



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

ВОСТОЧНО - СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

(Вестник ВСГУТУ)

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»
(ВСГУТУ)

ВЕСТНИК
Восточно-Сибирского государственного
университета технологий и управления
(Вестник ВСГУТУ)

Научно-технический журнал

№ 1 (96)

Улан-Удэ
Издательство ВСГУТУ
2025

12+

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ВЕСТНИК
Восточно-Сибирского государственного университета
технологий и управления
(Вестник ВСГУТУ)

2025

январь-март

№ 1 (96)

ISSN 2413-1997

Учредитель

ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет
технологий и управления»

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-74738

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций 29 декабря 2018 г.

Главный редактор

Д.В. Шалбуев, д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора

Б.А. Баженова, д-р техн. наук, проф.

С.С. Ямпиров, д-р техн. наук, проф.

Редакционная коллегия

Э.Б. Битуева, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); М.Б. Данилов, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); Д. Дашижамц, д-р техн. наук, проф., акад. МАН (МГУНТ, Монголия); Э.В. Жалнин, д-р техн. наук, проф. (ВНИИМСХ, Москва); С.Д. Жамсаранова, д-р биол. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); М.П. Калашиников, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); С.М. Коротов, д-р наук, проф. (МДУ, Швеция); В.А. Кравчук, д-р техн. наук, проф. (ТОГУ, Хабаровск); В.С. Лесовик, д-р техн. наук, проф. (БГТУ, Белгород); С.А. Лхасаранов, канд. техн. наук (ВСГУТУ, Улан-Удэ); Б.Д. Лыгденов, д-р техн. наук, доц. (УТУ, Китай); А.А. Майоров, д-р техн. наук, проф. (СибНИИС РАСХН, Барнаул); С.Н. Максимова, д-р техн. наук, проф. (Дальрыбвтуз, Владивосток); Н.И. Овчинникова, д-р техн. наук, проф. (ИрГАУ, Иркутск); Д.Н. Раднаев, д-р техн. наук, доц. (БГСХА, Улан-Удэ); Л.А. Урханова, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); В.Е. Rogov, д-р техн. наук, доц. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); Т.С. Дембелова, д-р техн. наук, вед. науч. сотр. (ИФМ СО РАН, Улан-Удэ); Б.Б. Бадмаев, д-р техн. наук, доц. (ВСГУТУ, Улан-Удэ).

Журнал «Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по следующим специальностям с 07.03.2023: 4.3.3 – Пищевые системы (технические науки), 4.3.5 – Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ ((биологические науки, технические науки), 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки), с 01.02.2022: 2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки), с 08.07.2024: 1.3.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника (технические науки).

Электронная версия размещается на сайте vestnik.esstu.ru

Журнал представлен в НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (НЭБ)

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в базу данных EBSCOPUBLISHING (USA) и ЭБС ООО «ЛАНЬ»

Адрес редакции: 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1.

Телефон: (3012) 417234; 89021676994; факс: (3012) 417150; e-mail: vestnikvsgutu@mail.ru, office@esstu.ru

Подписной индекс в каталоге «Электронное подписное агентство» АО Почта России – ПН190.

