жарке в пароконвекционных печах



М. Н. Смагина*^{ID}, Д. А. Смагин^{ID}

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,
Могилев, Республика Беларусь

Поступила в редакцию: 01.06.2023

Принята после рецензирования: 19.10.2023

Принята к публикации: 07.11.2023

*М. Н. Смагина: m.n.smagina@mail.ru,

<https://orcid.org/0009-0006-8762-4730>

Д. А. Смагин: <https://orcid.org/0009-0004-2974-5580>

© М. Н. Смагина, Д. А. Смагин, 2024



Аннотация.

В производство пищевой продукции, в том числе мясной, внедряются пароконвектоматы, для рационального применения которых необходимо создавать научно-практические основы. Цель работы – исследование характера изменения средне-объемной температуры и температурного градиента в мясных изделиях, выполненных в форме одномерных тел и различающихся по нутриентному составу, при термообработке в сухом воздухе и паровоздушной смеси.

Исследовали два образца мясных изделий, различных по содержанию влаги и жира: из куриного филе (влажность 74,5 %, содержание жира 1,9 %) и лопаточной части свинины (влажность 55,1 %, содержание жира 29,4 %). Изделия формировались в виде одномерных цилиндра и пластины, а затем подвергались нагреванию в диапазоне температур 160–240 °С в пароконвекционном аппарате Упох-203G (Италия). В качестве греющей среды применяли сухой воздух и паровоздушную смесь влажностью 80–85 %. Для измерения температуры применяли термодатчики, подключенные к измерителю Сосна-004.

Выявили закономерности изменения среднеобъемной температуры и температурного градиента в исследуемых слоях мясных изделий. Для температурного градиента выделили три этапа при обработке в паровоздушной смеси и четыре в сухом воздухе. Изменение среднеобъемной температуры для паровоздушной смеси описывается уравнением степенной зависимости, для сухого воздуха – линейной. При нагревании в сухом воздухе темп изменения температурного градиента был постоянен, но снижался на определенном этапе. Темп изменения среднеобъемной температуры в течение 5 мин был невысоким, но затем повышался, сохраняя значение до конца процесса. При нагревании в паровоздушной смеси темп изменения температурного градиента вначале снижался, достигая минимума на 4–5 мин, а затем рос. Для среднеобъемной температуры характерен высокий темп изменения в течение первых 5 мин, а затем снижение. Изделия с низким содержанием жира (куриное филе) прогреваются быстрее на 13–26 % при обработке в паровоздушной смеси и на 9–23 % в сухом воздухе. Для изделий в форме пластины была характерна более длительная термообработка. На характер изменения температурного градиента и среднеобъемной температуры состав и форма выраженного влияния не оказывали.

Полученные зависимости позволяют осуществить подбор оптимальных температурно-влажностных режимов конвективной жарки мясопродуктов.

Ключевые слова. Мясопродукты, пароконвектомат, термообработка, термометрические показатели, температурный градиент, среднеобъемная температура, сухой воздух, паровоздушная смесь, одномерное тело

Для цитирования: Смагина М. Н., Смагин Д. А. Температурные изменения в мясных изделиях при жарке в пароконвекционных печах // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 156–166. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2497>

Temperature Changes in Meat Products Fried in Steam-Convection Oven



Marina N. Smagina*, Denis A. Smagin

Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Mogilev, Republic of Belarus

Received: 01.06.2023

Revised: 19.10.2023

Accepted: 07.11.2023

*Marina N. Smagina: m.n.smagina@mail.ru,

<https://orcid.org/0009-0006-8762-4730>

Denis A. Smagin: <https://orcid.org/0009-0004-2974-5580>

© M.N. Smagina, D.A. Smagin, 2024



Abstract.

Combination steam ovens, or combi steamers, have entered all spheres of food production, including the meat industry. Their rational use requires a scientific and practical foundation. This research featured the changes in mean volume temperature and temperature gradient that occur in meat products (one-dimensional bodies with different nutrient compositions) during heat treatment in dry air and a steam-air mix.

The research involved two samples of meat products with different moisture and fat contents. The chicken fillet sample had a moisture content of 74.5% and a fat content of 1.9% while the pork shoulder sample had a moisture content of 55.1% and a fat content of 29.4%. Shaped as a one-dimensional cylinder and a plate, the samples were subjected to heating at the temperature range of 160–240°C in a Unox-203G steam-convection oven (Italy). Dry air and a steam-air mix with a humidity of 80–85% served as a heating medium. The temperature was measured using thermocouples attached to a Sosna-004 meter.

The research revealed some patterns in the mean volume temperature and temperature gradient. The temperature gradient involved three stages during processing in a steam-air mix and four stages when treated with dry air. The change in the mean volume temperature for the steam-air mix could be described by a power law equation; the dry air treatment was described using a linear equation. When heated in dry air, the rate of change in the temperature gradient was constant at first but started to decrease at a certain stage. The change rate in the mean volume temperature remained low for 5 min and started to increase onwards, maintaining its value until the end of the process. When heated in a steam-air mix, the change rate in the temperature gradient dropped to its minimum in 4–5 min and started to grow. The mean volume temperature demonstrated a high change rate during the first 5 min and went down. The chicken fillet with its low fat content warmed up faster by 13–26% when processed in a steam-air mix and by 9–23% when treated in dry air. The plate-shaped products needed longer heat treatment. The composition and form had no significant effect on the nature of the change in the temperature gradient and mean volume temperature.

The obtained dependencies made it possible to select the optimal temperature and humidity conditions for convective frying of meat products.

Keywords. Meat products, combi oven, heat treatment, thermometric indicators, temperature gradient, average volume temperature, dry air, steam-air mixture, one-dimensional body

For citation: Smagina MN, Smagin DA. Temperature Changes in Meat Products Fried in Steam-Convection Oven. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):156–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2497>

Введение

В процессе переработки мясопродуктов в сырые полуфабрикаты имеет значение разница температур между поверхностными слоями и центром. Интенсивность нагревания внутренних слоев при таких условиях определяется характером распространения теплоты внутри тела, а внешние условия теплообмена приобретают подчиненное значение.

Запеченное мясное изделие состоит из корки (практически сухой материал с температурой выше температуры насыщения водяного пара) и внутреннего тела (влажный материал с температурой меньшей или равной температуре насыщения водяного пара). Корка

является внешней греющей средой для внутреннего влажного тела. Внутреннее влажное тело прогревается послойно, каждый слой становится тепловоспринимающей средой для предыдущего и теплоотдающей для последующего. Верхний влажный (подкорковый) слой получает наибольшее количество теплоты, сравнительно быстро прогревается и становится основным теплопередающим слоем для всего продукта. Каждый следующий слой получает от предыдущего определенное количество теплоты, которое расходуется на нагрев, поддержание температуры рассматриваемого слоя и рост температуры последующего слоя. Для последнего (центрального) слоя характерно отсутствие потерь

теплоты, его температура повышается с большим отставанием от подкоркового. Возникает температурный градиент, направленный от периферии к центру. В реальных условиях из-за невысокой теплопроводности мяса к моменту, когда в центре достигается заданная температура, температура любого другого слоя будет выше, стремясь к температуре насыщения водяного пара в направлении к подкорковому [1–13].

Изменения, вызываемые нагревом, качественно не имеют отличий, хотя различаются количественно. Каждой температуре присуще характерное изменение числа свободных функциональных групп, соответствующее изменению белковых и жировых структур. Степень глубины процессов возрастает с увеличением температуры греющей среды. Развитие коагуляционных и постденатурационных явлений белков, расплав и гидролиз жира сопровождаются изменением теплофизических характеристик и уменьшением водосвязывающей способности биологического материала, повышением потерь влаги, усилением жесткости и др. Данные процессы протекают ступенчато по мере повышения температуры, в результате чего для каждого слоя последствия нагревания различаются. Технологические последствия, вызываемые нагревом, становятся неравномерными по толщине продукта [3–18].

Традиционно термообработка мясных изделий изучается с точки зрения теплофизики процесса или подбора технологических параметров под заданный продукт [1–19]. Однако с производственной точки зрения важно описать характер изменения температуры в общем объеме изделия и температурной разницы в крайних точках, оценить влияние на данные показатели состава фарша, геометрической формы изделия, применяемого теплоносителя и температурного режима в рабочей камере.

Цель исследования – изучение характера изменения среднеобъемной температуры и температурного градиента в мясных изделиях, выполненных в форме одномерных тел и различающихся по нутриентному составу, при термообработке в сухом воздухе и паровоздушной смеси.

Объекты и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на двух образцах измельченного мясного сырья, различных по содержанию влаги и жира [20]:

1) мясо куриного филе без кожи (влажность 74,5 %, содержание жира 1,9 %) – влажный образец с низким содержанием жира (ВОНЖ);

2) мясо лопаточной части свинины (влажность 55,1 %, содержание жира 29,4 %) – маловлажный образец с высоким содержанием жира (МОВЖ).

С ростом температуры теплофизические характеристики мясных фаршей изменяются в зависимости от влажности и содержания жира в исходном сырье [2, 4, 6–13, 17–19]. Выбор исследуемых материалов обусловлен целесообразностью оценки влияния плавления

жира и интенсивности массообмена на термометрические показатели процесса.

При разработке программы экспериментальных исследований принято решение не сужать область проводимых изысканий конкретными изделиями, а использовать формы и размеры, которые могут быть обобщающими для широкой номенклатуры пищевой продукции. Поэтому для исследования выбрали тела, формируемые в виде одномерных тел: цилиндра и пластины. Подобный подход позволяет провести корректный теплотехнический эксперимент. Вариации предложенных форм распространены в производственной практике. На основе полученных результатов можно предлагать решения для тел ограниченных размеров, являющихся частными случаями сочетания безграничных форм.

Для обеспечения постоянства размеров и форм исследуемых образцов, а также прямого контакта поверхности изделия с греющей средой применяли однослойный марлевый мешок, сшитый в виде цилиндра размером 60×320 мм или пластины размером 160×160×32 мм, который закрепили в специальной кассете. Теплофизические расчеты показывают, что подобные тела можно считать одномерными [18].

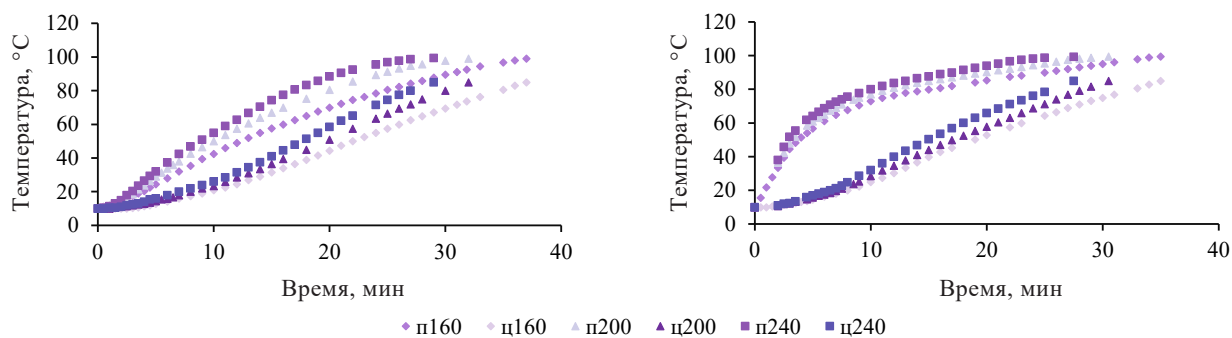
Кассеты представляют собой сварную каркасную конструкцию из металлических стержней сечением 2,5 и 4 мм, выполненные в виде цилиндра или пластины. Внутренние размеры кассеты равны размерам исследуемых форм. Металлические стержни занимают менее 3 % площади предложенных кассет и не оказывают заметного влияния на процесс нагревания заготовки.

При набивании марлевого мешка измельченным мясным сырьем марля натягивалась, размеры ячеек увеличивались и превышали исходные. В получаемом таким образом изделии исследуемый материал контактирует с греющей средой, т. к. ячейки марли крупные по отношению к нитям.

Образцы исследуемых материалов подвергались нагреванию в диапазоне температур 160–240 °С в пароконвекционном аппарате Unox-203G (Италия) до достижения температуры в центре 85 °С. В качестве греющей среды применялся сухой воздух и паровоздушная смесь влажностью 80–85 %. Для измерения температуры подкоркового и центрального слоев применяли комплект термоэлектрических преобразователей ТХА(К)-1199/52/2/1500/0,5, подключенных к измерителю-регулятору Сосна-004, которые закреплялись на устройстве, исключающем сбивание головок. Замеры осуществлялись в центре и в подкорковом слое изделий. Расчетные результирующие среднеквадратичные погрешности определяемых величин не превышают 3 %.

Результаты и их обсуждение

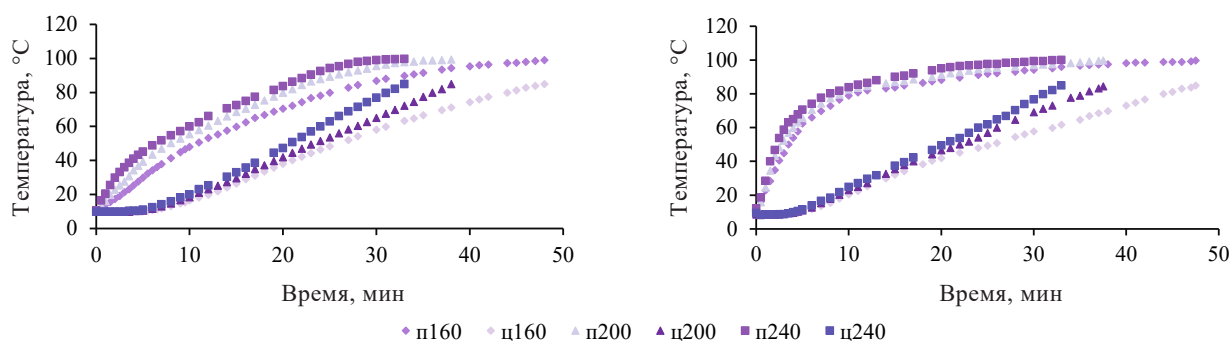
Результаты экспериментальных исследований изображались в виде термограмм изменения абсолютной температуры в исследуемых точках во времени (рис. 1–4).



Примечание: п160, п200, п240 (ц160, ц200, ц240) – температура подкоркового (центрального) слоя образца при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 1. Термограмма для влажного образца с низким содержанием жира в форме цилиндра: а – в воздушной среде; б – в паровоздушной среде

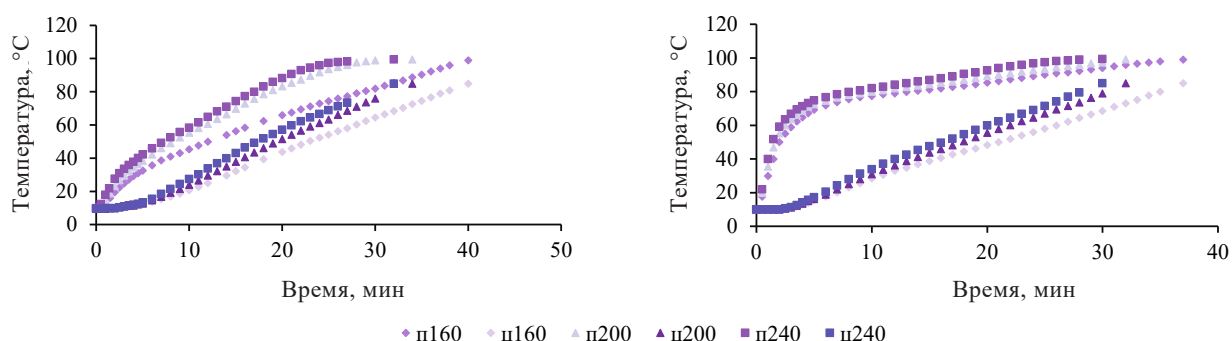
Figure 1. Low-fat wet cylinder sample: a – air treatment; b – steam-air mix: thermogram



Примечание: п160, п200, п240 (ц160, ц200, ц240) – температура подкоркового (центрального) слоя образца при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 2. Термограмма для маловлажного образца с высоким содержанием жира в форме цилиндра: а – в воздушной среде; б – в паровоздушной среде

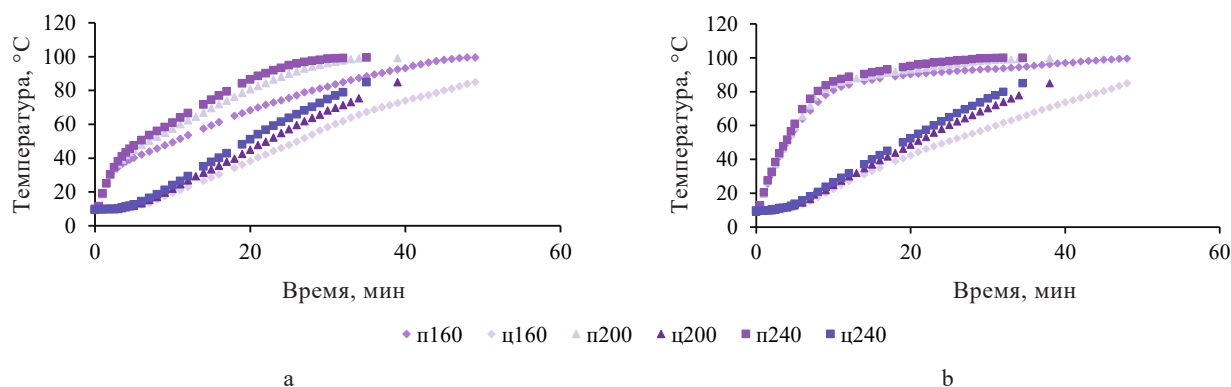
Figure 2. High-fat slightly wet cylinder sample: a – air treatment; b – steam-air mix: thermogram



Примечание: п160, п200, п240 (ц160, ц200, ц240) – температура подкоркового (центрального) слоя образца при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 3. Термограмма для влажного образца с низким содержанием жира в форме пластины: а – в воздушной среде; б – в паровоздушной среде

Figure 3. Low-fat wet plate sample: a – air treatment; b – steam-air mix: thermogram



Примечание: п160, п200, п240 (ц160, ц200, ц240) – температура подкоркового (центрального) слоя образца при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 4. Термограмма для маловлажного образца с высоким содержанием жира в форме пластины:
а – в воздушной среде; б – в паровоздушной среде

Figure 4. High-fat slightly wet plate sample: а – air treatment; б – steam-air mix: thermogram

Для всех исследуемых вариантов форм и фаршей при обработке в паровоздушной смеси термометрические кривые имеют малый разброс значений температурного роста для различных температурных режимов. Данный факт может быть объяснен наличием конденсационных процессов. Температура верхних слоев изделий на начальном этапе нагревания ниже температуры насыщения водяного пара. При помещении изделий в паровоздушную смесь высокой влажности на изделиях образуется конденсатная пленка, которая равномерно увлажняет всю поверхность. Равномерный прогрев поверхности изделий вместе с низкой теплопроводностью материала обеспечивает на начальном этапе обработки практически одинаковую температуру подкоркового слоя для различных температурных режимов нагревания.

При обработке в среде нагретого воздуха термометрические кривые расходятся в зависимости от температуры греющей среды (чем выше температура в рабочей камере, тем интенсивнее прогрев). В данном случае изделия нагреваются с различной скоростью, в зависимости от температуры греющей среды, за счет конвективной теплоотдачи сухого воздуха и при отсутствии конденсационных процессов.

Наряду с эффектом выравнивания температур при обработке в паровоздушной смеси высокой влажности наличие конденсационных процессов в верхних слоях изделий на начальном этапе нагревания обуславливает тепловой поток, который приводит к быстрому прогреву подкоркового слоя. В среде нагретого воздуха прогревание подкоркового слоя протекает менее интенсивно. В форме одномерного цилиндра средняя температура в подкорковом слое 60 °С (температура денатурации белков) достигается при обработке в паровоздушной среде примерно на 5–7 мин, в нагретом воздухе на 10–15 мин. Для маловлажного образца

с высоким содержанием жира (МОВЖ) средняя температура в подкорковом слое 60 °С достигается при обработке в паровоздушной среде на 4–6 мин, в нагретом воздухе на 10–17 мин. При нагревании изделий в форме одномерной пластины средняя температура в подкорковом слое 60 °С достигается для влажного образца с низким содержанием жира (ВОНЖ) при обработке в паровоздушной среде на 3–4 мин, в нагретом воздухе на 10–17 мин, а для МОВЖ на 5–6 и 9–15 мин соответственно.

Для оценки последствий температурных изменений рассчитали среднюю температуру по объему изделия и температурный градиент по крайним точкам для каждого момента времени.