© ВСГУТУ, 2025

Содержание

4.3.3 – ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ (БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	6
Золотарёва А.М., Жамбалова Е.А., Шотхонова Я.Л. Влияние органических кислот облепихового сока на автолитическую активность ржаной муки	6
Ражина Е.В., Смирнова Е.С., Неверова О.П., Горелик О.В., Лопаева Н.Л., Хайрова И.М. Использование любистка лекарственного в производстве кисломолочного продукта.....	13
Масанский С.Л., Пинчукова Ю.М. Голубика высокорослая в школьном питании: структурно-аналитическое моделирование потребительских свойств	23
4.3.5 – БИОТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	35
Рухляда К.А., Матъщина В.В. Подбор оптимальных параметров для экстракции каротиноидов из бурых водорослей <i>Fucus vesiculosus</i> и определение антиоксидантной активности экстракта	35
Табакаева О.В., Капуста С.В., Табакаев А.В., Тихонов С.Л. Ферментативный гидролиз морских бурых водорослей <i>Ascophyllum nodosum</i> и <i>Undaria pinnatifida</i> : подбор условий для эффективного извлечения полифенолов	43
Разумовская Е.С., Милентьева И.С. Моделирование гидролиза животного белка эндопротеазами <i>in silico</i>	55
4.3.1 – ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	64
Мяло О.В., Мяло В.В. Совершенствование процесса управления автомобильной мойки с использованием нейросетевых технологий	64
Ямпилев С.С., Нехуров Н.А., Балданов В.Б., Хандакова Г.Ж., Жигжитов А.О. Техническое зрение в сортировке и анализе зерна.....	74
2.1.5 – СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	81
Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Романов Н.К. Исследование степени полимеризации высокодисперсного модификатора на основе целлюлозы для строительных композитов	81
Урханова Л.А., Добрынин Д.В., Лхасаранов С.А., Березовский П.В. Улучшение физико-механических свойств бетона микродобавками неорганических солей.....	91
1.3.14 – ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	100
Крылов В.А., Волков С.М., Баранов И.В., Тамбулатова Е.В., Федоров А.В. Изучение изменений удельной теплоемкости нерафинированных растительных масел от жирнокислотного состава и температуры	100
Ковтунец Е.В., Спиридонова Т.С., Тушинова Ю.Л., Базарова Ц.Т., Логвинова А.В., Базаров Б.Г. $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$: термические деформации и ионная проводимость	112
Правила оформления статей для журнала «Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления» (Вестник ВСГУТУ).....	123

Contents

4.3.3 – FOOD SYSTEMS (BIOLOGICAL SCIENCES, TECHNICAL SCIENCES)	6
Zolotaryova A.M., Zhambalova E.A., Shotkhonoeva Ya.L. EFFECT OF SEA BUCKTHORN JUICE ORGANIC ACIDS ON RYE FLOUR AUTOLYTIC ACTIVITY	6
Razhina E.V., Smirnova E.S., Neverova O.P., Gorelik O.V., Lopayeva N.L., Khairova I.M. USE OF LOVAGE IN FERMENTED MILK PRODUCTS	13
Masanskiy S.L., Pinchukova Yu.M. BLUEBERRY IN SCHOOL MEALS: STRUCTURAL AND ANALYTICAL MODELING OF CONSUMER PROPERTIES	23
4.3.5 – BIOTECHNOLOGY OF FOOD PRODUCTS AND BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES (BIOLOGICAL SCIENCES, TECHNICAL SCIENCES)	35
Rukhlyada K.A., Matytsina V.V. SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF CAROTENOIDS EXTRACTION FROM BROWN ALGAE <i>FUCUS VESICULOSUS</i> AND DETERMINATION OF ANTIOXIDANT ACTIVITY OF THE EXTRACT	35
Tabakaeva O.V., Kapusta S.V., Tabakaev A.V., Tikhonov S.L. ENZYMATIC HYDROLYSIS OF MARINE BROWN ALGAE ASCOPHYLLUM NODOSUM AND UNDARIA PINNATIFIDA: CONDITIONS FOR EFFECTIVE POLYPHENOL EXTRACTION.....	43
Razumovskaya E.S., Milentyeva I.S. MODELING OF ANIMAL PROTEIN HYDROLYSIS BY ENDOPROTEASES IN SILICO	55
4.3.1 – TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (TECHNICAL SCIENCES)	64
Myalo O.V., Myalo V.V. IMPROVEMENT OF CAR WASH CONTROL USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES.....	64
Yampilov S.S., Nekhurov N.A., Baldanov V.B., Khandakova G.Zh., Zhigzhitov A.O. TECHNICAL VISION IN GRAIN SORTING AND ANALYSIS.....	74
2.1.5 – CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS (TECHNICAL SCIENCES)	81
Lukuttsova N.P., Karpikov E.G., Romanov N.K. INVESTIGATION OF POLYMERIZATION DEGREE OF HIGHLY DISPERSED CELLULOSE-BASED MODIFIER FOR CONSTRUCTION COMPOSITES.....	81
Urkhanova L.A., Dobrynin D.V., Lkhasaranov S.A., Berezovsky P.V. IMPROVEMENT OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH MICROADDITIONS OF INORGANIC SALT	91
1.3.14 – THERMOPHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING (TECHNICAL SCIENCES) MELTING BASALT FROM THE YENHOR DEPOSIT	100
Krylov V.A., Volkov S.M., Baranov I.V., Tambulatova E.V., Fedorov A.V. STUDY OF CHANGES IN SPECIFIC HEAT CAPACITY OF UNREFINED VEGETABLE OILS DEPENDING ON FATTY ACID COMPOSITION AND TEMPERATURE	100
Kovtunets E.V., Spiridonova T.S., Tushinova Yu.L., Bazarova T.T., Logvinova A.V., Bazarov B.G. $K_5Ca_{0.5}Hf_{1.5}(MoO_4)_6$: THERMAL DEFORMATIONS AND IONIC CONDUCTIVITY	112

ПОЗДРАВЛЕНИЯ



6 февраля 2025 года в правительстве Бурятии состоялось торжественное награждение лауреатов Государственной премии республики.

Заведующая кафедрой «Технология продуктов животного происхождения. Товароведение» ВСГУТУ д-р техн. наук, профессор Баяна Анатольевна Баженова. Баяна Анатольевна удостоилась награды в области образования за цикл работ по методологии создания продуктов здорового питания согласно Указу Главы Бурятии.

Общий стаж работы во ВСГУТУ Баяны Анатольевны составляет 36 лет, научно-педагогический – 33 года. После окончания с отличием Восточно-Сибирского технологического института в 1986 году (ленинский стипендиат) Баяна Анатольевна была распределена на кафедру «Технология мяса и мясных продуктов», где и работает по настоящее время. В 2015 году на основе

защиты докторской диссертации была присуждена ученая степень доктора технических наук, в 2018-м было присвоено ученое звание профессора.

Уважаемая Баяна Анатольевна, примите искренние поздравления по случаю вручения Вам Государственной премии Республики Бурятия в области образования. Эта награда – достойная оценка Вашей плодотворной профессиональной деятельности и значимого вклада в развитие АПК нашего региона.

Разделяем с Вами радость нынешнего успеха и гордимся, что работаем вместе.

Уважаемая Баяна Анатольевна, эта государственная награда является признанием Ваших заслуг, свидетельством высокого профессионализма, компетентности, ответственности и умения эффективно решать поставленные задачи, а также свидетельством важности дела, которому Вы посвятили свою жизнь.

Искренне рады, что Ваш профессионализм и кропотливый труд получили достойную оценку общества и руководства республики.

От всей души поздравляем с заслуженной наградой! Желаем Вам новых побед, достижений и дальнейших успехов в профессиональной деятельности!

*Главный редактор
проф. Д.В. Шалбуев*

4.3.3 – ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ (БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

DOI 10.53980/24131997_2025_1_6

А.М. Золотарёва, д-р техн. наук, проф., e-mail: thhp@esstu.ru

Е.А. Жамбалова, студент

Я.Л. Шотхоноева, студент

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ

УДК 664.8: 664.1: 664.6

**ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ ОБЛЕПИХОВОГО СОКА
НА АВТОЛИТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ РЖАНОЙ МУКИ**

Большую группу в ассортименте хлеба занимают изделия из ржаной муки. Ржаная мука по своим хлебопекарным свойствам существенно уступает характеристикам пшеничной муки вследствие существенного различия углеводно-амилазного комплекса. В статье представлены результаты экспериментальных исследований изменения автолитических свойств ржаной муки под воздействием органических кислот облепихового сока. Представлено обоснование возможности использования органических кислот облепихового сока при производстве ржаных изделий. Исследован амилолитический комплекс модифицированной ржаной муки. Повышенная кислотность облепихового сока дает возможность достижения достаточной пептизации белков ржаной муки и инактивации α -амилазы, благоприятно влияя на реологические свойства теста и качество готовых изделий.