Среднеобъемную температуру $T_{ср}$ определяли как среднеарифметическое для температур подкоркового и центрального слоев. Температурные градиенты $\left(\frac{\partial T}{r}\right)$ по радиусу для цилиндрических изделий и $\left(\frac{\partial T}{h}\right)$ по толщине для изделий в форме пластины определяли как разность температур подкоркового и центрального слоев, отнесенную к расстоянию между ними в сантиметрах.

Графические зависимости изменения температурных градиентов и среднеобъемной температуры во времени представлены на рисунках 5 и 6.

Кривые изменения температурных градиентов при обработке в среде паровоздушной смеси высокой влажности характеризуются большей равномерностью и сходимостью по сравнению с нагреванием в воздухе. Это можно объяснить выравнивающим температурным эффектом при конденсации водяного пара.

Геометрия построения кривых температурных градиентов для паровоздушной смеси позволяет выделить следующие этапы процесса:

1. Рост температурного градиента в течение первых 5–7 мин нагревания;

2. Достижение максимума температурного градиента;
3. Постепенное снижение градиента.

Геометрия построения кривых температурных градиентов для воздуха позволяет выделить следующие этапы процесса:

1. Рост температурного градиента в течение первых 7–10 мин нагревания;
2. Достижение максимума температурного градиента;
3. Сохранение постоянной величины градиента в течение 10–15 мин с некоторыми колебаниями от среднего значения;
4. Постепенное снижение градиента.

Первый этап аналогичен для обоих вариантов и характеризуется быстрым ростом температуры в подкорковом слое при медленном нагревании центра.

Второй этап также аналогичен для обоих вариантов. Однако при обработке в воздушной среде предельные значения градиента колеблются в зависимости от температуры теплоносителя, достигая 15–20 °C. Для процесса нагревания в паровоздушной среде характерны колебания градиента порядка 5–8 °C в зависимости от температуры теплоносителя. Данное наблюдение можно объяснить конденсацией на поверхности изделий на начальном периоде нагревания при обработке в паровоздушной среде, приводящей к примерно оди-

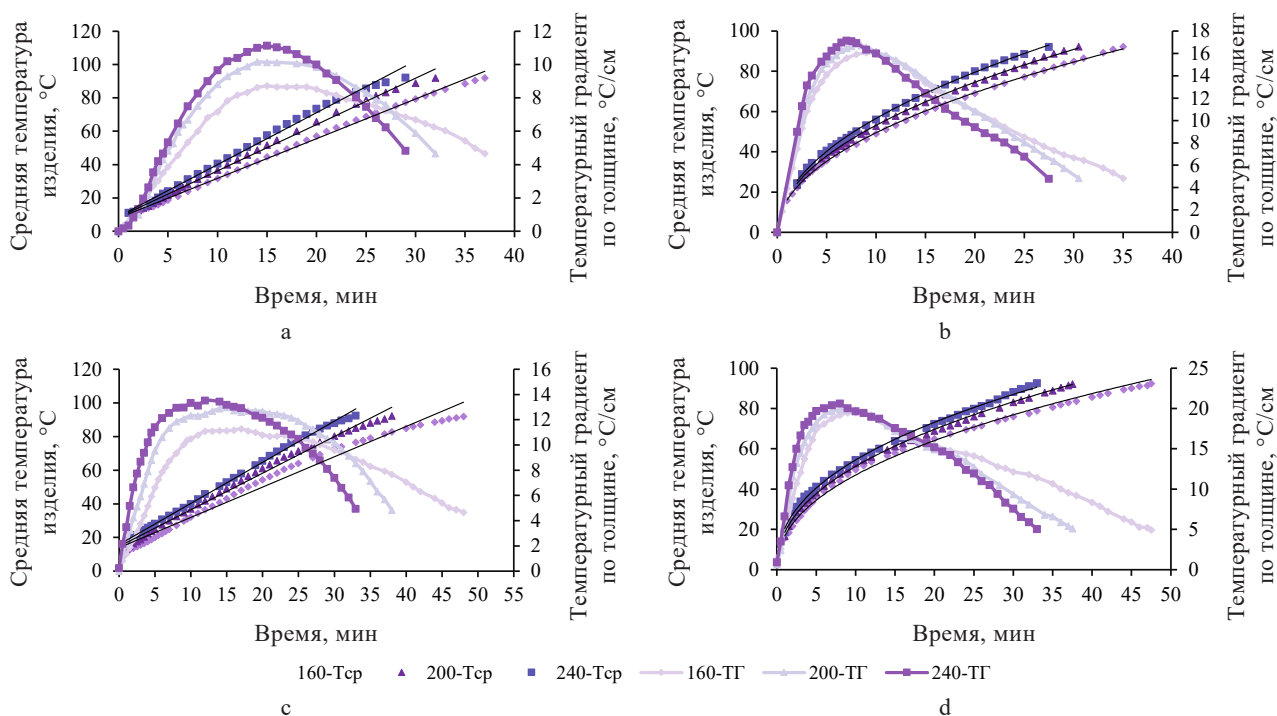
наковым значениям теплового потока на поверхности при разных температурах в рабочей камере. В тех же условиях при нагревании изделий в воздушной среде тепловой поток варьируется в зависимости от температуры процесса.

Этап с постоянным значением температурного градиента при обработке в воздушной среде можно объяснить наличием практически постоянного значения коэффициента теплоотдачи от горячего воздуха постоянной температуры.

При обработке в паровоздушной среде на начальном этапе процесс характеризуется высоким коэффициентом теплоотдачи от конденсирующегося водяного пара, который резко падает после перехода к теплоотдаче в условиях свободной конвекции. В результате после достижения максимального значения температурный градиент не сохраняется, а практически сразу начинает уменьшаться.

Последний этап аналогичен для обоих вариантов греющих сред. Он характеризуется медленным ростом температуры на поверхности в совокупности с ускоряющимся прогревом центра, что приводит к снижению температурного градиента.

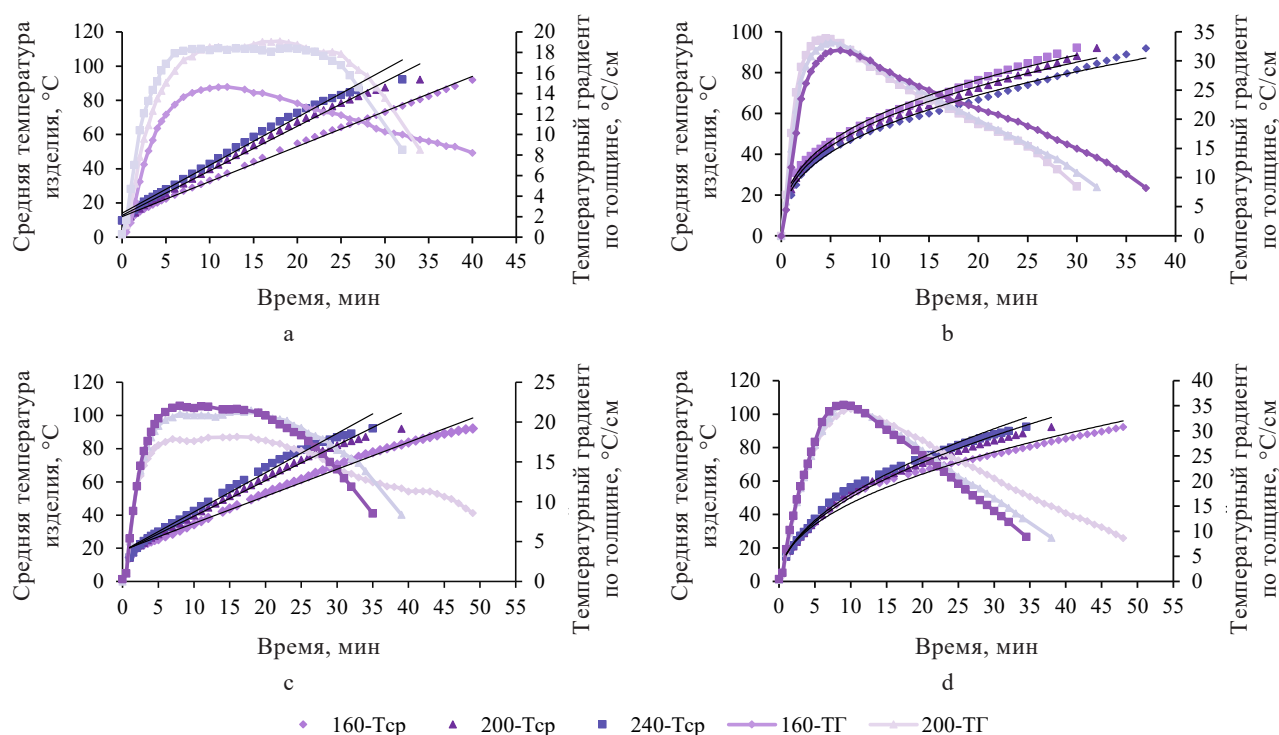
Изменение среднеобъемной температуры для изделий, обрабатываемых в паровоздушной среде, характе-



Примечание: 160-Тср, 200-Тср, 240-Тср (160-ТГ, 200-ТГ, 240-ТГ) – среднеобъемная температура (температурный градиент) при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °C соответственно

Рисунок 5. Изменение температурных градиентов (ТГ) и среднеобъемной температуры (Тср) во времени для цилиндрических изделий: а – ВОНЖ в воздушной среде; б – ВОНЖ в паровоздушной среде; с – МОВЖ в воздушной среде; д – МОВЖ в паровоздушной среде

Figure 5. Changes in temperature gradients and mean volume temperature over time for cylindrical products: а – low-fat wet sample in air; б – low-fat wet sample in a steam-air mix; с – high-fat slightly wet sample in air; д – high-fat slightly wet sample in a steam-air mix



Примечание: 160-Тср, 200-Тср, 240-Тср (160-ТГ, 200-ТГ, 240-ТГ) – среднееобъемная температура (температурный градиент) при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °C соответственно

Рисунок 6. Изменение температурных градиентов и среднееобъемной температуры во времени для изделий в форме пластины: а – ВОНЖ в воздушной среде; б – ВОНЖ в паровоздушной среде; с – МОВЖ в воздушной среде; д – МОВЖ в паровоздушной среде

Figure 6. Changes in temperature gradients and mean volume temperature over time for plate products: а – low-fat wet sample in air; б – low-fat wet sample in a steam-air mix; с – high-fat slightly wet sample in air; д – high-fat slightly wet sample in a steam-air mix

ризуется степенной зависимостью и после второй минуты нагревания с достаточной степенью точности описывается уравнением степенной зависимости $T_{ср} = b\tau^n$. Для изделий, обрабатываемых в воздушной среде, среднееобъемная температура изменяется по линейному закону и после второй минуты нагревания с высокой степенью точности описывается уравнением линейной зависимости $T_{ср} = a + b\tau$. Различия в геометрии кривых среднееобъемной температуры связаны с характером теплообмена: постоянный во времени тепловой поток при обработке в воздушной среде и переменный во времени тепловой поток при обработке в паровоздушной среде.

Значительных различий в изменении исследуемых термометрических показателей для фаршей различного состава не выявлено. Более длительная обработка для МОВЖ обусловлена меньшим коэффициентом температуропроводности и тормозящим эффектом расплава жира.

В изменении термометрических показателей для тел различных канонических форм больших различий не выявлено.

Для анализа процесса нагревания сплошных тел термометрические зависимости целесообразно пред-

ставлять в виде кривых изменения избыточной температуры в полулогарифмических координатах [4, 19]. Избыточная температура представляет собой разность между фиксированной (предельной) температурой и температурными показаниями в толще тела в данный момент времени. В качестве фиксированной температуры принята температура греющей среды в рабочей камере пароконвекционной печи.

На рисунках 7 и 8 представлены графические зависимости $\lg(T - T_{ср})$ и $\lg(T - T_{Г})$ от времени обработки.

Кривые $\lg(T - T_{ср})$ и $\lg(T - T_{Г})$ образуют практически параллельные линии для исследуемых условий нагрева в отношении изучаемых объектов.

Для температурных градиентов при нагревании в воздухе темп изменения сохраняется практически постоянным на всем протяжении нагревания, незначительно снижаясь и затем повышаясь. При нагревании в среде паровоздушной смеси темп изменения температурного градиента начинает резко снижаться сразу после начала нагревания, достигая минимума на 4–5 мин, после чего начинает медленно расти.

Для среднееобъемной температуры при нагревании в воздухе выделяются два участка с различным темпом изменения: в течение первых 5 мин темп невысокий,

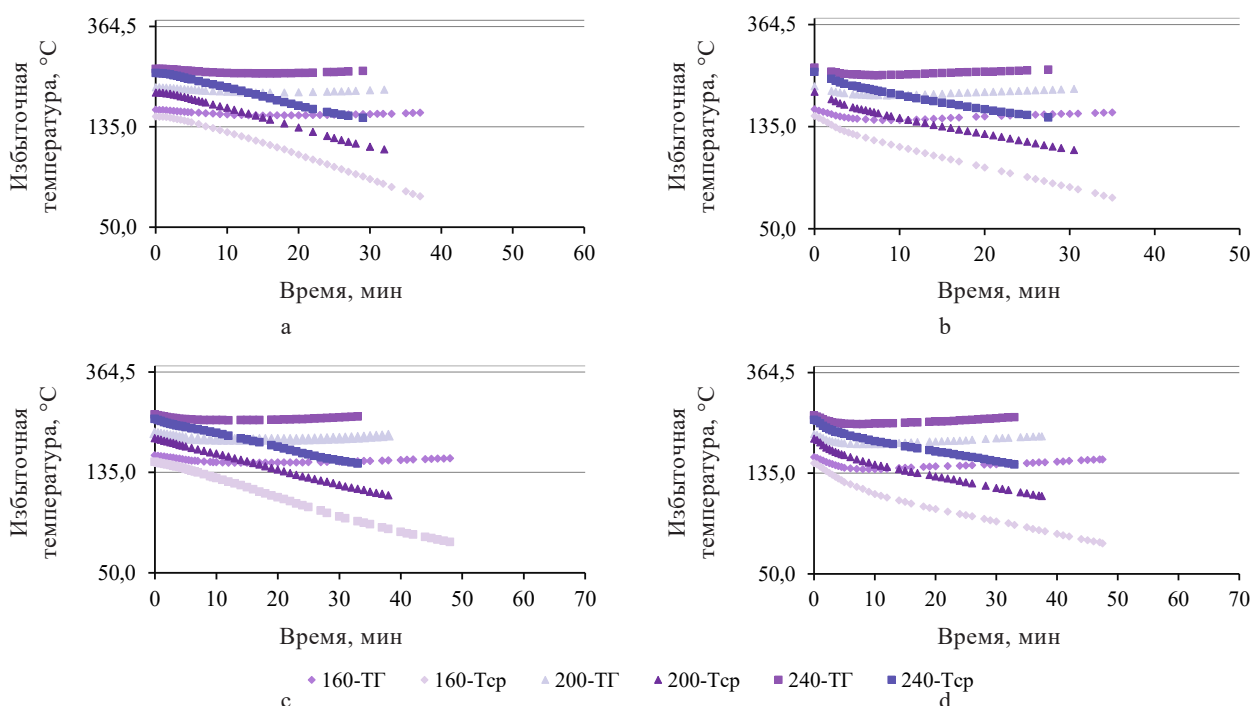
после 5 мин темп повышается, сохраняя новое значение до конца нагревания. При нагревании в среде паровоздушной смеси характерен высокий темп изменения в течение первых 5 мин, после чего он резко снижается, сохраняя новое значение до конца нагревания.

Наблюдаемые отличия протекания процесса нагревания в исследуемых теплообменных средах можно объяснить особенностями теплоподвода к внутреннему влажному телу продукта в течение процесса нагревания. При обработке в среде паровоздушной смеси на начальном этапе при температуре поверхности ниже температуры насыщения водяного пара процесс теплообмена интенсифицируется за счет конденсационных превращений. При обработке в среде нагретого воздуха величина теплового потока на протяжении всего процесса сохраняется практически постоянной. Операции жарки и запекания мясopодуlтов в среде паровоздушной смеси можно классифицировать как процесс термообработки с падающим теплоподводом, а в воздушной среде как процесс термообработки с постоянным теплоподводом.

Анализ графических зависимостей показывает, что после 10 мин нагревания кривые $\lg(T - T_{\text{ср}})$ и $\lg(T - T_{\text{г}})$ для всех исследуемых вариантов выражаются прямыми линиями. Это свидетельствует о наступлении регулярно-го режима теплопроводности по объему продуктов.

Приведенные на рисунках 1–4 графические зависимости показывают, что изделия с низким содержанием жира (куриное филе), по сравнению с маловлажными изделиями высокой жирности (лопаточная часть свинины) одинаковой формы, прогреваются быстрее на 13–26 % при обработке в паровоздушной смеси и на 9–23 % в нагретом воздухе. Применение паровоздушной смеси для жарки изделий из куриного мяса приводит к выраженному сокращению продолжительности термообработки (на 5–8 %), в то время как для изделий из свиного мяса оно незначительно (0–2,5 %). Более высокая продолжительность термообработки для изделий из свинины объясняется более низкой теплопроводностью материала, меньшим содержанием влаги и высоким количеством жира, плавление которого тормозит теплообменные процессы. На характер изменения термометрических показателей, согласно рисункам 5–8, нутриентный состав выраженного влияния не оказывает. Коэффициент температуропроводности изменяется соответственно температурному росту, а тепловые колебания теплофизических характеристик биологического материала являются результатом изменения нативной структуры нутриентов.

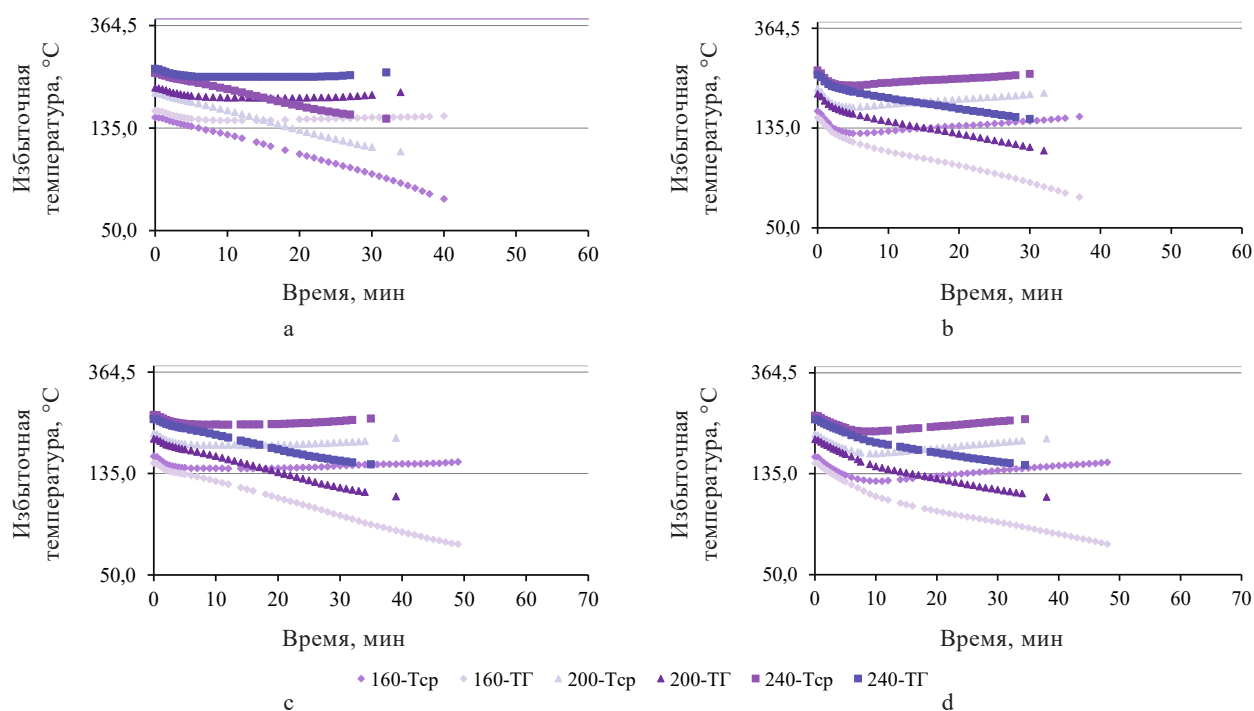
Для изделий в форме пластины характерна более длительная термообработка, обусловленная особенностями нагревания тел соответствующей стереометриче-



Примечание: 160-Тср, 200-Тср, 240-Тср (160-Тг, 200-Тг, 240-Тг) – среднеобъемная температура (температурный градиент) при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 7. Изменение $\lg(T - T_{\text{ср}})$ и $\lg(T - T_{\text{г}})$ во времени для изделий в форме цилиндра: а – ВОНЖ в воздушной среде; б – ВОНЖ в паровоздушной среде; с – МОВЖ в воздушной среде; д – МОВЖ фарш в паровоздушной среде

Figure 7. $\lg(\text{temperature} - \text{mean temperature})$ and $\lg(\text{temperature} - \text{temperature gradient})$ for cylindrical products: а – low-fat wet sample in air; б – low-fat wet sample in a steam-air mix; с – high-fat slightly wet sample in air; д – high-fat slightly wet sample in a steam-air mix



Примечание: 160-Тср, 200-Тср, 240-Тср (160-ТГ, 200-ТГ, 240-ТГ) – среднеобъемная температура (температурный градиент) при температуре греющей среды 160, 200 и 240 °С соответственно

Рисунок 8. Изменение $\lg(T - T_{ср})$ и $\lg(T - TГ)$ во времени для изделий в форме пластин: а – ВОНЖ в воздушной среде; б – ВОНЖ в паровоздушной среде; с – МОВЖ в воздушной среде; д – МОВЖ в паровоздушной среде

Figure 8. $\lg$ (temperature – mean temperature) and $\lg$ (temperature – temperature gradient) for plate products: а – low-fat wet sample in air; б – low-fat wet sample in a steam-air mix; с – high-fat slightly wet sample in air; д – high-fat slightly wet sample in a steam-air mix

ской формы и характером обтекания их конвективными потоками. На характер изменения термометрических показателей процесса стереометрическая форма выраженного влияния не оказывает.

Выводы

Изготовление изделий в виде одномерных тел канонических форм позволяет провести обобщающие исследования, результаты которых распространяются на всю номенклатуру кулинарных изделий, представляющих собой тела ограниченных размеров.

Получили графические зависимости $\left(\frac{\partial T}{r}\right)$ для цилиндрических изделий и $\left(\frac{\partial T}{h}\right)$ для изделий в форме пластины, которые можно использовать для подбора оптимальных режимных параметров жарки мясных изделий в производственных условиях.

Для процесса жарки в паровоздушной среде изменение температурных градиентов (ТГ) имеет следующий характер: рост в течение первых 5–7 мин нагревания; достижение максимума; постепенное снижение. Для процесса жарки в воздушной среде изменение ТГ имеет следующий характер: рост в течение первых 7–10 мин; достижение максимума; сохранение практически постоянной величины в течение 10–15 мин; постепенное снижение. Темп изменения ТГ при нагревании в паровоздушной среде резко снижается после начала нагревания,

достигая минимума на 4–5 мин, после чего начинает медленно расти. Темп изменения ТГ при нагревании в воздушной среде сохраняется практически постоянным на всем протяжении нагревания, незначительно снижаясь и затем повышаясь.

Изделия с низким содержанием жира, по сравнению с маловлажными изделиями высокой жирности одинаковых форм, прогреваются быстрее на 13–26 % при обработке в паровоздушной среде и на 9–23 % в воздушной среде. Применение паровоздушной среды для жарки изделий из куриного мяса приводит к выраженному сокращению продолжительности термообработки (на 5–8 %), в то время как для изделий из свиного мяса оно незначительно (0–2,5 %). Данные наблюдения следует учитывать при разработке новых и оптимизации существующих технологических инструкций и рецептов.

На характер изменения термометрических показателей нутриентный состав и стереометрическая форма выраженного влияния не оказывают. Изменение величины среднеобъемной температуры (Тср) для изделий, обрабатываемых в паровоздушной среде, характеризуется степенной зависимостью, и после второй минуты нагревания оно может быть описано уравнением вида $T_{ср} = br^n$. Для изделий, обрабатываемых в воздушной среде, величина Тср изменяется по линейному закону

и после второй минуты нагревания может быть описана уравнением вида $T_{ср} = a + b\tau$. Кривые $\lg(T - T_{ср})$ и $\lg(T - T_{Г})$ образуют практически параллельные линии для всех исследуемых вариантов и после 10 мин нагревания выражаются прямыми линиями. Это свидетельствует о наступлении регулярного режима теплопроводности по объему продуктов. Полученные зависимости могут быть применены для прогнозирования $T_{ср}$ и $T_{Г}$ мясных рубленых изделий различного нутриентного состава и стереометрических форм при термообработке в пароконвекционных печах при различных температурно-влажностных режимах ведения процесса.

Критерии авторства

М. Н. Смагина: обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), проведение экспериментов, формирование выводов, написание и редактирование текста рукописи,

оформление рукописи. Д. А. Смагин: научное руководство, проведение критического анализа материалов, обобщение результатов исследования, критический пересмотр текста рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

M.N. Smagina developed the research concept and objectives, conducted the experiments, drew conclusions, designed and wrote the draft, and proofread the text. D.A. Smagin supervised the research, analyzed the materials, summarized the results, and revised the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

1. Agafonychev VP, Makhonina VN. Calculation methods in the meat and egg sausages technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;1052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1052/1/012058>
2. Jain A. The role of thermal effusivity in heat exchange between finite-sized bodies. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023;202. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123721>
3. Brazhnikov AM. Theory of heat treatment of meat products. Moscow: Agropromizdat; 1987. 271 p. (In Russ.). [Бражников А. М. Теория термической обработки мясopодуKтов. М.: Агропромиздат, 1987. 271 с.]
4. Glagoleva LE, Zatsopilina NP, Kopylov MV, Nesterenko IV. Calculation of the process duration of thermo-moisture treatment of semi-finished products based on animal and vegetable raw materials. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018;80(2):51–57. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-51-57>
5. Li J, Deng Y, Xu W, Zhao R, Chen T, Wang M, *et al.* Multiscale modeling of food thermal processing for insight, comprehension, and utilization of heat and mass transfer: A state-of-the-art review. Trends in Food Science and Technology. 2023;131:31–45. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.018>
6. Kubo MTK, Baicu A, Erdogdu F, Poças MF, Silva CLM, Simpson R, *et al.* Thermal processing of food: Challenges, innovations and opportunities. A position paper. Food Reviews International. 2021;39(6):3344–3369. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012789>
7. Moya J, Lorente-Bailo S, Salvador ML, Ferrer-Mairal A, Martínez MA, Calvo B, *et al.* Development and validation of a computational model for steak double-sided pan cooking. Journal of Food Engineering. 2021;298. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110498>
8. Nelson H, Deyo S, Granzier-Nakajima S, Puente P, Tully K, Webb J. A mathematical model for meat cooking. The European Physical Journal Plus. 2020;135. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00311-0>
9. Rabeler F, Feyissa AH. Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven. Journal of Food Engineering. 2018;237:60–68. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.021>
10. Rocca-Poliméni R, Zárate Vilet N, Roux S, Bailleul J-L, Broyart B. Continuous measurement of contact heat flux during minced meat grilling. Journal of Food Engineering. 2019;242:163–171. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.032>
11. Skrypnyk VO, Farisieiev AG. Analytical model of heat treatment of meat products with high content of connective tissue in vacuum termoackets. Journal of Chemistry and Technologies. 2019;27(2):201–211. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/081920>
12. Kumari S, Samanta SK. The efficient thermal processing of cylindrical multiphase meat: a study on the selection of microwave heating strategy. International Journal of Food Engineering. 2022;18(6):437–450. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2021-0255>
13. Cheng Y, Wang S, Ju S, Zhou S, Zeng X, Wu Z, *et al.* Heat-treated meat origin tracing and authenticity through a practical multiplex polymerase chain reaction approach. Nutrients. 2022;14(22). <https://doi.org/10.3390/nu14224727>
14. Gurinovich GV, Khrenov VA, Patrakova IS, Patshina MV. Studying an effect of thermal treatment methods on physico-chemical properties of beef depending on aging technology. Food Systems. 2022;5(4):376–382. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-376-382>

15. Kaltovich IV. Rational process parameters of chopped semi-finished products production using emulsions from collagen-containing raw materials. *Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials*. 2020;(14):199–213. (In Russ.). <https://doi.org/10.47612/2220-8755-2019-14-199-213>
16. Tsaregorodtseva EV. Effect of the method of heat treatment on the quality of finished meat products. *Current Issues of Agricultural Production and Processing*. 2021;(23):234–237. (In Russ.). [Царегородцева Е. В. Влияние способа тепловой обработки на качество готовых мясных продуктов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2021. № 23. С. 234–237.]. <https://www.elibrary.ru/IONVNA>
17. Smagina MN, Smagin DA, Smolyak AA. Influence of changes in the thermal characteristics of the material on the heating process of minced meat products. *Food Industry: Science and Technologies*. 2020;13(4):61–69. (In Russ.). [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4\(50\)-61-69](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2020-13-4(50)-61-69)
18. Smagina MN, Smagin DA. Heat exchange in wet capillary-porous bodies of various compositions during convective heating in vapor-air media. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series*. 2023; 68(2):137–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-137-148>
19. Ginzburg AS, Gromov MA, Krasovskaya GI. Thermophysical characteristics of food products. Moscow: Pishchevaya promyshlennost'; 1980. 288 p. (In Russ.). [Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.].
20. Skurikhin IM, Tutel'yan VA. Chemical composition of Russian food products. Moscow: DeLi print; 2002. 235 p. (In Russ.). [Скурихин И. М., Тутельян В. А. Химический состав российских пищевых продуктов. М.: ДеЛи принт, 2002. 235 с.].

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2498>
<https://elibrary.ru/RYTJBV>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Экспресс-диагностика риска банкротства организаций на базе селективно-индикативной модели



С. Г. Черниченко*, Р. М. Котов

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 19.07.2023

Принята после рецензирования: 25.10.2023

Принята к публикации: 07.11.2023

*С. Г. Черниченко: chernichenko66@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-0172-3783>

Р. М. Котов: <https://orcid.org/0000-0003-0238-3466>

© С. Г. Черниченко, Р. М. Котов, 2024



Аннотация.

Конструирование наиболее эффективных моделей диагностики риска банкротства нацелено на предотвращение проблемы финансового кризиса в народно-хозяйственном комплексе России. В статье представлен механизм экспресс-диагностики риска дефолта, ориентированный на раннее распознавание сигнальных признаков, определение «кризисного поля» и предварительную оценку масштабов предкризисного состояния предприятий. В качестве диагностического инструмента предлагается селективно-индикативная модель с регионально-отраслевой спецификацией.

Спецификация предусматривает применение регионально-отраслевого уровня экспонентов модели в качестве их значений-ориентиров. Эмпирический фундамент исследования построен на основе статистических и справочных материалов, а также данных финансовой отчетности сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса.

Исследование включало следующие стадии: выявление индикативных сигналов риска банкротства на основе изучения 22 оригинальных методик прогнозирования финансового кризиса на предмет состава методического инструментария; оценку уровня их практической «популярности»; оценку комплекта выявленных индикативных сигналов риска дефолта на адекватность путем анализа их сопряженности с известными сигнальными критериями финансовой несостоятельности; экономическую интерпретацию и тематическую типизацию индикативных сигналов риска дефолта, фиксацию аналитических векторов-ориентиров; идентификацию индивидуального «долевого присутствия» индикативных сигналов риска банкротства в совокупности; определение и обоснование критических значений экспонентов модели, обеспечение направленности аналитических векторов-ориентиров для максимизации целевой функции; систематизацию и синтез индикативных сигналов в диагностическую модель, разработку градационной шкалы; фиксацию сигнальной аналитической базы; апробацию сформированной модели; формулирование выводов об адекватности модели и возможности ее адаптации в реальном секторе экономики.

Модель, сконструированная на фундаменте индикативных сигналов риска банкротства в контексте их частного «долевого присутствия» в рейтинговом числе, позволит повысить прогностическое качество диагностической процедуры. Практическое применение модели, которая базируется на небольшом числе экспонентов, приведет к повышению скорости антикризисного анализа.

Ключевые слова. Экспресс-диагностика, риск банкротства, индикативный сигнал, директ-индикатор, вектор-ориентир, селективно-индикативная модель, регионально-отраслевая спецификация

Для цитирования: Черниченко С. Г., Котов Р. М. Экспресс-диагностика риска банкротства организаций на базе селективно-индикативной модели // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 167–177. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2498>

Express Diagnostics of Bankruptcy Risks Based on a Selective-Indicative Model



Svetlana G. Chernichenko*^{ID}, Roman M. Kotov^{ID}

Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: 19.07.2023

Revised: 25.10.2023

Accepted: 07.11.2023

*Svetlana G. Chernichenko: chernichenko66@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-0172-3783>

Roman M. Kotov: <https://orcid.org/0000-0003-0238-3466>

© S.G. Chernichenko, R.M. Kotov, 2024



Abstract.

Effective bankruptcy risk diagnostics may prevent a financial crisis in Russia's national economy. The article introduces a novel express tool for bankruptcy diagnostics based on early recognition of alert signs, crisis fields, and preliminary pre-crisis assessment. The tool is a selective-indicative model with regional and industrial specifications.

Regional and industrial exhibitors served as benchmark indicators. The empirical material included statistics, reference materials, and financial reports from agricultural organizations in the period of external economic shocks (2014–2022), Kemerovo region, Russia.

First, the alert signals of bankruptcy risk were identified based on 22 original methods of financial crisis forecasting. After that, they were assessed for practical popularity. The identified default risk signals were linked to the existing criteria of financial insolvency, subjected to economic interpretation, and classified. After fixing the analytical reference vectors, the authors identified the share of each indicator. By determining the latest results of model exponents, they ensured the direction of analytical reference vectors to maximize the disabled function. The next stage involved systematization and synthesis of alert signals into a diagnostic model to be developed into a gradation indicator. After fixing the signal analytical base, the model was tested to formulate conclusions about its adaptability in the current economy.

The resulting model relied on the share of each alert signal of bankruptcy risk in the rating number. It may improve the quality of predictive diagnostics. As the model needs few exponents, it provides a high-speed crisis analysis.

Keywords. Express diagnostics, bankruptcy risk, indicative signal, direct indicator, reference vector, selective-indicative model, regional-industry specification

For citation: Chernichenko SG, Kotov RM. Express Diagnostics of Bankruptcy Risks Based on a Selective-Indicative Model. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):167–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2498>

Введение

В современной макроэкономической ситуации важным вопросом является обеспечение финансовой стабильности функционирования реального предприятия как фундаментального микрокомпонента общеэкономической системы.

Сигнальным атрибутом современного рынка выступает банкротство, т. е. «признанная арбитражным судом неспособность должника в полном объеме удовлетворить требования кредиторов по денежным обязательствам, о выплате выходных пособий и (или) об оплате труда лиц, работающих или работавших по трудовому договору, и (или) исполнить обязанность по уплате обязательных платежей» (ФЗ № 127-ФЗ «О несостоятельности (банкротстве)») [1, 2]. Идентификационным признаком несостоятельности субъекта выступает неспособность удовлетворения требований кредиторов и/или исполнения обязанности по уплате обязатель-

ных платежей в границах трехмесячного периода [2]. В экономической литературе для описания такого рода финансовых ситуаций используются следующие характеристики: финансовая нестабильность, финансовая неустойчивость, финансовый дефолт, финансовый кризис, кризисная (критическая) финансовая ситуация и др. Сочетание событий и условий, которые создают обстановку неопределенности относительно вероятности наступления финансового дефолта, характеризует риск банкротства организации.

Проблемы идентификации предкризисных ситуаций, методологические сложности в прогнозировании финансового дефолта и трудности в конструировании стратегий финансового оздоровления организаций определяют проблематику антикризисного управления (менеджмента, руководства). Антикризисное управление базируется на аналитической и прогностической процедурах. Аналитический процесс как комплекс

результативно-познавательных процедур по детализации качественных и количественных параметров в ретроспективном исследовании финансового положения предприятия в рамках современной парадигмы перспективного анализа нацелен на применение методического прогнозного инструментария для предсказания финансового кризиса на ближайшую перспективу. Предкризисное прогнозирование отражает вероятностное суждение о будущем состоянии экономического субъекта.

В связи с сопряженностью аналитической и прогностической эмпирических баз возникает возможность выдвижения гипотезы об их тождественности. Данное утверждение обусловлено тем, что прогностические конструкции ориентированы на ретроспективную информацию, которая экстраполируется на краткосрочную перспективу.

В современной аналитической практике используется многогранное и многофункциональное понятие диагностики банкротства (антикризисной диагностики) как процедуры обнаружения и фиксации финансовой проблемы, а также определения диагноза предкризисной ситуации. Применение указанного термина отражено в целевой направленности научных исследований. Инструментарий антикризисной диагностики включает современный методический аппарат (математические, аналитические и прогностические конструкции и их базовые экспоненты) и актуальные синтезированные методические технологии (систему научных методов, приемов, авторских методик и методических подходов). В зависимости от целевой направленности и методической основы диагностика банкротства подразделяется на экспресс-диагностику и фундаментальную диагностику потенциального финансового дефолта.

В данной работе представлен механизм экспресс-диагностики риска банкротства, который осуществляется на основе финансовой (бухгалтерской) отчетности организаций и расчета финансовых показателей по алгоритмам их взаимосвязей. Целью данных исследований является распознавание признаков кризисного развития организации, определение «кризисного поля» (проблемных мест) и предварительная оценка масштабов предкризисного состояния.

Ситуация неопределенности во времени осложняется возможной девальвацией и ревальвацией риска банкротства. Это предполагает различный уровень результативности прогнозирования финансового кризиса в зависимости от выбранного аналитического периода. Задача выявления совершенных моделей экспресс-диагностики риска банкротства организаций актуальна, т. к. следствием проведения эффективной аналитико-прогностической процедуры является предотвращение проблемы финансового дефолта в народно-хозяйственном комплексе.

Модель экспресс-диагностики риска банкротства может рассматриваться как формализованное описание аналитико-прогностического процесса, выражен-

ное тематическими соотношениями ключевых параметров. Относительные ключевые показатели антикризисного анализа с высокими прогностическими свойствами можно рассматривать как сигнальные показатели (индикаторы, показатели «лакмусовой бумажки») риска банкротства. Процесс выявления, тематической группировки и синтетического комбинирования указанных экспонентов модели осуществлялся на основе их однокритериальной селекции из заданной совокупности финансовых параметров. В связи с тем, что выявленные ключевые параметры являются главными (генеральными) в конечной совокупности исследуемых показателей с позиции заданного критерия, то мы считаем возможным квалифицировать их как директ-индикаторы (индикаторы, индикативные сигналы) модели. Перечень абсолютных показателей, которые лежат в основе расчета этих параметров, определили в качестве «сигнальной» аналитической базы модели. Рассматривая спецификацию как определение и перечень специфических особенностей субъекта (объекта), предусматриваем отражение в модели регионально-отраслевых и специфических характеристик индикаторов риска банкротства. Таким образом, в рамках данной работы представлена селективно-индикативная модель экспресс-диагностики риска банкротства с регионально-отраслевой спецификацией.

Целью работы являлась корректировка, апробация и адаптация сконструированной ранее селективно-индикативной модели экспресс-диагностики риска банкротства организаций [3].

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступили процессы, которые протекают внутри организаций, и закономерности их функционирования с учетом влияния внешней среды. В качестве предмета исследования рассмотрели процедуру моделирования финансовой ситуации в рамках экспресс-диагностики риска банкротства (на материалах сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса).

Теоретико-методологической основой научного исследования выступили разработки современных экономистов в сфере теории банкротства, антикризисного анализа и теории принятия решений.

Эмпирический фундамент исследования построен на статистических и справочных материалах, а также на аналитических данных финансовой отчетности организаций. Представлен временной отрезок, который характеризует функционирование современных отечественных производителей в обстановке экономических санкций (2014–2022 гг.).

Методологический аппарат исследовательской работы включает такие методы (приемы, способы), как экономико-статистический, абстрактно-логический, коэффициентный, динамический, структурный, трендовый, сравнительный и др.

Результаты и их обсуждение

Сравнительный обзор аналитико-прогностических антикризисных моделей приводит к следующим результатам [4–12]. Во-первых, применяемые оценочные конструкции опираются на историческую эмпирическую базу. Во-вторых, антикризисным моделям характерно многопозиционное дифференцирование (количественные, качественные и комбинированные модели; модели со шкалами вероятности и рейтинговые модели; линейно-вероятностные, логит-модели, пробит-модели и др.) [13]. Несмотря на высокие прогностические свойства количественных диагностических конструкций, большинство из них игнорирует регионально-отраслевую принадлежность и специфику функционирования организаций в конкретных исторических условиях.