Ключевые слова: обдирная ржаная мука, облепиховый сок, органическая кислота, кислотность, амилолитические ферменты.

A.M. Zolotaryova, Dr. Sc. Engeneering, Prof.

E.A. Zhambalova, student

Ya.L. Shotkhonoeva, student

East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude

**EFFECT OF SEA BUCKTHORN JUICE ORGANIC ACIDS
ON RYE FLOUR AUTOLYTIC ACTIVITY**

Large groups in the bread assortment are rye flour products. Rye flour baking properties are significantly inferior to wheat flour characteristics due to difference in carbohydrate-amylase complex. The article presents the experimental results of changes in the autolytic properties of rye flour under the influence of sea buckthorn juice organic acids. The study presents an argument for using organic acids of sea buckthorn juice in rye products. The amyolytic complex of modified rye flour has been studied. The increased acidity of sea buckthorn juice makes it possible to achieve sufficient peptization of rye flour proteins and inactivation of α -amylase, favorably affecting rheological properties of dough and the quality of finished products.

Key words: rye flour, sea buckthorn juice, organic acid, acidity, amyolytic enzymes.

Введение

В настоящее время хлеб и хлебобулочные изделия занимают исключительное место в рационе здорового человека. Большую группу в ассортименте хлеба занимают изделия с использованием ржаной муки, которая с точки зрения пищевой ценности по сравнению с пшеничной мукой характеризуется повышенным содержанием незаменимых аминокислот, витаминов группы В, минеральных элементов и пищевых волокон [1–3].

В литературе приводятся сведения, что ржаная мука по сравнению с пшеничной мукой содержит в 2–5 раз больше собственных сахаров. Особенностью углеводов ржаной муки является то, что она содержит 2,8 % водорастворимых коллоидных полифруктозидов, что в два с

лишним раз больше, чем в пшеничной муке. Подобное соотношение сохраняется и в отношении водорастворимых пентозанов (слизей) [4]. Водорастворимые коллоиды, обладая высокой гидрофильностью, участвуют в формировании структурно-механических свойств ржаного теста [5].

Поэтому хлебопекарные свойства ржаной муки определяются в первую очередь состоянием ее углеводно-амилазного комплекса. Известно, что крахмал ржи начинает клейстеризоваться при температуре 52–55 °С, что значительно ниже, чем для крахмала пшеничной муки, которая составляет 60–67 °С. Основным показателем, характеризующим хлебопекарные свойства ржаной муки, является автолитическая активность – способность образовывать водорастворимые вещества под действием собственных ферментов. Ржаная мука по своим хлебопекарным свойствам существенно уступает характеристикам пшеничной муки вследствие большого различия их углеводно-амилазного и белково-протеиназного комплекса. Атакуемость крахмала ржаной муки амилолитическими ферментами выше, чем пшеничной [6].

Амилазы гидролизуют крахмал в процессе брожения теста, вследствие чего тестовая заготовка может оказаться неспособной связать влагу в тесте. Наличие части свободной влаги, не связанной крахмалом, будет делать мякиш хлеба влажным на ощупь. Наличие большого количества α -амилаз приводит к накоплению значительного количества декстринов, неблагоприятно воздействующих на органолептические свойства готового хлеба, поскольку по сравнению с крахмалом декстрины плохо набухают в воде [7].

Таким образом, изучение способов корректировки хлебопекарных свойств ржаной муки является актуальным в области научных исследований с целью улучшения реологических свойств полуфабрикатов и качества готовых изделий.

Цель данной работы – определение влияния органических кислот облепихового сока на амилазный комплекс ржаной муки.

Материалы и методы исследований

Объектами исследования выступали ржаная обдирная мука (ГОСТ 7045-17) и облепиховый сок. Облепиховый сок – витаминсодержащее и маслянистое сырье, имеющее промышленное значение. В настоящее время в облепиховом соке установлено наличие 10 витаминов, из которых 6 водорастворимых и 4 жирорастворимых, каротиноиды, в небольших количествах никотиновая и фолиевая кислоты, токоферолы, филлохиноны.

Одним из важнейших показателей, определяющих качество плодов, является маслянистость, которая колеблется от 1,89 до 13,70 % для свежих плодов. Минеральный состав характеризуется 15 микроэлементами, среди которых железо, магний, алюминий, цинк, кобальт, марганец, медь и другие, а также соли натрия, калия и кальция.

Известно, что масло облепихи обладает менее агрессивным кислотным воздействием на белок по сравнению с лимонным соком и уксусом столовым. В сочетании с вязкой и обволакивающей структурой, наличием жирных кислот высокое содержание органических кислот (1,04...4,46 %) и сахаров (1,00...3,26 %), состав которых неоднороден, определяет использование облепихового сока в качестве ценного пищевого сырья.

Из вышеизложенного следует, что в настоящий момент сравнительно хорошо известен химический состав облепихового сока, который является ценным маслянистым и витаминным сырьем, имеющим промышленное значение [8].

Кислотность определяли по ГОСТ 5670-96 «Хлебобулочные изделия. Методы определения кислотности». Определение активности амилолитических ферментов проводили по ГОСТ 20264.4-89 и ГОСТ Р 54330-2011.

Результаты исследования и их обсуждение

Сложность регулирования качества ржаной муки связана с недостаточным объемом исследований по изучению механизмов формирования и созданию новых способов улучшения

хлебопекарных свойств ржаной муки [9]. Для того чтобы регулировать автолитические процессы в производстве хлеба, необходимо знать свойства ферментов муки, действующих на белки, крахмал и другие ее компоненты [9–11].

В ржаной муке нормального качества всегда содержится α -амилаза, что значительно влияет на ее хлебопекарные свойства. β -амилаза способствует накоплению сахаров, необходимых для спиртового брожения в тесте, и расщепляет крахмал до декстринов, образуя значительное количество мальтозы [12].

Наличие же α -амилазы, особенно при недостаточной кислотности ржаного теста, приводит к накоплению значительного количества декстринов, придающих хлебному мякишу липкость. Повышенная активность α -амилазы в ржаной муке обычно является основной причиной дефектности ржаного хлеба, влияя на реологические свойства мякиша. Тесто из такой муки в процессе брожения быстро и сильно разжижается. Хлеб имеет интенсивно окрашенную корку и липкий, легко заминающийся мякиш. Структура готового ржаного изделия, особенно подового, характеризуется расплывчатой формой. Поэтому очень важно знать автолитическую активность муки, которая показывает активность амилаз [13–15].

Известно, что при производстве хлеба из ржаной муки применяют различные способы регулирования кислотности, например закваски и подкислители, которые являются средством регулирования кислотности теста [9, 16, 17].

Ценность облепихи определяется прежде всего высокими пищевыми и лечебными свойствами плодов [18]. В облепиховом соке содержатся различные биологически активные вещества: каротиноиды, токоферолы, фосфолипиды, бетаин, серотонин, белковые вещества, сахара, жирные масла, макро- и микроэлементы. Отличительной особенностью облепихового сока является наличие значительного количества органических кислот, таких как яблочная, фитиновая, хинная, лимонная, галактуроновая, винная [19–20].