В обстановке многообразия прогностических моделей в сфере антикризисной диагностики риска банкротства в практике используются комбинированные диагностические схемы с генерацией «Z-счетов» («R-счетов», «Y-счетов»). Их традиционно именуют «классическими» моделями. Подобные конструкции разрабатываются на материалах выборочной совокупности организаций с заданной регионально-отраслевой принадлежностью в рамках определенного временного отрезка. Это не позволяет адаптировать сформированную прогностическую модель для других условий. По этой причине применяются т. н. нейроаналоги «классических» моделей прогнозирования риска банкротства, которые игнорируют величину коэффициентов регрессии. Нейросетевые модели (а также их программные и аппаратные воплощения) – это система унифицированных простых процессоров, в которой алгоритмическая основа нейронной сети позволяет адаптироваться к ситуации и принимать рациональные управленческие решения. Нейроаналоги «классических» прогнозных конструкций целесообразно применять в качестве гибкого диагностического инструмента в области оценки риска банкротства, основными экспонентами которого выступают коэффициенты связей между процессорами.

Отразили постадийный обзор результатов исследования и скорректировали селективно-индикативную модель экспресс-диагностики риска банкротства организаций с учетом временного фактора [3]. Ситуационная корректировка модели обусловлена уточнением временного отрезка (расширением первоначального аналитического периода (2014–2018 гг.) на 4 года: 2014–2022 гг.). Логическая последовательность действий отражена в таблице 1.

Информация, представленная в таблице 1, требует краткого описания. На первой стадии исследовательской работы изучили 22 известные авторские методики на предмет состава методического инструментария (в совокупности 50 относительных параметров).

На второй стадии выявили индикативные сигналы (директ-индикаторов) риска банкротства на базе мат-

рицы предпочтения с заданным критерием предпочтения – множественность применения параметров в оригинальных моделях. По результатам аналитической работы зафиксировали 6 финансовых коэффициента.

На третьей стадии провели оценку уровня практической популярности (значимости, существенности) финансовых показателей, т. е. оценку «репутационных предпочтений» параметров, которая осуществлялась посредством удельного соотношения числа моделей, в которых используется данный экспонент в качестве структурного элемента расчетного алгоритма, и общего количества исследованных моделей (22).

На четвертой стадии провели оценку комплекта выявленных индикативных сигналов риска банкротства на адекватность посредством анализа сопряженности экспонентов модели с известными сигнальными критериями банкротства. Результаты анализа позволили сделать вывод о корреляции директ-индикаторов и сигнальных критериев банкротства.

На пятой стадии осуществили экономическую интерпретацию и тематическую типизацию индикативных сигналов риска банкротства, которые отражают фиксацию четырех аналитических векторов-ориентиров в рамках диагностики риска банкротства: ликвидность баланса (k_1); структура имущества и капитала (k_3 и k_4); обеспечение ресурсами (k_5); эффективность управления (k_2 и k_6).

На шестой стадии провели идентификацию частного «долевого присутствия» индикативных сигналов риска банкротства в совокупности с использованием метода вертикального (структурного) анализа, где в качестве совокупности элементов выступает сумма уровней популярности индикаторов (154,54 %). Индивидуальное «долевое присутствие» индикативных сигналов модели взвешено в следующих удельных величинах, %: $k_1 = 29,410$; $k_2 = 17,646$; $k_3 = 14,708$; $k_4 = 14,708$; $k_5 = 11,764$; $k_6 = 11,764$. Уровни «долевого присутствия» директ-индикаторов в формате коэффициентов используются в качестве базовых мультипликаторов (коэффициентов) в уравнении рейтинговой экспресс-диагностики риска банкротства, характеризуя их степень значимости и ценности в заданной совокупности индикативных сигналов.

Седьмая стадия включает процессы определения и обоснования критических (пороговых) значений экспонентов модели, а также обеспечения однозначной направленности аналитических векторов-ориентиров. Критические значения директ-индикаторов риска банкротства дифференцированы по двум уровням. Первый – это классический (традиционный, каноничный) уровень, который отражает теоретически обоснованные и канонизированные в мировой ($k_1 \geq 2,0$; $k_3 < 0,5$; $k_5 \geq 0,1$) или национальной ($k_4 \geq 0,5$) аналитических процедурах нормативные габариты параметров. Второй – это объективный регионально-отраслевой уровень среднегодовых «значений-ориентиров» для коэффициентов k_2 и k_6 , который предусматривает

Таблица 1. Постадийный обзор результатов исследовательской работы

Table 1. Stage-by-stage overview of research results

№	Стадия исследовательской работы	Краткое содержание
1	Сравнительный анализ авторских методик прогнозирования риска банкротства по признаку структурного устройства методического аппарата (инструментария)	Исследовали 22 методики (модели): классические, адаптированные, оригинальные
2	Выявление директ-индикаторов (индикативных сигналов, индикаторов) риска банкротства в рамках изученных моделей	Конечное множество исследованных финансовых параметров – 50; аналитический инструмент – матрица предпочтения; критерий предпочтения – множественность (частота, активность) применения параметров в оригинальных моделях; фиксация шести финансовых коэффициентов в качестве директ-индикаторов риска банкротства
3	Оценка уровня практической популярности (значимости, существенности) индикативных сигналов риска банкротства	Уровень практической популярности индикативных сигналов, %: коэффициент текущей ликвидности (k_1) – 45,45; коэффициент деловой активности (k_2) – 27,27; коэффициент финансовой зависимости (k_3) – 22,73; коэффициент мобильности активов (k_4) – 22,73; коэффициент обеспеченности оборотного капитала собственными оборотными средствами (k_5) – 18,18; показатель экономической рентабельности (убыточности) (k_6) – 18,18
4	Оценка набора выявленных индикативных сигналов риска банкротства на адекватность посредством оценки сопряженности экспонентов с известными сигнальными критериями (признаками) банкротства	Сопряженность экспоненты k_1 с сигнальным критерием недостаточного и/или снижающегося в динамике уровня ликвидности баланса и факторов ликвидности; сопряженность экспоненты k_2 с сигнальным критерием асинхронности денежных потоков; сопряженность экспоненты k_3 с сигнальным критерием дисбаланса (разбалансированности) стоимости имущества и обязательств; сопряженность экспоненты k_4 с сигнальным критерием снижения скорости оборачиваемости оборотных активов; сопряженность экспоненты k_5 с сигнальным критерием нерациональной структуры имущества (активов) и источников его финансирования (пассивов); сопряженность экспоненты k_6 с сигнальным критерием отрицательного финансового результата
5	Экономическая интерпретация и тематическая типизация индикативных сигналов риска банкротства (фиксация аналитических векторов-ориентиров)	Вектор-ориентир 1: ликвидность баланса (k_1); вектор-ориентир 2: структура имущества и капитала (k_3 и k_4); вектор-ориентир 3: обеспечение ресурсами (k_5); вектор-ориентир 4: эффективность управления (k_2 и k_6)
6	Идентификация частного «долевого присутствия» индикативных сигналов риска банкротства в совокупности (154,54 %)	Частное «долевое присутствие» индикативных сигналов риска банкротства в модели, %: $k_1 = 29,410$; $k_2 = 17,646$; $k_3 = 14,708$; $k_4 = 14,708$; $k_5 = 11,764$; $k_6 = 11,764$
7	Определение и обоснование критических (пороговых) значений директ-индикаторов. Обеспечение однозначной направленности аналитических векторов-ориентиров (корректировка набора экспонентов)	Фиксация критических значений директ-индикаторов: 1. Классические нормативные значения: $k_1 \geq 2,0$; $k_3 < 0,5$; $k_4 \geq 0,5$; $k_5 \geq 0,1$; 2. Регионально-отраслевая спецификация индикативных сигналов модели: $k_2 \geq 0,484$; $k_6 \geq 0,069$; Замена коэффициента финансовой зависимости на полярный коэффициент финансовой независимости с целью обеспечения однозначной направленности аналитических векторов: $k_3 > 0,5$
8	Систематизация индикативных сигналов и их синтез в диагностическую конструкцию. Разработка градационной шкалы	$R = 0,29410 \times k_1 + 0,17646 \times k_2 + 0,14708 \times k_3 + 0,14708 \times k_4 + 0,11764 \times k_5 + 0,11764 \times k_6$ Пороговое значение рейтингового числа: $R = 0,29410 \times 2 + 0,17646 \times 0,484 + 0,14708 \times 0,5 + 0,14708 \times 0,5 + 0,11764 \times 0,1 + 0,11764 \times 0,069 = 0,838$ Градационная шкала: если $R < 0,838$, то повышенный риск банкротства; если $R \geq 0,838$, то низкий риск банкротства
9	Выявление и фиксация сигнальной аналитической базы	Внеоборотные активы, оборотные активы, совокупные активы, собственный капитал, текущие обязательства, выручка, чистая прибыль
10	Апробация диагностической модели	Отбор сельскохозяйственных предприятий Кемеровской области – Кузбасса, участвующих в эксперименте, осуществлялся методом простой случайной выборки (метода непредвзятой выборки с одинаковой вероятностью выборки для любого элемента совокупности)

Составлено авторами самостоятельно.

The table was compiled by the authors.

заданную спецификацию диагностической модели. «Значения-ориентиры» показателей не отражают нормативного уровня, к достижению которого необходимо стремиться, а демонстрируют среднюю фактическую регионально-отраслевую величину показателя, не достигая которой организация попадает в «зону несоответствия» заданным требованиям в конкретно-историческом периоде (табл. 2).

Динамика коэффициента деловой активности организаций на рынке (k_2) отражает изменение показателя в течение анализируемого периода. Отмечена общая тенденция снижения показателя с 0,510 оборота в 2014 г. до 0,504 оборота в 2022 г. Продолжительность одного оборота активов баланса виртуального сельскохозяйственного предприятия региона выросла на 8 дней, что негативно характеризует движение показателя во времени. Основные точки роста показателя отслеживаются в 2016 и 2021 гг. (0,560 и 0,512 оборота соответственно при продолжительности одного оборота в 652 и 713 дней). Точка провала показателя наблюдается в 2018 г. (0,420 оборота в году при продолжительности одного оборота в 869 дней). Среднегодовое значение коэффициента деловой активности за девять лет составило 0,484 оборота (т. е. средний период оборачиваемости активов 754 дня).

Показатель прибыльности (убыточности) функционирования организаций (k_4), рассчитанный как соотношение чистой прибыли и совокупных активов, в условиях «рваного тренда» демонстрирует общую тенденцию роста. Таким образом, деятельность крупных и средних сельскохозяйственных предприятий Кемеровской области – Кузбасса была безубыточной. Основные точки роста показателя приходятся на 2018 и 2022 гг. (0,080 и 0,081 соответственно). Точки провала параметра отслеживаются в начале расчетного периода – в 2014 и 2017 гг. (0,052 и 0,061 соответственно). Среднегодовой уровень коэффициента фиксируется в точке 6,9 % (или 0,069 ед.).

Экономическая интерпретация критических значений индикаторов модели демонстрирует заданные

вектора максимизации большинства параметров и противоположное стремление к минимуму коэффициента k_3 . Проблема разнонаправленности векторов может быть решена посредством равноценной замены указанного параметра полярным коэффициентом с соответствующей нормативной границей (коэффициент финансовой независимости (автономии), норма $> 0,5$). В этом случае экспоненты модели устремятся к максимизации целевой функции. Обзор и экспликация индивидуальных характеристик директ-индикаторов модели в итоговой комбинации представлены в таблице 3.

На восьмой стадии осуществили систематизацию и синтез индикативных сигналов в диагностическую модель, ориентированную на индивидуальное «долевое присутствие» индикаторов в совокупности (в формате коэффициентов). Уравнение рейтинговой экспресс-диагностики риска банкротства (R , рейтинговое число) организаций принимает следующий вид: $R = 0,29410 \times k_1 + 0,17646 \times k_2 + 0,14708 \times k_3 + 0,14708 \times k_4 + 0,11764 \times k_5 + 0,11764 \times k_6$. Таким образом, мультипликаторы (коэффициенты) « долевого присутствия » индикативных сигналов в совокупности взвешивают ценность и весомость этих индикаторов в экспресс-диагностической конструкции. С целью разработки градационной шкалы, ориентируясь на критические значения параметров, рассчитали пороговое (критическое, предельное) значение заданной функции: $R = 0,29410 \times 2 + 0,17646 \times 0,484 + 0,14708 \times 0,5 + 0,14708 \times 0,5 + 0,11764 \times 0,1 + 0,11764 \times 0,069 = 0,838$. Следовательно, градационная шкала может быть представлена в следующем виде: если $R < 0,838$, то возникает повышенный риск банкротства (более 50 %) в краткосрочной перспективе; если $R \geq 0,838$, то отмечается низкий уровень риска банкротства (менее 50 %) организации.

Девятая стадия работы посвящена выявлению и фиксации сигнальной аналитической базы в рамках экспонентов модели. Перечень абсолютных показателей – компонентов индикативных сигналов модели – включает 7 пунктов: внеоборотные активы, оборотные активы, совокупные активы (валюта баланса), собственный

Таблица 2. Определение специфического (регионально-отраслевого) уровня критических значений отдельных директ-индикаторов риска банкротства

Table 2. Specific (regional, industrial) level of critical values of individual direct indicators of bankruptcy risk

Директ-индикатор риска банкротства	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Среднее значение
Коэффициент деловой активности (k_2), оборотов (дней)	0,510 (716)	0,441 (830)	0,560 (652)	0,452 (811)	0,420 (869)	0,471 (775)	0,493 (740)	0,512 (713)	0,504 (724)	0,484 (754)
Показатель экономической рентабельности (убыточности) (k_6), ед.	0,052	0,066	0,064	0,061	0,080	0,074	0,076	0,073	0,081	0,069

Составлено по [14–16].

The table features the data published in [14–16].

Таблица 3. Описание индикативных сигналов (директ-индикаторов) риска банкротства

Table 3. Alert signals (direct indicators) of bankruptcy risks

Аналитический вектор	Сигнальный критерий банкротства	Директ-индикаторы (индикативный сигнал) риска банкротства	Алгоритм расчета	Доля, %	Критическое значение, ед.
Ликвидность баланса	Недостаточный и/или снижающийся во времени уровень ликвидности баланса и факторов ликвидности	Коэффициент текущей ликвидности (k_1), ед.	$\frac{\text{Оборотный капитал}}{\text{Краткосрочные обязательства}}$	29,410	$\geq 2,0$
Эффективность управления	Отрицательный финансовый результат	Показатель экономической рентабельности (убыточности) (k_6), ед.	$\frac{\text{Чистая прибыль (убыток)}}{\text{Валюта баланса}}$	11,764	$\geq 0,069$
	Асинхронность денежных потоков	Коэффициент деловой активности (k_2), оборотов	$\frac{\text{Выручка}}{\text{Валюта баланса}}$	17,646	$\geq 0,484$
Обеспечение ресурсами	Нерациональная структура имущества (активов) и источников его финансирования (пассивов)	Коэффициент обеспеченности оборотного капитала собственными оборотными средствами (k_5), ед.	$\frac{\text{Собственный капитал} - \text{Внеоборотные активы}}{\text{Оборотный капитал}}$	11,764	$\geq 0,1$
Структура имущества и капитала	Дисбаланс стоимости имущества и обязательств	Коэффициент финансовой независимости (k_3), ед.	$\frac{\text{Собственный капитал}}{\text{Валюта баланса}}$	14,708	$> 0,5$
	Замедление оборачиваемости оборотного капитала	Коэффициент мобильности активов (k_4), ед.	$\frac{\text{Оборотный капитал}}{\text{Валюта баланса}}$	14,708	$\geq 0,5$

Составлено по [3].

The table features the data published in [3].

капитал, текущие (краткосрочные) обязательства, выручка и чистая прибыль. Таким образом, указанные параметры рассматриваются как сигнальная аналитическая база модели и как факторы предпочтительного роста (снижения) в зависимости от своей роли в расчетном алгоритме.

Десятая стадия предусматривает апробацию сформированной модели. Определение сельскохозяйственных предприятий Кемеровской области – Кузбасса, участвующих в эксперименте, осуществлялось на базе метода простой случайной выборки (метода непредвзятой выборки с одинаковой вероятностью отбора для любого элемента совокупности). В процессе оценки адекватности модели мы не ставили цели обеспечить

определенный уровень выборки субъектов для экспресс-диагностической работы. Для апробации модели изучили информационную базу шести сельскохозяйственных организаций (по 2 организации Новокузнецкого (Н), Промышленновского (П) и Кемеровского (К) районов) [17–19]. Коэффициенты рассчитали на две последние даты, чего требует условие оценки динамики параметров модели и рейтингового числа (табл. 4).

Результаты анализа, представленные в таблице 4, свидетельствуют о сопоставимости объема выявленных проблемных мест в функционировании предприятий и уровнем риска банкротства. Все показатели Предприятия 1 (Н), за исключением коэффициента k_2 в 2022 г., не соответствуют заданным критическим

Таблица 4. Апробация селективно-индикативной модели экспресс-диагностики риска банкротства с учетом регионально-отраслевой спецификации

Table 4. Selective-indicative model for express diagnosis of bankruptcy risks based on regional and industrial specifications

Индикатор	Критическое значение индикатора, ед.	«Долевое присутствие» индикатора, %	2021 г.	2022 г.	Тренд
Предприятие 1 (Н) – свиноводство					
k1	≥ 2,0	29,410	1,496	0,974	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,453	0,557	↑
k3	> 0,5	14,708	0,101	0,037	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,390	0,379	↓
k5	≥ 0,1	11,764	–1,297	–1,534	↓
k6	≥ 0,069	11,764	–0,030	–0,062	↓
R	0,838	100,000	0,434	–0,793	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	
Предприятие 2 (Н) – мясное птицеводство					
k1	≥ 2,0	29,410	1,994	3,283	↑
k2	≥ 0,484	17,646	1,276	1,100	↓
k3	> 0,5	14,708	0,693	0,605	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,604	0,480	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,492	0,179	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,071	0,056	↓
R	0,838	100,000	1,065	1,344	↑
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	
Предприятие 3 (П) – зерно-молочная специализация					
k1	≥ 2,0	29,410	3,139	22,016	↑
k2	≥ 0,484	17,646	0,836	0,978	↑
k3	> 0,5	14,708	0,348	0,353	↑
k4	≥ 0,5	14,708	0,413	0,651	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–0,574	0,007	↑
k6	≥ 0,069	11,764	0,033	0,011	↓
R	0,838	100,000	1,117	6,793	↑
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	
Предприятие 4 (П) – зерно-молочная специализация					
k1	≥ 2,0	29,410	1,006	0,954	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,381	0,371	↓
k3	> 0,5	14,708	0,193	0,186	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,360	0,366	↑
k5	≥ 0,1	11,764	–1,202	–1,216	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,067	0,009	↓
R	0,838	100,000	0,308	0,212	↓
Уровень риска банкротства			более 50 %	более 50 %	
Предприятие 5 (К) – зерно-молочная специализация					
k1	≥ 2,0	29,410	4,012	2,940	↓
k2	≥ 0,484	17,646	0,739	0,682	↓
k3	> 0,5	14,708	0,771	0,759	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,517	0,504	↓
k5	≥ 0,1	11,764	0,558	0,522	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,118	0,105	↓
R	0,838	100,000	1,576	1,242	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	
Предприятие 6 (К) – птицеводство					
k1	≥ 2,0	29,410	2,439	1,975	↓
k2	≥ 0,484	17,646	5,163	3,248	↓
k3	> 0,5	14,708	0,643	0,539	↓
k4	≥ 0,5	14,708	0,869	0,909	↑
k5	≥ 0,1	11,764	0,590	0,493	↓
k6	≥ 0,069	11,764	0,121	0,093	↓
R	0,838	100,000	1,932	1,432	↓
Уровень риска банкротства			менее 50 %	менее 50 %	

Составлено авторами самостоятельно. The table was compiled by the authors.

значениям и имеют негативную динамику. Отслеживаются проблемы во всех аналитических векторах-ориентирах: ненормативный и снижающийся в динамике уровень ликвидности баланса ($k1$ равен 1,496 в 2021 г. и 0,974 в 2022 гг.); повышающаяся недостаточность собственного капитала ($k3$ равен 0,101 и 0,037); низкий уровень мобильности активов ($k4$ равен 0,390 и 0,379); отрицательная величина собственного оборотного капитала и необеспеченность оборотных активов указанным источником финансирования ($k5$ равен –1,297 и –1,534); растущий в динамике уровень убыточности ($k6$ равен –0,030 и –0,062) деятельности экономического субъекта. Оборачиваемость активов баланса организации ($k2$) приближается к заданному уровню в 2021 г. ($k2 = 0,453$) и достигает его в 2022 г. ($k2 = 0,557$). Первичной финансовой проблемой выступило 2,6-кратное увеличение массивов убытков в деятельности Предприятия 1 (Н). Следствием этого стало сокращение собственного капитала в 2022 г. В результате произошел рост отрицательной величины собственного оборотного капитала (в условиях экспансии внеоборотных активов). Указанные выше проблемы трансформировались в предкризисную ситуацию. В деятельности Предприятия 1 (Н) прослеживается ревальвация повышенного уровня риска банкротства, т. к. $R < 0,838$ (R равен 0,484 в 2021 г. и –0,793 в 2022 г.).