В эксперименте было исследовано влияние облепихового сока на кислотонакопление в ржаной муке. Исследуемыми образцами являлись ржаная мука с введением 10, 20, 30 % облепихового сока.

Динамика кислотообразования представлена на рисунке 1.

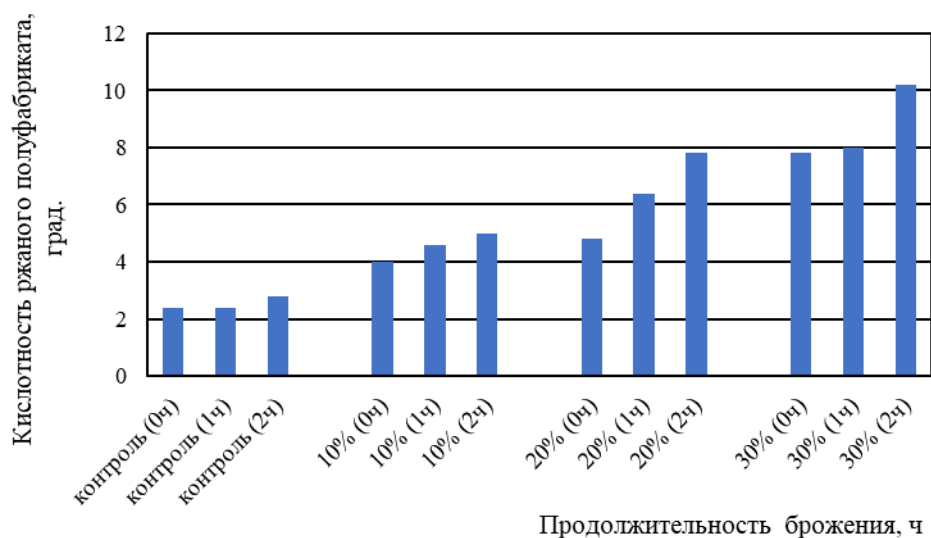


Рисунок 1 – Влияние расхода облепихового сока на кислотонакопление в ржаном полуфабрикате

Следуя полученным результатам, можно сделать вывод, что чем продолжительнее время выдержки образцов, тем выше их кислотность. При введении 20 % облепихового сока

наблюдалось увеличение значения кислотности в ржаном полуфабрикате более чем на 50 % по сравнению с контролем.

Установлено, что оптимальный расход облепихового сока для обработки ржаной муки составил 20 %, тогда как при увеличении до 30 % наблюдалось не только ингибирующее влияние на активность дрожжей *Saccharomyces Cerevisiae*, но и изменение органолептических свойств ржаной муки, а именно появление выраженного запаха облепихи, кислого привкуса и оранжевого оттенка готовой продукции.

Экспериментально было изучено изменение активности амилолитических ферментов при введении облепихового сока (рис. 2, 3). Анализ данных, представленных на рисунке 2, показал, что при введении 10 % облепихового сока для обработки ржаной муки кислотонакопление было недостаточным для инактивации α -амилазы.

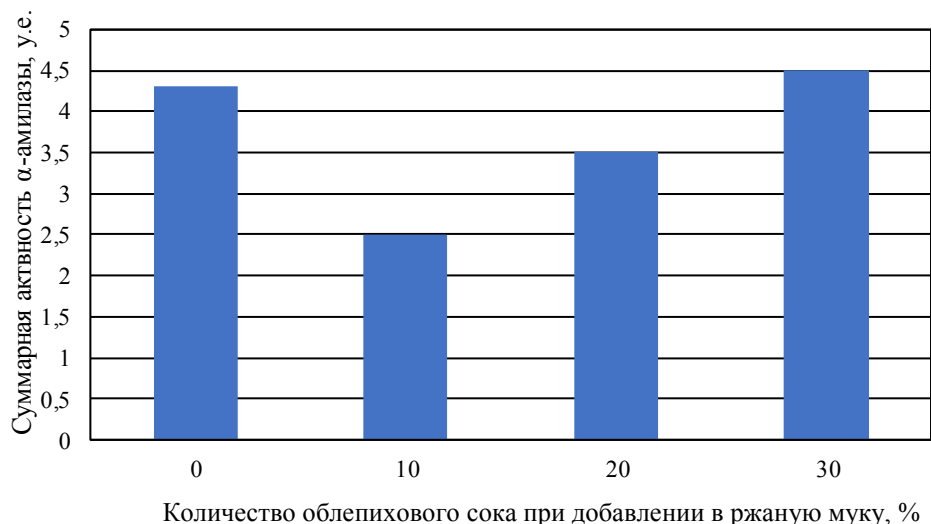


Рисунок 2 – Суммарная активность амилаз в ржаной муке при добавлении облепихового сока

Суммарная активность амилаз в ржаной муке показала, что при добавлении облепихового сока в количестве 10 %, наблюдалось снижение активности α - и β -амилаз по сравнению с контрольным образцом, однако при увеличении количества сока до 20 и 30 % отмечалось повышение суммарной амилазы в среднем на 56 %. Исходя из этого, можно отметить, что применение облепихового сока как инактиватора амилолитических свойств ржаной муки действительно возможно.

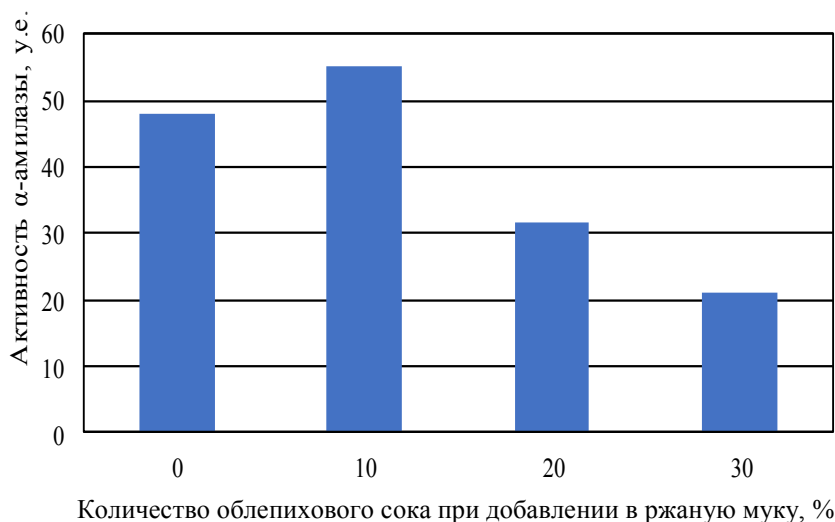


Рисунок 3 – Активность α -амилазы

Начальная активность α -амилазы образцов теста с облепиховым соком была равна 55 у.е. Подавляющее действие облепихового сока при увеличении его дозировки подтверждается достижением конечной активности α -амилазы 21 у.е., что на 27 у.е. меньше, чем для контрольного варианта.

В результате проведенных исследований были получены данные о влиянии облепихового сока на амилазный комплекс ржаной муки. Установлено, что при введении облепихового сока в ржаной муке значительно снижалась активность амилазных ферментов. При добавлении 30 % облепихового сока кислотность превышала допустимые значения 5 град., согласно ГОСТ 7045-90, что могло отрицательно сказаться на органолептических показателях теста. В эксперименте было установлено, что активность α -амилазы ржаной муки при внесении облепихового сока 20 % снижалась в 2 раза, что было наиболее оптимальным.

Обобщенные результаты использования в контакте облепихового сока с ржаной мукой свидетельствовали о значительном улучшении качественных параметров ржаной муки и готовых изделий.

Заключение

На основании проведенных исследований обосновано совместное использование ржаной обдирной муки и облепихового сока при обработке ржаной муки, которые способствуют повышению качества и пищевой ценности готовой продукции.