Проблемы Предприятия 2 (Н) связаны с ненормативным уровнем ликвидности баланса организации в 2021 г. ($k1 = 1,994$), низкой степенью мобильности оборотных активов в 2022 г. ($k4 = 0,480$) и недостаточностью уровня экономической рентабельности в 2022 г. ($k6 = 0,056$). Однако следует отметить прибыльный характер функционирования организации и достаточность собственного капитала как фактора, снижающего уровень чувствительности субъекта к финансовым рискам. Таким образом, у Предприятия 2 (Н) отмечается девальвация низкого уровня риска банкротства: $R > 0,838$ (R равен 1,065 в 2021 г. и 1,344 в 2022 г.).

Индикативные сигналы риска банкротства Предприятия 3 (П) отражают проблемы по большинству аналитических векторов-ориентиров: структура имущества и капитала ($k3$ равен 0,348 в 2021 г. и 0,353 в 2022 г.); обеспечение ресурсами ($k5$ равен –0,574 и 0,007); эффективность управления ($k6$ равен 0,033 и 0,011). Однако сверхнормативный уровень коэффициента текущей ликвидности ($k1$ равен 3,139 и 22,016), который имеет максимальное «долевое присутствие» в рейтинговом числе, нивелирует указанные проблемы. Но это скорее исключение, чем закономерное влияние параметра на результат, т. к. такой уровень коэффициента текущей ликвидности встречается в деятельности предприятий редко. В данном случае он объясняется несопоставимыми с величиной оборотного капитала суммами краткосрочных обязательств. В деятельности Предприятия 3 (П) прослеживается девальвация низкого уровня риска банкротства, т. к. $R > 0,838$ (R равен 1,117 в 2021 г. и 6,793 в 2022 г.).

Все параметры Предприятия 4 (П) не соответствуют заданным критическим значениям и имеют негативную динамику (за исключением коэффициента $k4$). Отмечены «кризисные поля» во всех аналитических векторах-ориентирах: ненормативная и снижающаяся в динамике степень ликвидности баланса ($k1$ равен 1,006 в 2021 г. и 0,954 в 2022 г.); недостаточный и снижающийся уровень оборачиваемости активов баланса ($k2$ равен 0,381 и 0,371); увеличивающаяся в динамике нехватка собственного капитала ($k3$ равен 0,193 и 0,186); низкий уровень мобильности оборотных активов ($k4$ равен 0,360 и 0,366); отрицательная величина собственного оборотного капитала и необеспеченность оборотных активов данным источником финансирования ($k5$ равен –1,202 и –1,216); снижающийся ненормативный уровень рентабельности ($k6$ равен 0,067 и 0,009) деятельности хозяйствующего субъекта. Основные проблемные места в функционировании предприятия обусловлены недостаточностью собственного капитала, нерациональной структурой активов и большими массивами текущих обязательств. Таким образом, в деятельности Предприятия 4 (П) прослеживается ревальвация повышенного уровня риска банкротства, т. к. $R < 0,838$ (R равен 0,308 в 2021 г. и 0,212 в 2022 г.).

Предприятия 5 (К) и 6 (К) получили похожие характеристики в процессе экспресс-диагностической работы: нормативные значения индикативных сигналов риска банкротства (кроме показателя $k1$ Предприятия 6 (К) в 2022 г.), их снижение в динамике (за исключением коэффициента $k4$ по материалам Предприятия 6 (К)) и низкий уровень риска банкротства.

Каких-либо противоречий в результатах расчетов не выявлено. Следовательно, адекватность сформированной модели не подвергается сомнению.

Однако в ходе анализа реальных значений ключевых параметров модели отметили размеры коэффициента деловой активности предприятий с птицеводческой специализацией, превышающие критическое значение ($k2$ равен 1,276 оборота в 2021 г. и 1,100 оборота в 2022 г. в рамках деятельности Предприятия 2 (Н); $k2$ равен 5,163 и 3,248 оборота в функционировании Предприятия 6 (К)). Это приводит к мысли о необходимости специфической дифференциации критических значений-ориентиров директ-индикаторов модели не только с позиции регионально-отраслевой принадлежности организаций, но и с точки зрения их производственной специализации. Кроме того, мы планируем посвятить будущие научные исследования расширению выборочной совокупности хозяйствующих субъектов для адаптации модели и разработке практических рекомендаций по финансовому оздоровлению сельскохозяйственных предприятий региона.

Выводы

На основе сравнительного анализа авторских методик прогнозирования банкротства оформили и апробировали специфическую модель экспресс-диагностики

риска банкротства организаций, которая привела к адекватным результатам анализа с позиции их соответствия реальному положению предприятий на рынке. Несмотря на то что указанная модель ориентирована на деятельность сельскохозяйственных организаций Кемеровской области – Кузбасса, мы считаем, что данная диагностическая конструкция легко адаптируется к применению для экономических субъектов с любой регионально-отраслевой принадлежностью при условии переоценки критических значений экспонентов k_2 и k_6 . В связи с тем, что «классические» модели разрабатываются на основе метода корреляционно-регрессионного анализа, материалах выборочной совокупности организаций с заданной регионально-отраслевой принадлежностью и в рамках определенного временного отрезка, возникают сложности с адаптацией действующих конструкций для прочих условий. Нейроаналоги «классических» моделей не принимают во внимание значение коэффициентов регрессии, которые привязаны к заданным условиям (регион, отрасль, временной отрезок, объем и тип выборки и т. п.), поэтому представляются более гибкими и ситуационно адаптируемыми.

Модель, сконструированную на фундаменте частного «долевого присутствия» индикативных сигналов в рейтинге, можно использовать в качестве эластичного методического инструмента экспресс-диагностики риска банкротства в народнохозяйственном комплексе России. В связи с тем, что рейтинговая оценка риска банкротства основана на 6 директ-индикаторах, которые

опираются на соотношения 7 абсолютных показателей финансовой отчетности, практическое применение модели приведет к повышению скорости антикризисного анализа. Следствием базирования модели на ключевых параметрах антикризисного анализа выступит повышение прогностического качества диагностической процедуры в области риска банкротства хозяйствующих субъектов.

Критерии авторства

Сбор, обработка, анализ и обобщение материалов исследований – С. Г. Черниченко (50 %). Консультирование, определение основных этапов работы, общие выводы по результатам исследования – Р. М. Котов (50 %).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.G. Chernichenko collected, processed, analyzed, and generalized the research materials (50%). R.M. Kotov provided scientific counselling, designed the research, and drew conclusions (50%).

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Abdullayeva PR, Bandurina NV, Voronina YuM. Bankruptcy legislation: Continuity and innovations. Moscow: Yustitsinform, 2023. 348 p. (In Russ.). [Абдуллаева П. Р., Бандурина Н. В., Воронина Ю. М. Законодательство о банкротстве: преемственность и новации. М.: Юстицинформ, 2023. 348 с.].
2. Civil Code of the Russian Federation [Internet]. [cited 2023 Jun 15]. Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142
3. Chernichenko SG, Kotov RM. Methodological tools for diagnosing insolvency (bankruptcy) of organizations in the anti-crisis management system. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(4):588–601. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-588-601>
4. Gorbatskov SA, Farkhieva SA, Beloliptsev II. Neural network and fuzzy modeling methods for diagnosing and predicting corporate bankruptcies. Moscow: Prometey; 2018. 371 p. (In Russ.). [Горбатков С. А., Фархиева С. А., Белолипец И. И. Нейросетевые и нечеткие методы моделирования диагностики и прогнозирования банкротств корпораций. М.: Прометей, 2018. 371 с.]. <https://elibrary.ru/XQVBDX>
5. Zhdanov VYu. Diagnosing bankruptcy risks. Moscow: Prospekt; 2022. 159 p. (In Russ.). [Жданов В. Ю. Диагностика риска банкротства. М.: Проспект, 2022. 159 с.].
6. Kazakov AV, Kolyshkin AV. The development of bankruptcy prediction models in modern Russian economy. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*. 2018;34(2):241–266. (In Russ.). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2018.203>
7. Mizanbekova SK, Bogomolova IP, Shatohina NM. Prospects for digital and innovative technologies in management competitiveness of enterprises. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(2):372–382. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-372-382>
8. Ryakhovskaya AN. Bankruptcy and financial recovery of economic entities. Moscow: Yurayt; 2024. 153 p. (In Russ.). [Ряховская А. Н. Банкротство и финансовое оздоровление субъектов. М.: Юрайт, 2024. 153 с.].
9. Fedorova EA, Musienko SO, Fedorov FYu. Analysis of the external factors influence on the forecasting of bankruptcy of Russian companies. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*. 2020;36(1):117–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.21638/spbu05.2020.106>

10. Altman EI, Hotchkiss E. Corporate financial distress and bankruptcy: Predict and avoid bankruptcy, analyze and invest in distressed debt. John Wiley and Sons; 2010, 368 p.
11. Kücher A, Mayr S, Mitter C, Duller C, Feldbauer-Durstmüller B. Firm age dynamics and causes of corporate bankruptcy: age dependent explanations for business failure. *Review of Managerial Science*. 2020;14:633–661. <https://doi.org/10.1007/s11846-018-0303-2>
12. Newton GW. Bankruptcy and insolvency accounting: Practice and procedure. New York: John Wiley and Sons; 2019. 554 p.
13. Sheynman OK. Integrable systems of algebraic origin and separation of variables. *Functional Analysis and its Applications*. 2018;52(4):94–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.4213/faa3553>
14. Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Kemerovo region (Kuzbass) [Internet]. [cited 2023 Jun 17]. Available from: <https://42.rosstat.gov.ru>
15. Federal State Statistics Service [Internet]. [cited 2023 Jun 17]. Available from: <https://www.gks.ru>
16. Directory of financial indicators of industries in the Russian Federation [Internet]. [cited 2023 Jun 17]. Available from: <https://www.testfirm.ru/finfactor>
17. Accounting. Taxes. Audit [Internet]. [cited 2023 Jun 17]. Available from: <https://www.audit-it.ru>
18. Rada AO, Fedulova EA, Kosinsky PD. New method for efficiency evaluation of digital technologies in agricultural sector. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(3):495–504. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-495-504>
19. Shadrin VG, Kotova ON, Polikarpova LA. The current state and prospects of the grain market in the Kemerovo region. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(4):680–688. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-680-688>

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2499>
<https://elibrary.ru/THPBUS>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Изучение пригодности к низкотемпературному консервированию плодов черешни



Б. М. Гусейнова^{1,*}, Р. Т. Мусаева²

¹ Федеральный аграрный научный центр Республики Дагестан, Махачкала, Россия

² Дагестанский государственный аграрный университет имени М. М. Джамбулатова, Махачкала, Россия

Поступила в редакцию: 02.06.2023

Принята после рецензирования: 27.10.2023

Принята к публикации: 07.11.2023

*Б. М. Гусейнова: batuch@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-3104-5100>

Р. Т. Мусаева: <https://orcid.org/0000-0001-8154-316X>

© Б. М. Гусейнова, Р. Т. Мусаева, 2024



Аннотация.

Плоды черешни (*Prunus avium* L.) ценятся за вкусовые и питательные свойства, но относятся к скоропортящимся продуктам. В связи с этим разработка технологии низкотемпературного консервирования черешни без большого изменения ее полезных свойств является актуальной задачей. Цель исследования – экспериментальное обоснование оптимальных способов и режимов замораживания черешни, а также сроков ее холодильного хранения и выявление наиболее пригодных сортов для низкотемпературного консервирования.

Объектами исследования являлись плоды черешни 8 сортов, выращиваемых в северно-предгорной зоне Дагестана. Опытные образцы плодов черешни изучались в свежем виде, замороженные погружением в жидкий хладоноситель (водно-спиртово-сахарный раствор в соотношении 65:20:15) при температуре –24 °С и россыпью в воздушной среде при температурах –30, –33 и –35 °С, а затем после хранения при –22 °С в течение 3, 9 и 12 месяцев. Содержание пищевых веществ в плодах определяли методами химического анализа, потерю сока дефростированными плодами оценивали по разности массы замороженных и размороженных плодов. Дегустационную оценку проводили по 5-балльной шкале.

Наилучшая сохранность пищевых веществ в черешне наблюдалась после заморозки в воздушной среде при –35 °С, а наихудшая при –30 °С. Снижение содержания нутриентов в черешне после заморозки россыпью в воздушной среде при температуре –33 °С и погружением в жидкий хладоноситель при –24 °С, по сравнению с замораживанием в воздушной среде при –35 °С, составило 4,2–5,4 %. В плодах, замороженных в воздушной среде, после 12 месяцев хранения при –22 °С витамин С сохранился на 77,5–81,6 %, пектиновые вещества на 83,7–89,0 %, антоцианы на 85,1–88,5 %, сахара на 81,4–86,4 %. В плодах, замороженных погружением в жидкий хладоноситель, после 12 месяцев хранения витамин С сохранился на 75,9–79,0 %, пектиновые вещества на 84,4–88,2 %, антоцианы на 83,8–87,5 %, сахара на 80,3–84,7 %. Наиболее пригодными для 12 месячного срока хранения оказались плоды сортов Лезгинка, Дагестанка и Валерий Чкалов, которые отличались минимальными изменениями показателей качества в цикле замораживание – хранение – размораживание. Черешню сортов Буйнакская черная, Крупноплодная и Полянка рекомендуется хранить до 9 месяцев, а Жемчужная и Гудзон не более 3 месяцев.

Замораживание плодов черешни россыпью в воздушной среде при температуре –33 °С и погружением в жидкий хладоноситель при температуре –24 °С сохраняет их физико-химические свойства после 3, 9 и 12 месяцев хранения при температуре –22 °С. Результаты исследования расширили информацию о низкотемпературном консервировании черешни и ее полезных для здоровья свойствах.

Ключевые слова. *Prunus avium* L., плодовые культуры, низкотемпературное консервирование, замораживание, холодильное хранение, сокоудерживающая способность, биохимический состав, качество

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания, согласно тематическому плану Федерального аграрного научного центра Республики Дагестан (ФАНЦ РД), по теме FNMN-2022-0009 «Создание новых сортообразцов плодовых культур, адаптированных к стрессовым факторам среды, разработка и освоение экологически безопасных и конкурентоспособных систем производства и переработки плодов, овощей и картофеля» (№ 122022400196-7).

Для цитирования: Гусейнова Б. М., Мусаева Р. Т. Изучение пригодности к низкотемпературному консервированию плодов черешни // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 178–190. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2499>

Low-Temperature Preservation of Cherries



Batuch M. Guseynova^{1,*}, Ragima T. Musaeva²

¹ Dagestan Agriculture Science Center, Makhachkala, Russia

² M.M. Dzhambulatov Dagestan State Agricultural University, Makhachkala, Russia

Received: 02.06.2023
Revised: 27.10.2023
Accepted: 07.11.2023

*Batuch M. Guseynova: batuch@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3104-5100>
Ragima T. Musaeva: <https://orcid.org/0000-0001-8154-316X>

© B.M. Guseynova, R.T. Musaeva, 2024



Abstract.

Cherries (*Prunus avium* L.) are valued for their taste and nutritional properties. However, they are highly perishable. A low-temperature preservation technology can preserve cherries without spoiling their beneficial properties. This research experimentally substantiated the optimal methods and modes of freezing cherries, defined their refrigerated shelf-life, and identified varieties for low-temperature preservation.

The study featured cherries of eight varieties grown in the northern foothills of Dagestan. Fresh cherries served as control. Some cherries were frozen by immersion in a liquid solution of water, alcohol, and sugar (65:20:15) at -24°C . Others were frozen in bulk in air at -30 , -33 , and -35°C to be stored at -22°C for 3, 9, and 12 months. The nutritional profile was determined by standard methods of chemical analysis. The amount of juice lost during defrosting was assessed by the difference in weight before and after defrosting. The sensory evaluation involved a five-point scale.

The best nutritional profile belonged to the sample frozen in air at -35°C while the worst result was observed in the cherries frozen at -30°C . The cherries frozen in bulk in air at -33°C and those immersed in liquid coolant at -24°C demonstrated a poorer nutritional content (by 4.2–5.4%) than the sample frozen in air at -35°C . The sample frozen in air preserved 77.5–81.6% vitamin C, 83.7–89.0% pectin substances, 85.1–88.5% anthocyanins, and 81.4–86.4% sugar after 12 months of storage at -22°C . The sample frozen in liquid coolant retained 75.9–79.0% vitamin C, 84.4–88.2% pectin substances, 83.8–87.5% anthocyanins, and 80.3–84.7% sugar after 12 months of storage. The cherries of the Lezginka, Dagestanka, and Valery Chkalov varieties showed minimal changes after 12 months. The varieties of Buynakskaya, Krupnoplodnaya, and Polyanka could be recommended for nine-month storage. The varieties of Zhemchuzhnaya and Gudzon lost consumer attractiveness as early as after 3 months.

When frozen in bulk in air at -33°C and immersed in liquid coolant at -24°C , the cherries preserved their physicochemical properties after 3, 9, and 12 months of storage at -22°C . The study expanded the existing data about low-temperature preservation of cherries and their health benefits.

Keywords. *Prunus avium* L., fruit crops, low-temperature canning, freezing, cold storage, juice holding capacity, biochemical composition, quality

Funding. The research was part of state assignment to the Dagestan Agriculture Science Center (DASC), research topic FNMN-2022-0009: New stress-adapted fruits: sustainable and competitive production and processing of fruits, vegetables, and potatoes (No. 122022400196-7).

For citation: Guseynova BM, Musaeva RT. Low-Temperature Preservation of Cherries. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):178–190. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2499>

Введение

Несмотря на то что пищевой рацион большинства россиян по запасу основных нутриентов (белки, жиры и углеводы) укладывается в норму, он беден микронутриентами – витаминами, антиоксидантами, минеральными веществами и другими биологически активными соединениями [1]. Потребность организма современного человека в необходимом количестве микронутриентов выросла из-за нерациональной структуры питания и роста стрессовых и экологически неблаго-

приятных факторов [2–6]. Одной из задач государства является обеспечение населения пищевыми продуктами, которые богаты недостающими микронутриентами, для предупреждения развития алиментарно-зависимых заболеваний и сохранения физического здоровья нации [7–9].

Плодовые культуры являются источником природных антиоксидантов, витаминов, незаменимых аминокислот, макро- и микроэлементов [10–14]. Без них невозможно обеспечить полноценное сбалансированное

питание. Пирамида здорового питания показывает, что в ежедневный рацион человека должно входить около 40 % фруктов и овощей [15].

Широкое распространение во всем мире получили косточковые плодовые культуры. В России площади под ними составляют около 25 % от общей площади всех плодовых насаждений [16]. Большой ареал распространения среди косточковых культур имеет черешня (*Prunus avium* L.), которая ценится ранним созреванием и обладает высокими вкусовыми и питательными свойствами [17–19]. Черешня пользуется большой популярностью в современном садоводстве Дагестана, а ее плоды высоким спросом на потребительском рынке плодовой продукции.

Плоды черешни – это скоропортящийся продукт, период их употребления в свежем виде ограничен малым временным интервалом. Поэтому научно-обоснованная стратегия эффективного использования в течение года плодов черешни без большого изменения их питательно-ценных свойств, физико-химических и органолептических показателей качества, является актуальной.

В мировой практике одним из наиболее прогрессивных способов пролонгирования периода потребления скоропортящейся плодовой продукции является технология низкотемпературного замораживания и последующего холодильного хранения [15, 20, 21]. Низкотемпературные технологии обеспечивают высокую сохранность исходных свойств плодовоовощного сырья. Это связано с замедлением биохимических процессов, протекающих в нем, почти полным прекращением активности ферментов и разрушительным действием микроорганизмов [22, 23].

Качество замороженных плодов определяется сортовыми особенностями плодовых культур, структурно-механическими и биохимическими показателями качества плодов, а также зависит от климатических условий места их произрастания, времени сбора урожая, степени спелости замораживаемых плодов и продолжительности периода между сбором урожая и переработкой [22–24]. Качество плодовой продукции, полученной с применением технологии низкотемпературного замораживания, зависит от условий обработки, применяемого температурного режима, длительности хранения и используемых способов дефростации [15, 20].

Сегодня дагестанский рынок замороженных плодов представлен импортной или изготовленной в центральных регионах России продукцией. В Дагестане, располагающем большими запасами плодового сырья, применение технологии низкотемпературного замораживания свежих плодов и изготовленных из них продуктов является актуальным и экономически выгодным. Внедрение технологии «шоковой заморозки» могло бы содействовать решению проблемы сбалансированного питания населения и расширению базы перерабатывающей промышленности республики.

Цель работы – экспериментальное обоснование оптимальных способов и режимов замораживания

черешни (*Prunus avium* L.), а также сроков ее холодильного хранения и выявление наиболее пригодных сортов для низкотемпературного консервирования.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Изучение нутриентного профиля плодов 8 сортов черешни, подвергнутых замораживанию разными способами: контактным способом в жидком хладоносителе (водно-спиртово-сахарный раствор в соотношении 65:20:15) методом погружения при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в воздушной среде скороморозильной камеры россыпью при $t = -30, -33$ и $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$;

2. Оценка биохимического состава, органолептических характеристик и сокоудерживающей способности плодов черешни, замороженных разными способами, после их длительного (3, 9 и 12 месяцев) холодильного хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выбор крайнего срока хранения плодов черешни (12 месяцев) объясняется тем, что дальнейшее холодное хранение замороженной черешни не имеет смысла, т. к. на рынке появится черешня нового урожая.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись плоды 8 сортов черешни (Валерий Чкалов, Гудзон, Крупноплодная, Полянка, Буйнакская черная, Дагестанка, Жемчужная и Лезгинка), выращиваемых в экспериментальных насаждениях Дагестанской селекционной опытной станции плодовых культур, которые расположены в северно-предгорной зоне Дагестана.

Свежие плоды черешни по качеству и показателям безопасности для жизни и здоровья человека отвечали требованиям ГОСТ 33801-2016.

Замораживание плодов черешни для выявления сортов, пригодных к низкотемпературному консервированию, и определения оптимальных способов и режимов шоковой заморозки, а также сроков длительного холодильного хранения проводили следующим образом:

- сбор плодов черешни в стадии потребительской зрелости с удалением помятых, перезрелых, поврежденных и пораженных вредителями и болезнями плодов;
- сортировка, мойка и подсушивание: плоды черешни сортировали, удаляли плодоножки, мыли водопроводной водой и подсушивали;
- замораживание плодов черешни разными способами:

- 1) погружением в жидкий хладоноситель: в полистироловые ёмкости (объем 500 мл) заливали жидкий хладоноситель (водно-спиртово-сахарный раствор в соотношении 65:20:15) при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем в него погружали свежие плоды черешни до полного покрытия поверхностного слоя плодов. После этого ёмкости направляли в морозильную камеру RENOVA FC-310S для замораживания при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- 2) в воздушной среде: замораживание плодов черешни россыпью (толщина слоя 3–4 см) в низкотемпературном шкафу GRUNLAND T 25/01.1 (Германия) при $t = -30, -33$ и $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до достижения в центре плода

температуры $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, которую определяли полупроводниковым измерителем ИТ-1 со шкалой от -190 до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– упаковка плодов черешни, замороженных россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, в полиэтиленовые пакеты по 0,3 кг перед отправкой их на хранение при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плоды черешни, замороженные в жидком хладоносителе при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ в полистироловых ёмкостях, в таком же виде направляли на холодильное хранение;

– хранение замороженных разными способами плодов черешни в холодильной камере RENOVA FC-310S в течение 3, 9 и 12 месяцев при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 90–95 %;

– оттаивание замороженной черешни с применением СВЧ-энергии частотой 2450 МГц и мощностью 190 Вт до достижения в центре плода температуры $4\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ перед проведением оценки их качества по физико-химическим и органолептическим показателям качества.

Свежие и замороженные плоды черешни исследовали по показателям: общее содержание сахаров – методом Бертрана по ГОСТ 8756.13-87; содержание титруемых кислот – титрованием децинормальным раствором NaOH по ГОСТ ISO 750; содержание витамина С – ускоренным методом по Ермакову и др. (1987 г.), титрованием щавелевокислых вытяжек краской Тильманса (2,6-дихлорфенолиндофенолом) по ГОСТ 24556-89 и йодометрическим методом; массовая концентрация пектиновых веществ – титрованием щелочью предварительно выделенных и подготовленных пектиновых веществ до и после гидролиза по ГОСТ 29059-91; массовые концентрации антоцианов – колориметрическим методом с использованием прибора ФЭК-56М (Россия) (Методические указания по химико-технологическому сортоиспытанию овощных, плодовых и ягодных культур для консервной промышленности).

Дегустационную оценку замороженной черешни проводили по 5-балльной шкале по ГОСТ ISO 6658-2016 в хорошо освещенном и без посторонних запахов помещении. Каждый опытный образец черешни оценивался по показателям: внешний вид, цвет, вкус, аромат и консистенция мякоти. На оценку каждого показателя отводилось 5 баллов. Были выведены средние баллы по всем показателям (общие дегустационные оценки): 1,0–2,0 – отход; 2,1–3,4 – непригодны для замораживания; 3,5–3,9 – удовлетворительная пригодность; 4,0–4,4 – хорошая пригодность; 4,5–5,0 – отличная пригодность.

Сахарокислотный индекс (СКИ) плодов черешни определяли как отношение массы концентрации сахаров в них к содержанию титруемых кислот.

Потерю сока (X, %) замороженных плодов черешни после дефростации определяли по разности массы замороженных и размороженных плодов, выраженную в процентах к исходной массе плода:

$$X = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_k} \times 100$$

где M_1 – масса замороженных плодов черешни до дефростации, г; M_2 – масса замороженных плодов черешни после дефростации, г; M_k – масса косточек плодов черешни, г.

Сокоудерживающую способность (%) определяли, отнимая из 100 % величину показателя потери сока (X, %).

В процессе работы использовали следующее оборудование: баня водяная Biosan WB-4MS (Латвия); весы лабораторные Ohaus PA2102C и Ohaus PA214 (Китай); весы лабораторные CAS MWP MWP-300H (Южная Корея); лабораторный сушильный шкаф Climcontrol ШС 30/250-100-Л Тор (Россия); центрифуга лабораторная ЭКРОС-6914 (Россия); термометр лабораторный ТЛ15 (Россия); гомогенизатор HG-15F-Set (Корея); настольный измеритель pH Ohaus Starter 2100 (Китай); плита программируемая ППП-03 НПП («Томьаналит», Россия); термостат MIR-262 Sanyo (Япония); фотоэлектрический колориметр ФЭК-56М (Россия).

Статистическую обработку результатов исследования осуществляли с помощью пакета программ SPSS 12.0 для Windows. Достоверность полученных отличий устанавливали по t-критерию Стьюдента. Статистически значимыми считали различия при $p \leq 0,05$. Результаты анализа представлены в виде среднего значения (M) и стандартной ошибки среднего значения ($\pm m$).

Результаты и их обсуждение

После низкотемпературного замораживания черешни при всех примененных способах и режимах наблюдалось уменьшение массовой концентрации сахаров в плодах. Это можно объяснить ферментативным гидролизом сахарозы и окислением моносахаридов под действием оксидаз, не ингибированных шоковой заморозкой. Направленность изменения их содержания в процессе замораживания для всех сортов черешни оказалась идентичной и не зависела от условий и приемов замораживания. На сохранность сахаров способы и режимы замораживания не оказывают значительного влияния (самая высокая стабильность их концентрации была определена в черешне, замороженной в воздушной среде при $t = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$). Потери сахаров в черешне, подвергнутой низкотемпературному замораживанию россыпью в воздушной среде при $t = -30, -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, по сравнению с их содержанием в свежих плодах, составили 6,5–8,9, 5,9–7,9 и 5,7–7,5 % соответственно. В черешне, замороженной погружением в жидкий хладоноситель (водно-спиртово-сахарный раствор в соотношении 65:20:15) при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$, потери сахаров варьировались от 6,3 % (сорт Валерий Чкалов) до 8,5 % (сорт Жемчужная) в зависимости от сорта. Это больше на 0,4 %, чем в черешне, замороженной в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Массовая концентрация титруемых кислот в опытных образцах черешни в процессе замораживания, в отличие от сахаров, увеличилась при всех примененных технологических режимах замораживания.

Это может быть связано с протекающими процессами окисления и фосфорилирования, которые приводят к образованию продуктов неполного окисления углеводов, в первую очередь органических кислот [25].

Таблица 1. Влияние способов и режимов замораживания на сохранность пищевых веществ в плодах черешни, выращиваемой в Дагестане

Table 1. Effect of freezing methods and modes on the nutritional profile of Dagestan cherries

Сорт черешни	Массовая концентрация пищевых веществ				
	Сахара, %	Тируемые кислоты, %	Витамин С, мг/100 г	Антоцианы, мг/100 г	Пектиновые вещества, %
	В свежих плодах черешни				
Буйнакская черная	11,92 ± 0,16	0,630 ± 0,010	7,21 ± 0,09	112,50 ± 1,24	0,820 ± 0,013
Валерий Чкалов	10,54 ± 0,10	0,720 ± 0,011	7,13 ± 0,08	132,20 ± 1,45	0,870 ± 0,014
Гудзон	11,85 ± 0,13	0,920 ± 0,013	9,35 ± 0,13	112,00 ± 1,23	0,720 ± 0,009
Дагестанка	10,61 ± 0,14	0,720 ± 0,011	7,90 ± 0,09	135,40 ± 1,56	0,900 ± 0,014
Жемчужная	10,78 ± 0,12	0,710 ± 0,013	7,54 ± 0,08	79,60 ± 0,88	0,780 ± 0,011
Крупноплодная	11,35 ± 0,15	0,750 ± 0,016	8,91 ± 0,12	150,30 ± 2,10	0,950 ± 0,016
Лезгинка	12,23 ± 0,16	0,680 ± 0,009	5,11 ± 0,08	124,10 ± 1,86	0,970 ± 0,017
Полянка	12,47 ± 0,19	1,100 ± 0,018	6,76 ± 0,09	62,20 ± 0,82	0,830 ± 0,013
В плодах черешни, замороженных погружением в жидкий хладоноситель при t = –24 °C					
Буйнакская черная	11,10 ± 0,13	0,660 ± 0,012	6,71 ± 0,10	120,00 ± 1,20	0,780 ± 0,013
Валерий Чкалов	9,88 ± 0,09	0,750 ± 0,013	6,67 ± 0,09	140,00 ± 1,64	0,820 ± 0,016
Гудзон	10,96 ± 0,12	0,970 ± 0,018	8,55 ± 0,11	118,20 ± 1,19	0,680 ± 0,012
Дагестанка	9,82 ± 0,14	0,750 ± 0,016	7,29 ± 0,12	145,30 ± 2,03	0,850 ± 0,014
Жемчужная	9,86 ± 0,11	0,740 ± 0,016	6,87 ± 0,09	86,10 ± 0,99	0,730 ± 0,012
Крупноплодная	10,48 ± 0,16	0,790 ± 0,015	8,21 ± 0,12	158,70 ± 2,45	0,890 ± 0,015
Лезгинка	11,39 ± 0,19	0,710 ± 0,016	4,73 ± 0,07	132,30 ± 1,88	0,920 ± 0,017
Полянка	11,65 ± 0,17	1,150 ± 0,019	6,29 ± 0,10	66,70 ± 0,87	0,790 ± 0,013
В плодах черешни, замороженных россыпью в воздушной среде при t = –30 °C					
Буйнакская черная	10,98 ± 0,14	0,680 ± 0,010	6,58 ± 0,07	119,10 ± 1,31	0,770 ± 0,010
Валерий Чкалов	9,85 ± 0,10	0,770 ± 0,012	6,54 ± 0,06	138,90 ± 1,81	0,810 ± 0,011
Гудзон	10,83 ± 0,12	0,990 ± 0,017	8,44 ± 0,15	117,30 ± 1,35	0,680 ± 0,009
Дагестанка	9,79 ± 0,11	0,760 ± 0,016	7,22 ± 0,10	144,20 ± 1,29	0,840 ± 0,015
Жемчужная	9,82 ± 0,10	0,760 ± 0,015	6,78 ± 0,07	85,60 ± 0,96	0,720 ± 0,014
Крупноплодная	10,45 ± 0,15	0,800 ± 0,016	8,09 ± 0,14	158,00 ± 2,17	0,890 ± 0,014
Лезгинка	11,31 ± 0,15	0,730 ± 0,014	4,66 ± 0,06	131,50 ± 1,72	0,920 ± 0,016
Полянка	11,57 ± 0,17	1,160 ± 0,019	6,19 ± 0,09	66,20 ± 0,80	0,780 ± 0,012
В плодах черешни, замороженных россыпью в воздушной среде при t = –33 °C					
Буйнакская черная	11,12 ± 0,20	0,650 ± 0,009	6,78 ± 0,08	119,00 ± 1,43	0,780 ± 0,009
Валерий Чкалов	9,92 ± 0,10	0,750 ± 0,013	6,72 ± 0,07	138,10 ± 1,71	0,830 ± 0,011
Гудзон	11,00 ± 0,12	0,960 ± 0,016	8,66 ± 0,16	118,60 ± 1,38	0,680 ± 0,008
Дагестанка	9,86 ± 0,11	0,740 ± 0,014	7,40 ± 0,10	143,70 ± 2,07	0,860 ± 0,013
Жемчужная	9,93 ± 0,11	0,730 ± 0,012	6,95 ± 0,09	85,60 ± 1,06	0,730 ± 0,008
Крупноплодная	10,51 ± 0,14	0,780 ± 0,012	8,31 ± 0,14	157,80 ± 2,32	0,900 ± 0,017
Лезгинка	11,42 ± 0,18	0,710 ± 0,011	4,79 ± 0,07	130,10 ± 1,77	0,920 ± 0,017
Полянка	11,70 ± 0,21	1,140 ± 0,018	6,35 ± 0,11	66,10 ± 0,90	0,800 ± 0,015
В плодах черешни, замороженных россыпью в воздушной среде при t = –35 °C					
Буйнакская черная	11,16 ± 0,18	0,650 ± 0,010	6,84 ± 0,11	118,80 ± 1,31	0,790 ± 0,009
Валерий Чкалов	9,94 ± 0,13	0,740 ± 0,011	6,77 ± 0,10	138,50 ± 1,75	0,830 ± 0,012
Гудзон	11,03 ± 0,12	0,950 ± 0,015	8,70 ± 0,17	117,00 ± 1,39	0,700 ± 0,010
Дагестанка	9,90 ± 0,11	0,740 ± 0,014	7,44 ± 0,13	143,80 ± 2,20	0,850 ± 0,011
Жемчужная	9,97 ± 0,13	0,730 ± 0,014	6,98 ± 0,13	85,30 ± 1,07	0,740 ± 0,012
Крупноплодная	10,57 ± 0,14	0,780 ± 0,016	8,34 ± 0,15	157,70 ± 2,68	0,910 ± 0,016
Лезгинка	11,50 ± 0,17	0,700 ± 0,015	4,80 ± 0,09	131,20 ± 1,80	0,940 ± 0,015
Полянка	11,75 ± 0,19	1,120 ± 0,018	6,40 ± 0,12	65,90 ± 0,86	0,800 ± 0,013

Рост количества кислот в черешне после шоковой заморозки россыпью в воздушной среде при $t = -30$, -33 и -35 °C составил 5,2–7,3, 3,0–4,5 и 2,2–3,8 % соответственно. Кислотность в плодах, замороженных погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24$ °C, выросла, в зависимости от сорта, с 3,9 % (сорт Дагестанка) до 5,8 % (сорт Гудзон) в сравнении с количеством в свежих плодах. Наибольшая стабильность показателя кислотности отмечена у черешни, подвергнутой низкотемпературной обработке при $t = -35$ °C (табл. 1).

После замораживания черешни как в водно-спиртово-сахарном растворе в соотношении 65:20:15 при $t = -24$ °C, так и в воздушной среде при $t = -30$, -33 и -35 °C увеличилось содержание антоцианов в среднем на 6,6, 5,9, 5,7 и 5,6 % соответственно (табл. 1). Данное увеличение объясняется высвобождением антоцианов, находящихся в плодах в связанной форме в виде гликозидов, в результате разрушительного действия низких температур на β -1,3 гликозидную связь, а также повышением активности гидролаз [25].

Массовые концентрации витамина С и пектиновых веществ в свежих плодах черешни варьировались в пределах 5,11–9,35 мг/100 г и 0,72–0,97 % соответственно (табл. 1). При всех примененных температурных режимах и способах замораживания наблюдалось уменьшение содержания этих пищевых веществ. Выявленное в процессе замораживания снижение содержания витамина С и пектинов в черешне обусловлено разрушительным действием низких температур на клеточные стенки плодов и ферментов, малое количество которых не было ингибировано холодовым стрессом, а также потерями при размораживании. Более лабильным, по сравнению с пектиновыми веществами, оказался витамин С. Его большие потери (от 8,5 % (сорт Валерий Чкалов) до 10,1 % (сорт Жемчужная)) наблюдались в черешне, замороженной при $t = -30$ °C. Снижение массовой концентрации пектиновых веществ при этом способе замораживания, в зависимости от сорта черешни, составило 5,6–7,3 %. Сохранность витамина С и пектиновых веществ у плодов, замороженных погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24$ °C, составила 91,1–93,5 и 93,4–95,2 % соответственно от их содержания в свежей черешне.

Хотя высокая сохранность изученных пищевых веществ в плодах исследованного сорта черешни наблюдалась после низкотемпературной обработки при $t = -35$ °C, другие примененные способы и режимы замораживания также обеспечили хорошую стабильность нутриентного состава. Снижение массовых концентраций пищевых веществ в плодах всех исследованных сортов черешни после их шоковой заморозки россыпью в воздушной среде при $t = -33$ °C и погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24$ °C, по сравнению с их содержанием в плодах черешни, замороженных в воздушной среде при $t = -35$ °C, составило в среднем 4,2–5,4 % (табл. 1). Худшая сохранность нутриентного профиля черешни была отмечена при ее замораживании

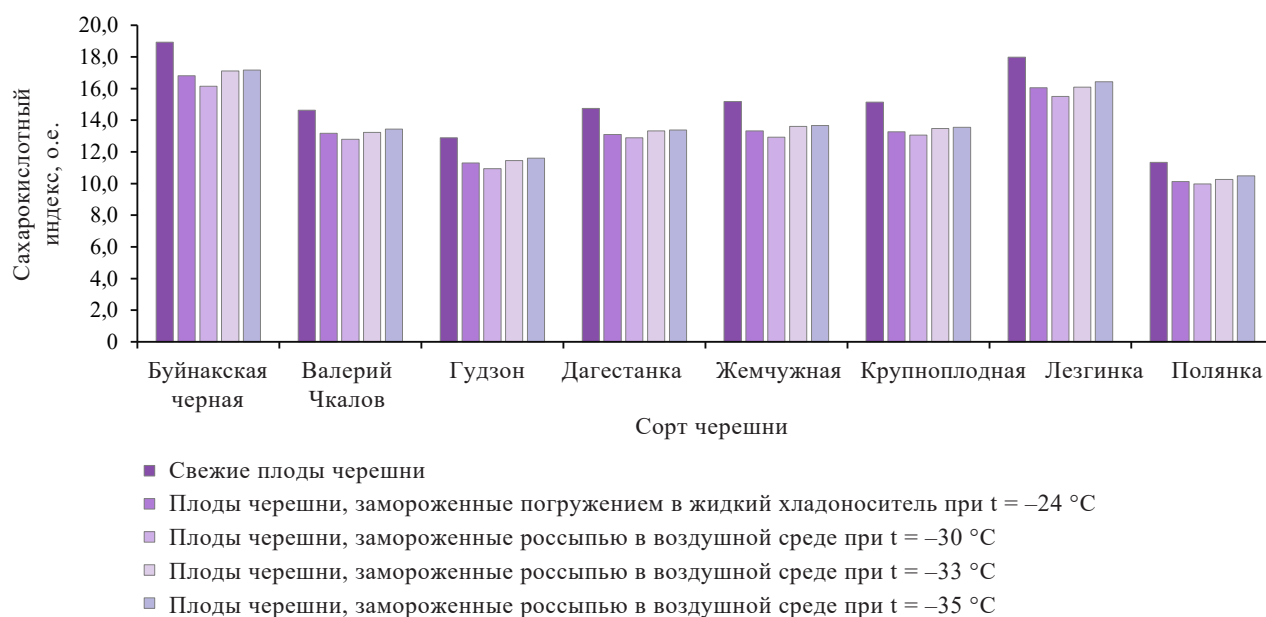
россыпью в воздушной среде в морозильной камере при $t = -30$ °C. Поэтому результаты проведенных экспериментов дают основание рекомендовать проведение заморозки как путем низкотемпературной обработки в воздушной среде при $t = -33$ °C, так и погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24$ °C, поскольку эти режимы более экономичны по энергозатратам в сравнении с замораживанием при $t = -35$ °C [11, 19].

Гармоничное сочетание сахаров и кислот определяет вкус плодов. Отношение количества сахаров к титруемой кислотности характеризуется сахарокислотным индексом (СКИ), который принято называть объективным показателем вкуса. На рисунке 1 показано изменение СКИ, определенного в плодах черешни в процессе замораживания погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24$ °C и россыпью в воздушной среде при $t = -30$, -33 и -35 °C. Такая низкотемпературная обработка черешни привела к снижению значений СКИ по сравнению с показателями СКИ у свежих плодов.

На качество замороженных продуктов, наряду с условиями и режимами замораживания, влияют продолжительность и температура холодильного хранения. В связи с этим при разработке технологий низкотемпературного консервирования плодов черешни необходимо было изучить влияние условий длительности холодильного хранения на их качественные показатели. Поэтому в следующем эксперименте низкотемпературную обработку плодов перед их отправкой на холодильное хранение осуществляли россыпью в воздушной среде при $t = -33$ °C и методом погружения в жидкий хладоноситель при $t = -24$ °C.

Результаты анализов химического состава черешни, замороженной разными способами, после 3, 9 и 12 месяцев холодильного хранения ($t = -22$ °C) представлены в таблице 2. Длительное холодильное хранение вызвало в опытных образцах снижение массовой концентрации всех определяемых пищевых веществ, за исключением титруемых кислот, увеличение количества которых наблюдалось в течение всего периода хранения, и пектиновых соединений, содержание которых увеличилось в начальный период хранения.

Потери сахаров в плодах черешни, замороженных контактным способом в жидком хладоносителе при $t = -24$ °C, после их холодильного хранения в течение 3, 9 и 12 месяцев составили 7,5–10,1, 10,3–14,1 и 15,3–19,7 % соответственно в сравнении с их количеством, определенным до воздействия холодом. При замораживании черешни россыпью в воздушной среде при $t = -33$ °C сохранность сахаров после 3, 9 и 12 месяцев хранения была больше, в зависимости от сорта, на 0,6–1,5, 0,9–1,6 и 0,6–2,4 % соответственно, по сравнению с плодами черешни, предварительно замороженными в жидком хладоносителе. Наблюдаемое в процессе хранения снижение количества сахаров обусловлено разрушительным действием низких температур на клеточные стенки плодов, потерями при размораживании



Примечание: стандартная ошибка среднего значения для показателя СКИ составила 0,13–0,17 о.е.

Рисунок 1. Изменение сахарокислотного индекса черешни, выращиваемой в Дагестане, после замораживания погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24^{\circ}\text{C}$ и россыпью в воздушной среде при $t = -30, -33$ и -35°C

Figure 1. Sugar acid index of Dagestan cherries frozen in liquid coolant at -24°C vs. cherries frozen in bulk in air at $-30, -33$, and -35°C

и действием гидролитических и транспортных ферментов в процессе хранения, малое количество которых не было ингибировано холодовым стрессом. Наилучшая сохранность сахаров после окончания эксперимента определена в черешне сортов Валерий Чкалов, Лезгинка и Крупноплодная, замороженной россыпью в воздушной среде при $t = -33^{\circ}\text{C}$, – 86,4, 86,1 и 86,0 % соответственно (табл. 2).

Количество титруемых кислот, в отличие от сахаров, в плодах черешни, независимо от сорта, увеличилось как в результате замораживания (табл. 1), так и после 3, 9 и 12 месяцев холодильного хранения (табл. 2). Через 9 месяцев хранения рост содержания титруемых кислот в черешне, замороженной в воздушной среде при $t = -33^{\circ}\text{C}$ и погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24^{\circ}\text{C}$, составил в среднем 12,3 и 13,6 % соответственно по сравнению с их количеством в свежих плодах. К концу 12 месяцев холодильного хранения показатели титруемой кислотности повысились на 12,5–18,9 % в зависимости от сорта, условий и режимов замораживания (табл. 2). Увеличение содержания титруемых кислот в черешне в процессе замораживания и холодильного хранения при $t = -22^{\circ}\text{C}$ может быть связано с разобщением процессов окисления и фосфорилирования, которые происходят в клетках плодов. Это способствует образованию продуктов неполного окисления углеводов, в первую очередь органических кислот, в том числе пировиноградной и яблочной. Кроме того, моносахариды в кислой среде под действием ферментов оксидаз, в основном глюко-

зидазы и каталазы, способны окисляться до альдоновых кислот, что приводит к повышению кислотности [25].

Сохранность витамина С является основным индикатором, который характеризует щадящий эффект технологической обработки продукта. Среди всех изученных пищевых веществ черешни наибольшим изменениям подвергся витамин С. Степень его разрушения зависела от способов и режимов замораживания, а также сроков холодильного хранения: чем ниже температура замораживания и короче период хранения, тем выше была его сохранность. Уменьшение содержания витамина С в плодах черешни в процессе замораживания и длительного холодового хранения связано с нарушением течения ферментативных окислительно-восстановительных реакций. При шоковой заморозке и последующем холодовом хранении плодов многие ферменты, присутствующие в них, деструктурируются, а при их дефростации небольшое количество неразрушенных замораживанием окислительных ферментов быстро восстанавливает свою активность, и витамин С безвозвратно окисляется. Этому содействует доступ кислорода, усиленный из-за разрушительных изменений в тканях замороженных плодов [15].

Как видно из таблицы 2, к концу эксперимента наилучшая сохранность витамина С (77,5–81,6 % от содержания в свежих плодах) определена в плодах, замороженных в условиях воздушной среды при $t = -33^{\circ}\text{C}$. Самые большие потери витамина С (от 24,1 % (сорт Жемчужная) до 21,0 % (сорт Валерий Чкалов)), по сравнению с содержанием в свежих плодах, определены

Таблица 2. Изменение в процессе длительного холодильного хранения ($t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$) содержания пищевых веществ в плодах черешни, замороженных россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$

Table 2. Changes in the nutritional profile during long-term refrigerated storage (-22°C): cherries frozen in bulk in air at -33°C vs. cherries in liquid coolant at -24°C

Сорт черешни	Массовая концентрация пищевых веществ				
	Сахара, %	Тируемые кислоты, %	Витамин С, мг/100 г	Антоцианы, мг/100 г	Пектиновые вещества, %
	После 3 месяцев холодильного хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$				
Буйнакская черная	11,06*/10,88**	0,67/0,68	6,40/6,33	112,6/112,1	0,81/0,82
Валерий Чкалов	9,83/9,75	0,77/0,78	6,37/6,29	132,3/132,0	0,86/0,86
Гудзон	10,83/10,74	0,99/1,01	8,16/8,05	111,4/110,2	0,71/0,71
Дагестанка	9,73/9,66	0,76/0,77	7,00/6,90	136,1/136,6	0,90/0,91
Жемчужная	9,80/9,69	0,76/0,77	6,54/6,48	80,0/80,2	0,77/0,76
Крупноплодная	10,53/10,43	0,80/0,81	7,84/7,73	151,0/150,6	0,94/0,94
Лезгинка	11,39/11,28	0,72/0,73	4,50/4,46	124,8/125,9	0,96/0,96
Полянка	11,50/11,42	1,18/1,17	5,99/5,92	62,9/63,0	0,83/0,84
После 9 месяцев холодильного хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$					
Буйнакская черная	10,56/10,42	0,71/0,72	5,98/5,84	107,9/107,9	0,76/0,75
Валерий Чкалов	9,62/9,45	0,81/0,82	6,03/5,89	126,9/127,5	0,80/0,79
Гудзон	10,40/10,30	1,05/1,06	7,70/7,49	106,6/104,7	0,65/0,65
Дагестанка	9,37/9,25	0,80/0,81	6,56/6,43	127,3/126,8	0,83/0,82
Жемчужная	9,38/9,26	0,81/0,82	6,15/6,01	74,4/73,8	0,71/0,71
Крупноплодная	10,17/10,04	0,83/0,84	7,41/7,22	142,8/141,9	0,88/0,87
Лезгинка	11,14/10,95	0,76/0,76	4,32/4,23	118,9/119,6	0,90/0,88
Полянка	11,14/10,99	1,22/1,24	5,69/5,58	59,2/58,7	0,78/0,77
После 12 месяцев холодильного хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$					
Буйнакская черная	9,98/9,79	0,73/0,74	5,70/5,58	98,8/97,1	0,72/0,72
Валерий Чкалов	9,11/8,93	0,83/0,84	5,82/5,63	116,8/115,9	0,77/0,76
Гудзон	9,74/9,67	1,07/1,09	7,32/7,16	96,7/94,2	0,62/0,61
Дагестанка	9,08/8,83	0,82/0,83	6,38/6,18	118,3/116,5	0,80/0,80
Жемчужная	8,77/8,66	0,83/0,84	5,84/5,72	67,7/ 66,7	0,65/0,66
Крупноплодная	9,76/9,56	0,84/0,87	7,11/6,87	131,3/129,7	0,84/0,83
Лезгинка	10,53/10,36	0,77/0,79	4,11/4,03	109,0/108,3	0,85/0,86
Полянка	10,70/10,44	1,25/1,27	5,37/5,29	54,3/53,1	0,73/0,72

Примечание: * содержание пищевых веществ в процессе хранения в плодах черешни, замороженных россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$; ** содержание пищевых веществ в процессе хранения в плодах черешни, замороженных погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стандартная ошибка среднего значения для массовой концентрации сахаров составила 0,11–0,22 %; тируемых кислот – 0,009–0,018 %; витамина С – 0,07–0,15 мг/100 г; антоцианов – 1,20–2,10 мг/100 г; пектиновых веществ – 0,012–0,019 %.

Note: * nutrients during storage in cherries frozen in bulk in air at -33°C ; ** nutrients during storage in cherries frozen in liquid coolant at -24°C . The standard mean error: mass concentration of sugars – 0.11–0.22%; testable acids – 0.009–0.018%; vitamin C – 0.07–0.15 mg/100 g; anthocyanins – 1.20–2.10 mg/100 g; pectin substances – 0.012–0.019%.

в черешне, замороженной погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ после их холодильного хранения ($-22\text{ }^{\circ}\text{C}$), длившегося 12 месяцев. После завершения эксперимента лучшими по массовой концентрации витамина С оказались плоды черешни сортов Гудзон (7,32 мг/100 г), Крупноплодная (7,11 мг/100 г) и Дагестанка (6,38 мг/100 г).

Плоды исследованных сортов черешни отличаются друг от друга по массовой концентрации в них антоцианов (табл. 1 и 2). Наибольшее количество этих веществ обнаружено в свежих плодах сорта Крупноплодная (150,3 мг/100 г), а наименьшее – сорта Полянка (62,2 мг/100 г). Во всех опытных образцах

черешни в течение всего срока холодильного хранения наблюдалось уменьшение содержания антоцианов. По окончании 3-х месячного срока холодильного хранения ($-22\text{ }^{\circ}\text{C}$) черешни, независимо от сорта, условий и режимов замораживания, количество антоцианов уменьшилось на 4,1–6,9 % от их содержания, определенного в замороженных плодах черешни перед холодильным хранением. Но при увеличении длительности периода хранения в черешне усилилась деструкция антоцианов. Содержание этих веществ в плодах, предварительно замороженных погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$, через 12 месяцев холодильного хранения, по сравнению с количеством

в свежей черешне, снизилось на 11,6–16,2 %, а в плодах, подвергнутых замораживанию в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, уменьшилось к концу эксперимента на 11,6–14,9 % (табл. 2).

Пектиновые вещества неоднозначно реагировали на продолжительность срока холодильного хранения. В начальный период (3 месяца) в плодах всех сортов черешни произошло увеличение количества пектиновых веществ, в зависимости от сорта, способов и режимов низкотемпературной обработки, на 3,6–5,0 % (плоды, замороженные россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 4,3–6,1 % (плоды, замороженные погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению с их содержанием после замораживания (табл. 1 и 2). Это можно объяснить гидролизом протопектина в процессе холодильного хранения черешни и переходом нерастворимых протопектинов, которые содержатся в клеточных стенках плодов, в растворимое состояние после деструктивных изменений, вызванных размораживанием. Последующее хранение черешни при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 9 и 12 месяцев привело к снижению концентрации пектинов. К концу 12 месяцев хранения количество пектинов уменьшилось в среднем на 12,7–13,0 % по сравнению с их содержанием в свежих плодах. Такой процесс связан с тем, что пектины в черешне при холодильном хранении постепенно подвергаются гидролитическому распаду под действием пектолитических ферментов, незначительное количество которых могло сохраниться при замораживании. Наиболее богатыми пектиновыми веществами (0,80–0,86 %) после 12 месяцев холодильного хранения оказались плоды черешни сортов Дагестанка, Крупноплодная и Лезгинка (табл. 2).

Одним из показателей пригодности плодов садовых культур к замораживанию является их сокоудерживающая способность при дефростации. На сокоудерживающую способность плодов влияют, наряду с биологическими особенностями сорта (прочность кожицы, консистенция мякоти и соотношения свободной и связанной воды в плодах), способы и режимы замораживания, сроки и условия холодильного хранения [20].

Динамику сокоудерживающей способности плодов наиболее перспективных сортов черешни из Дагестана в процессе замораживания разными способами и температурными режимами, а также в течение длительного 3, 9 и 12 месячного холодильного хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ иллюстрируют данные таблицы 3. Низкотемпературное замораживание черешни в воздушной среде при температуре $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ способствовало наилучшему сохранению сокоудерживающей способности, в зависимости от сорта, от 95,3 % (сорт Гудзон) до 97,0 % (сорт Лезгинка). Однако в плодах черешни, замороженных методом погружения в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$, разница в потере сока, по сравнению с плодами, замороженными россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, была незначительной и составила 0,3–0,5 %.

С продлением периода холодильного хранения плодов черешни наблюдается снижение их сокоудерживающей способности, независимо от технологических условий и режимов замораживания. Минимальные потери клеточного сока в цикле замораживание – хранение – размораживание определили у черешни после 3 месяцев холодильного хранения: 4,2–8,4 % (плоды, замороженные в жидкой хладоноситель) и 3,7–7,8 % (плоды, замороженные в воздушной среде).

Таблица 3. Изменение в процессе холодильного хранения ($t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$) сокоудерживающей способности плодов черешни, предварительно замороженных россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$

Table 3. Changes in juice-holding capacity during refrigerated storage (-22°C): cherries frozen in bulk in air at -33°C vs. cherries frozen in liquid coolant at -24°C

Сорт черешни	Потеря сока, %			
	После замораживания	После 3 месяцев хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$	После 9 месяцев хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$	После 12 месяцев хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$
Буйнакская черная	4,4*/4,8**	6,3/7,2	9,2/10,7	11,4/13,1
Валерий Чкалов	3,2/3,6	4,0/4,8	6,1/7,4	7,7/9,2
Гудзон	4,7/5,1	6,8/7,7	9,8/11,4	12,2/13,9
Дагестанка	3,4/3,9	4,5/5,4	6,7/8,2	8,4/10,0
Жемчужная	5,1/5,4	7,8/8,4	11,1/12,4	13,7/15,1
Крупноплодная	4,0/4,3	5,3/6,1	7,9/9,2	10,3/11,4
Лезгинка	3,0/3,2	3,7/4,2	5,7/6,1	7,2/7,7
Полянка	4,2/4,5	6,1/6,6	8,8/9,9	10,9/12,2

Примечание: * потеря сока в процессе хранения плодами черешни, замороженными россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$; ** потеря сока в процессе хранения плодами черешни, замороженными погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стандартная ошибка среднего значения для показателя потери сока составила 0,03–0,085 %.

Note: * loss of juice during storage in cherries frozen in bulk in air at -33°C ; ** loss of juice during storage in cherries frozen in liquid coolant at -24°C . The standard mean error for juice loss was 0.03–0.085%.

Незначительная сокоотдача в течение всего периода хранения наблюдалась у плодов черешни, замороженных в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Замораживание погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ также обеспечивало хорошую сохранность влагоудерживающей способности: от 92,3 % (сорт Лезгинка) до 84,9 % (сорт Жемчужная). К концу 12 месяцев хранения потеря сока в плодах, по сравнению с их сокоотдачей сразу после замораживания, увеличилась в 2,4–2,8 раза в зависимости от сорта, условий и режимов замораживания (табл. 3).

Пригодность плодов 8 исследованных сортов черешни к низкотемпературному консервированию по показателю сокоудерживающей способности оценивали с помощью обобщенной функции желательности Харрингтона, где потеря сока до 5 % – очень хорошая сокоудерживающая способность, 5,1–10 % – хорошая, 10,1–20 % – удовлетворительная, свыше 20 % – исследуемые объекты не пригодны для замораживания [20].

В разные группы, сформированные по пригодности к замораживанию, согласно шкале желательности Харрингтона, могут попасть плоды одного и того же сорта черешни, в зависимости от примененных способов и режимов замораживания, а также продолжительности периода холодильного хранения. В нашем эксперименте плоды черешни сортов Буйнакская черная, Крупноплодная и Полянка после замораживания россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ попали в группу «очень хороших», после 3 и 9 месяцев холодильного хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в группу «хороших», а к концу 12 месяцев черешня этих сортов оказалась в числе «удовлетворительных» (потеря сока 10,3–11,4 %).

Незначительные потери клеточного сока, независимо от способа и режимов замораживания, определили в плодах черешни сортов Дагестанка, Крупноплодная и Лезгинка, которые содержали наибольшее количество пектинов – 0,90–0,97 % (табл. 1 и 3). Между содержанием пектиновых веществ и потерей клеточного сока в черешне в процессе 12 месяцев холодного хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ выявлена обратная корреляция. Коэффициенты парной корреляции между этими показателями для черешни, замороженной методом погружения в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ и россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, составили $r = -0,820$ и $r = -0,770$ соответственно.

Все исследуемые сорта черешни по сокоудерживающей способности плодов пригодны к низкотемпературному замораживанию и холодильному хранению при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение разных сроков. По уровню желательности Харрингтона они распределились на три группы. Наиболее пригодными к замораживанию и длительному хранению до 12 месяцев оказались плоды сортов Лезгинка, Дагестанка и Валерий Чкалов; ко второй группе отнесли черешню сортов Буйнакская черная, Крупноплодная и Полянка, которые рекомендуется хранить до 9 месяцев. К третьей группе отнесли плоды черешни сортов Жемчужная и Гудзон.

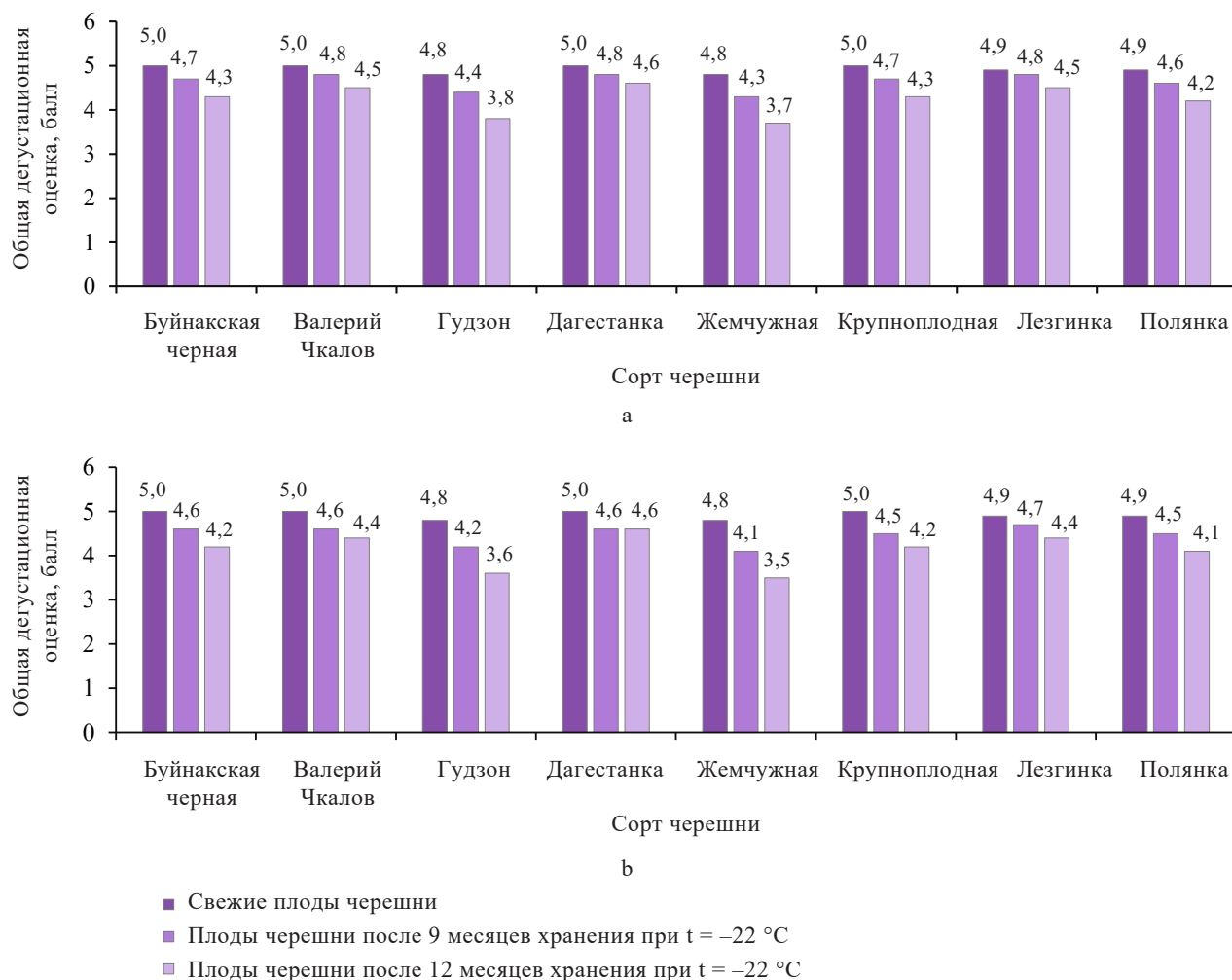
Их можно хранить без значительных изменений исходных свойств до 3 месяцев.

Хотя при замораживании и длительном холодильном хранении плодов активность содержащихся в них ферментов резко снижается, в процессе размораживания часть окислительно-восстановительных ферментов, не разрушенных морозом, восстанавливает свою активность [22]. Это и вызывает изменение органолептических свойств замороженных плодов. Поэтому на следующем этапе эксперимента, применяя 5-балльную шкалу, провели дегустационную оценку как свежих, так и подвергнутых замораживанию и длительному холодильному хранению плодов черешни.

Все исследованные плоды черешни характеризовались отсутствием несвойственных сортам посторонних привкусов и запахов. Как показано на рисунке 2, к концу эксперимента высокие общие дегустационные оценки (4,4–4,7 балла) получили плоды сортов Дагестанка, Валерий Чкалов и Лезгинка, которые оказались лучшими по сокоудерживающей способности, рекомендованные по этому показателю для 12 месяцев холодильного хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (табл. 3). По результатам дегустации черешня сортов Буйнакская черная, Полянка и Крупноплодная, замороженная погружением в жидкий хладоноситель, через 12 месяцев хранения при $t = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$ имела общие дегустационные оценки 4,2, 4,1 и 4,2 балла, а замороженная россыпью в воздушной среде – 4,3, 4,2 и 4,3 балла соответственно. Низкие общие дегустационные оценки (3,5–3,8 балла) после 12 месяцев холодильного хранения получили плоды черешни сортов Жемчужная и Гудзон (рис. 2).

Выводы

Данное исследование направлено на определение оптимальных способов и режимов низкотемпературного консервирования черешни. Хотя высокая сохранность изученных пищевых веществ в плодах исследованного сорта черешни наблюдалась после низкотемпературной обработки при $t = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$, другие примененные способы и режимы замораживания (россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и погружением в жидкий хладоноситель (водно-спиртово-сахарный раствор в соотношении 65:20:15) при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$) обеспечили хорошую стабильность нутриентного состава. Потери пищевых веществ в плодах всех сортов черешни после их низкотемпературной обработки россыпью в воздушной среде при $t = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и замораживания погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$, по сравнению с их сохранностью в плодах, замороженных в воздушной среде при $t = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$, составили в среднем 4,2–5, %. Наибольшее снижение нутриентного профиля плодов всех сортов было определено при их замораживании россыпью в воздушной среде морозильной камеры при $t = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наиболее оптимальными режимами и способами замораживания, обеспечивающими лучшую сохранность исходного биохимического состава плодов, для всех сортов



Примечание: стандартная ошибка среднего значения для общей дегустационной оценки составила 0,052–0,076 баллов

Рисунок 2. Общая дегустационная оценка свежих и замороженных плодов черешни: а – россыпью в воздушной среде при $t = -33^{\circ}\text{C}$; б – погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24^{\circ}\text{C}$ после 9 и 12 месяцев хранения при $t = -22^{\circ}\text{C}$

Figure 2. Sensory assessment of fresh and frozen cherries: a – in bulk in air at -33°C ; b – in liquid coolant at -24°C after 9 and 12 months of storage at -22°C

черешни является замораживание россыпью в воздушной среде при $t = -33^{\circ}\text{C}$ и погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24^{\circ}\text{C}$.

Сохранность сахаров в плодах черешни к концу 12 месяцев холодильного хранения составила в воздушной среде от 81,4 % (сорт Жемчужная) до 86,4 % (сорт Валерий Чкалов), в жидком хладоносителе от 80,3 % (сорт Жемчужная) до 84,7 % (сорт Лезгинка); пектиновых веществ в воздушной среде от 83,7 % (сорт Жемчужная) до 89,0 % (сорт Дагестанка), в жидком хладоносителе от 84,4 % (сорт Жемчужная) до 88,2 % (сорт Дагестанка); антоцианов в воздушной среде от 85,1 % (сорт Жемчужная) до 88,5 % (сорт Валерий Чкалов), в жидком хладоносителе от 83,8 % (сорт Жемчужная) до 87,5 % (сорт Лезгинка); витамина С в воздушной среде от 77,5 % (сорт Жемчужная) до

81,6 % (сорт Валерий Чкалов), в жидком хладоносителе от 75,9 % (сорт Жемчужная) до 79,0 % (сорт Валерий Чкалов). Количество титруемых кислот в плодах черешни, замороженных как россыпью в воздушной среде при $t = -33^{\circ}\text{C}$, так и погружением в жидкий хладоноситель при $t = -24^{\circ}\text{C}$, в течение всего периода хранения увеличилось. Рост кислотности в плодах черешни, в зависимости от сорта, к концу 12 месяцев хранения при $t = -22^{\circ}\text{C}$ составил от 12,3 % для сорта Крупноплодная до 17,1 % для сорта Жемчужная (воздушная среда) и от 15,1 % для сорта Дагестанка до 18,9 % для сорта Гудзон (жидкий хладоноситель).

Наименьшие потери клеточного сока в процессе дефростации, независимо от способа и режимов замораживания, определили в плодах черешни сортов Дагестанка, Валерий Чкалов и Лезгинка. У данных

сортов значения этого показателя к концу 12 месяцев холодильного хранения при $t = -22^\circ\text{C}$ варьировались в пределах 7,2–10,0 %. К концу эксперимента эти сорта, отличившиеся наибольшей сокоудерживающей способностью, получили высокие общие дегустационные оценки (4,4–4,7 балла).

Плоды всех изучаемых сортов черешни, выращиваемых в Дагестане, по комплексу органолептических и биохимических показателей качества, а также сокоудерживающей способности пригодны к низкотемпературному консервированию в течение 3, 9 и 12 месяцев хранения и распределены на три группы по уровню желательности Харрингтона. Наиболее пригодными к низкотемпературному замораживанию и длительному холодильному хранению в течение 12 месяцев при $t = -22^\circ\text{C}$ оказались плоды сортов Лезгинка, Дагестанка и Валерий Чкалов; ко второй группе отнесли плоды черешни сортов Буйнакская черная, Крупноплодная и Полянка, которые рекомендуется хранить до 9 месяцев. В третью группу вошли плоды черешни сортов Жемчужная и Гудзон, которые можно хранить без значительных изменений их исходных физико-химических и органолептических показателей до 3 месяцев при $t = -22^\circ\text{C}$.

Приемы замораживания изучаемых сортов черешни (россыпью в воздушной среде ($t = -33^\circ\text{C}$) и погру-

жением в жидкий хладоноситель ($t = -24^\circ\text{C}$)) являются оптимальными. Они обеспечивают высокую сохранность исходных физико-технологических, биохимических и органолептических показателей черешни в течение длительного холодильного хранения – 3, 9 и 12 месяцев при $t = -22^\circ\text{C}$.

Критерии авторства

Все авторы внесли равный вклад в получении экспериментальных данных и принимали участие в обработке, анализе и обобщении результатов исследований, а также в оформлении статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All authors contributed equally to the experimental work, data processing, analysis, and synthesis of research results, and bear equal responsibility for the information published in this paper.

Conflict of interest

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

References

1. Kodentsova VM, Vrzhesinskaya OA, Risnik DV, Nikityuk DB, Tutelyan VA. Micronutrient status of population of the Russian Federation and possibility of its correction. State of the problem. *Problems of Nutrition*. 2017;86(4):113–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2017-00067>
2. Kodentsova VM, Zhilinskaya NV, Shpigel BI. Vitaminology: From molecular aspects to improving technology of vitamin status children and adults. *Problems of Nutrition*. 2020;89(4):89–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10045>
3. Tutelyan VA, Nikityuk DB, Baturin AK, Vasiliev AV, Gapparov MMG, Zhilinskaya NV, *et al.* Nutriome as the direction of the “main blow”: Determination of physiological needs in macroand micronutrients, minor biologically active substances. *Problems of Nutrition*. 2020;89(4):24–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10039>
4. Johnson-Down L, Willows N, Kenny T-A, Ing A, Fediuk K, Sadik T, *et al.* Optimization modelling to improve the diets of First Nations individuals. *Journal of Nutritional Science*. 2019;8. <https://doi.org/10.1017/jns.2019.30>
5. Tam E, Keats EC, Rind F, Das JK, Bhutta ZA. Micronutrient supplementation and fortification interventions on health and development outcomes among children under-five in low-and middleincome countries: A systematic review and meta-analysis. *Nutrients*. 2020;12(2). <https://doi.org/10.3390/nu12020289>
6. Alloyarova YuV, Kolotova DS, Derkach SR. Nutritional and therapeutic potential of functional components of brown seaweed: A review. *Foods and Raw Materials*. 2024;12(2):398–419. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-616>
7. Melnichenko GA, Troshina EA, Platonova NM, Panfilova EA, Rybakova AA, Abdulkhabirova FM, *et al.* Iodine deficiency thyroid disease in the Russian Federation: The current state of the problem. Analytical review of publications and data of official state statistics (Rosstat). *Consilium Medicum*. 2019;21(4):14–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.26442/20751753.2019.4.190337>
8. Statsenko ES, Shtarberg MA, Borodin EA. Functional biscuits with soy protein. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(3):513–524. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2454>
9. Popova AYU, Tutelyan 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>
10. Praskova JuA, Kiseleva TF, Reznichenko IYu, Frolova NA, Shkrabtak NV, Lawrence Yu. Biologically active substances of *Vitis amurensis* Rupr.: Preventing premature aging. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(1):159–169. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-159-169>

11. Yeung AWK, Tzvetkov NT, Pirgozliev V, Zengin G, Wang D, Xu S, et al. The berries on the top. *Journal of Berry Research*. 2019;9(1):125–139.
12. Stepakova NN, Reznichenko IYu, Kiseleva TF, Shkrabtak NV, Frolova NA, Praskova YuA. Vegetable raw materials of the far eastern region as a source of biologically active substances. *Food Industry*. 2020;(3):16–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10025>
13. Akimov MYu. New breeding and technological evaluation criteria for fruit and berry products for the healthy and dietary food industry. *Problems of Nutrition*. 2020;89(4):244–254. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10057>
14. Akimov MYu, Bessonov VV, Kodentsova VM, Eller KI, Vrzhesinskaya OA, Beketova NA, et al. Biological value of fruits and berries of Russian production. *Problems of Nutrition*. 2020;89(4):220–232. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10055>
15. Guseynova BM, Asabutaev IH, Daudova TI. Effect of low-temperature preservation regimes on preservation of commercial qualities and nutrient composition of apricots taking into account varietal features and shelf life. *Storage and Processing of Farm Products*. 2021;(1):14–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.185>
16. Fedorenko VF, Mishurov NP, Kondratieva OV, Fedorov AD, Slinko OV. Analysis of the state and perspective directions of development of nursery and horticulture. *Moscow: Rosinformagrotech*; 2019. 88 p. (In Russ.). [Анализ состояния и перспективные направления развития питомниководства и садоводства / В. Ф. Федоренко [и др.]. М.: Росинформагротех, 2019. 88 с.].
17. Akulenko EG, Yagovenko GL. Assessment of adaptive potential of selected cherry varieties for the south of the Non-Black Earth region. *Horticulture and Viticulture*. 2022;(5):5–9. (In Russ.). <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2022-5-5-9>
18. Alekhina EM. Breeding evaluation of sweet cherry variety's forms on complex of economically valuable signs. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2019;(57):18–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2019-3-57-18-28>
19. Zaremuk RSh, Dolya YuA. Sweet cherry competitive varieties for the horticulture of the Krasnodar territory. *Horticulture and Viticulture*. 2021;(3):29–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2021-3-29-35>
20. Guseynova BM, Asabutaev IH, Daudova TI. Assessment of apricots suitability for shock freezing according to physical and technological quality indicators. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021;(1):74–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-1-74-83>
21. Kolodyaznaya VS, Rumyantseva ON, Kiprushkina EI. The history and the prospects of food refrigeration. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023;(1):47–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2023-22-1-47-54>
22. Adkison EC, Biasi WB, Bikoba V, Holstege DM, Mitcham EJ. Effect of canning and freezing on the nutritional content of apricots. *Journal of Food Science*. 2018;83(6):1757–1761. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14157>
23. Wani SM, Masoodi FA, Haq E, Ahmad M, Ganai SA. Influence of processing methods and storage on phenolic compounds and carotenoids of apricots. *LWT*. 2020;132. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109846>
24. Wani SM, Masoodi FA, Ahmad M, Mir SA. Processing and storage of apricots: Effect on physicochemical and antioxidant properties. *Journal of Food Science and Technology*. 2018;55(11):4505–4514 <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3381-x>
25. Deryabina SS, Kolodyaznaya BC. Quality of apricots frozen in liquid non-boiling coolants. *Production and Sale of Ice-Cream and Frozen Foods*. 2003;(2):34–37. (In Russ.). [Дерябина С. С., Колодязная В. С. Качество плодов абрикосов при замораживании в жидких некипящих хладоносителях // Производство и реализация мороженого и быстрозамороженных продуктов. 2003. № 2. С. 34–37.].

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 и требованиям к оформлению, проверяется оригинальность представленного текста с помощью интернет-ресурсов – www.antiplagiat.ru и www.ithenticate.com, 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 35–40 тыс. знаков (не включая списки литературы на русском и английском языках). Объем обзорной рукописи – более 40 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. 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 <https://fptt.ru> или отправив на e-mail fptt98@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 <https://fptt.ru>.

СОДЕРЖАНИЕ

Лутков И. П., Макаров А. С., Шмигельская Н. А. Исследование качества молодых игристых вин из крымских автохтонных сортов винограда	1
Шелудько О. Н., Прах А. В., Чемисова Л. Э., Бахметов Р. Н. Влияние винных и виноградных спиртов на качество напитков из виноградного сырья	18
Дмитриева А. И., Фасхутдинова Е. Р., Ларичев Т. А., Величкович Н. С., Богер В. Ю., Аксенова Л. М. Гидролиз и окисление труднорастворимых субстратов микробными изолятами термальных источников	27
Салена Л. А. К., Тан К. И. Л., Чанг Л. С., Пуи Л. П. Ферментативное разжижение и характеристика пюре из плодов <i>Mangifera laurina</i> Blume	38
Пухальский Я. В., Воробьев Н. И., Лоскутов С. И., Чукаева М. А., Глушаков Р. И., Бабыка А. В., Мещеряков Д. Д., Якубовская А. И. Нейросетевой анализ влияния внешних факторов на микроэлементный профиль и биомассу микрозелени <i>Brassica juncea</i> L.	48
Макаров С. С., Упадъшев М. Т., Сунгурова Н. Р., Токавина О. Н., Куликова Е. И., Кузнецова И. Б. Клональное микроразмножение лесных ягодных растений рода <i>Rubus</i>	60
Каледин А. П., Маловичко Л. В., Резанов А. Г., Дроздова Л. С., Серикбаева А. Т. Пищевой рацион перепела в осенний период в Ставропольском крае	71
Гойкович Цветкович В. С., Шкулетич Д. М., Марьянович-Балабан Ж. Р., Вуядинович Д. П., Раич Д. З., Томович В. М. Влияние на белки глинада частичной замены пшеничной муки в кексах мукой из киноа	83

Хвостов А. А., Магомедов Г. О., Рязских В. И., Журавлев А. А., Магомедов М. Г., Плотникова И. В., Таратухин А. С. Математическая модель процесса СВЧ и конвективной выпечки хлеба из сбивного теста	93
Бородулин Д. М., Шулбаева М. Т., Мусина О. Н., Сухоруков Д. В. Применение вертикальных вибрационных смесителей в технологии получения мучных смесей	104
Мунассар Е. Х. А., Шорсткий И. А. Сушка зернового материала с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда	116
Терехова О. Н., Дуюнова Я. С. Пневмоцентробежная классификация дисперсных частиц в процессе переработки зерна в муку	124
Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Параметры модульных микроволновых вакуум выпарных установок	135
Данилов М. Б., Лескова С. Ю., Пурбுவ А. В., Павлова С. Н., Забалуева Ю. Ю. Влияние антибактериального рассола на качество и микробиологическую безопасность продуктов из мяса	146
Смагина М. Н., Смагин Д. А. Температурные изменения в мясных изделиях при жарке в пароконвекционных печах	156
Черниченко С. Г., Котов Р. М. Экспресс-диагностика риска банкротства организаций на базе селективно-индикативной модели	167
Гусейнова Б. М., Мусаева Р. Т. Изучение пригодности к низкотемпературному консервированию плодов черешни	178

CONTENTS

Lutkov Igor P., Makarov Alexander S., Shmigelskaya Natalia A. Quality Assessment of Young Sparkling Wines of Crimean Indigenous Grape Varieties	2
Sheludko Olga N., Prakh Anton V., Chemisova Larisa E., Bakhmetov Roman N. Effect of Wine and Grape Spirits from Table Grape Varieties on Sensory Profile of Grape Beverages	19
Dmitrieva Anastasiya I., Faskhutdinova Elizaveta R., Larichev Timothy A., Velichkovich Natalia S., Boger Veronika Yu., Aksanova Larisa M. Hydrolysis and Oxidation of Recalcitrant Substrates by Microbial Isolates from Hot Springs	28
Saleena Lejaniya Abdul Kalam, Tan Kelly Yie Lin, Chang Lee Sin, Pui Liew Phing Enzymatic Liquefaction and Characterization of <i>Mangifera laurina</i> Blume	37
Puhalsky Yan V., Vorobyov Nikolai I., Loskutov Svyatoslav I., Chukaeva Mariia A., Glushakov Ruslan I., Babyka Andrew V., Meshcheriakov Denis D., Yakubovskaya Alla I. Effect of External Factors on Trace Element Profile and Biomass of Mustard (<i>Brassica juncea</i> L.) Microgreens: Neural Network Analysis	49
Makarov Sergey S., Upadyshv Mikhail T., Sungurova Natalia R., Tyukavina Olga N., Kulikova Elena I., Kuznetsova Irina B. Clonal Micropropagation of Wild Berry Plants of the Genus <i>Rubus</i>	61
Kaledin Anatoly P., Malovichko Lyubov V., Rezanov Alexander G., Drozdova Lyudmila S., Serikbayeva Andiya T. Quails of Stavropol Region: Autumn Food Habits	72

Gojković Cvjetković Vesna S., Škuletić Dragana M., Marjanović-Balaban Željka R., Vujadinović Dragan P., Rajić Danijela Z., Tomović Vladimir M. Gliadin Proteins in Muffins with Quinoa Flour	82
Khvostov Anatoly A., Magomedov Gazibeg O., Ryazhskih Victor I., Zhuravlev Aleksey A., Magomedov Magomed G., Plotnikova Inessa V., Taratukhin Aleksei S. Microwave-Convection Processing of Whipped Bread: Mathematical Modeling	94
Borodulin Dmitry M., Shulbaeva Margarita T., Musina Olga N., Sukhorukov Dmitry V. Vertical Vibratory Mixers in Flour-Mixing Technology	105
Mounasar Emad H.A., Shorstkii Ivan A. Drying Grain Pretreated by Low-Voltage Spark-Discharge Plasma Channel	117
Terekhova Olga N., Duyunova Yana S. Pneumocentrifugal Classification of Dispersed Particles during Grain Milling	125
Gavrilov Alexander V., Gerber Yuriy B. Parameters of Modular Microwave Vacuum Evaporators	136
Danilov Mikhail B., Leskova Svetlana Yu., Purbuev Aldar V., Pavlova Svetlana N., Zabalueva Yuliya Yu. Effect of Antibacterial Brine on Quality and Microbiological Safety of Meat Products ...	147
Smagina Marina N., Smagin Denis A. Temperature Changes in Meat Products Fried in Steam-Convection Oven	157
Chernichenko Svetlana G., Kotov Roman M. Express Diagnostics of Bankruptcy Risks Based on a Selective-Indicative Model	168
Guseynova Batuch M., Musaeva Ragima T. Low-Temperature Preservation of Cherries	179