При введении 20 % облепихового сока наблюдалось увеличение значения кислотности в ржаном полуфабрикате более, чем на 50 % по сравнению с контролем. Установлено, что оптимальный расход облепихового сока для обработки ржаной муки составил 20 %, тогда как при увеличении до 30 % наблюдалось не только ингибирующее влияние на активность дрожжей *Saccharomyces Cerevisiae*, но и изменение органолептических свойств ржаной муки, а именно появление выраженного запаха облепихи, кислого привкуса и оранжевого оттенка готовой продукции.

Повышенная кислотность дает возможность инактивации действия α -амилазы, снижая не только атакуемость крахмала ржаной муки амилазными ферментами, но и процесс гидролиза крахмала, что благоприятно влияет на реологические свойства теста и качество готового изделия.

Библиография

1. Мингалеева З.Ш., Старовойтова О.В. Производство хлеба хлебобулочных изделий: учеб. пособие. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. – С. 104.
2. Козлова Т.С., Марзаева М.Х., Первушин Д.Л. Разработка новых продуктов переработки ржи и создание функциональных продуктов питания на их основе // Вестник ВСГУТУ. – 2014. – № 3. – С. 74.
3. Cena H., Calder P.C. Defining a Healthy Diet: Evidence for the Role of Contemporary Dietary Patterns in Health and Disease // *Nutrients*. – 2020. – Vol. 12 (2). – P. 334–349. – URL: <https://doi.org/10.3390/Nu12020334>
4. Носова М.В., Дремучева Г.Ф. Исследования хлебопекарных свойств муки ржаной хлебопекарной обдирной, поставляемой на хлебопекарные предприятия РФ // *Хранение и переработка сельхоз. сырья*. – 2023. – № 1. – С. 69–82.
5. Аверьянова Е.В. Биологическая ценность облепихи как основа ее комплексной безотходной переработки // *Современная наука и инновации*, 2018. – Т. 23, № 3. – С. 104–111.
6. Романов А.С., Давыденко Н.И. Экспертиза хлебобулочных изделий – СПб., 2021. – С. 314.
7. Johnson J., Wallace T. Whole grains and their biologically active substances: Composition and health benefits. – John Wiley & Sons Ltd., 2019. – URL: <https://doi.org/10.1002/9781119129486>
8. Козак В., Бульдьева О.А. Анализ различий целебных свойств осветленного сока и масла облепихи. – Тюмень, 2023. – URL: <https://infourok.ru/issledovatelskaya-rabota-izuchenie-oblepikhovogo-soka-6515039.html>

9. *Hamaker B.R.* Technology of functional grain products. – Woodhead Publishing, 2007.
10. Патент SU 1 789 167 A1 СССР, МПК51 A21D 8/02. Способ приготовления теста для хлебных изделий / Траубенберг С.Е., Милорадова Е.В., Ляшенко Е.В., Соловьева В.В., Мамедова Д.Р.; заявитель: Московский технологический институт пищевой промышленности. № 4897403; заявл. 1990.12.28; опубл. 1993.01.23.
11. Department of Health, Government of Victoria, Australia. (2020). Cereals and whole grain products – A channel about better health. – URL: <https://www.betterhealth.vic.gov.au/health/healthyliving/cereals-and-wholegrain-foods> (дата обращения: 27.06.2022).
12. *Манжесов В.И., Тертычная Т.Н., Калашиникова С.В.* Технология переработки продукции растениеводства. – М.: Колос, 2016. – 809 с.
13. Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 26 июня 2016 г. № 1364-р // Собр. законодательства РФ. – 2016. – 11 июля. – Ст. 4758.
14. *Костюченко М.Н., Шапошников И.И., Косован А.П.* Проблемы развития рынка хлебобулочных изделий с использованием ржаной муки в Российской Федерации // Хлебопродукты. – 2020. – № 8. – С. 6–10.
15. *Романов А.С. [и др.]*. Современные технологии приготовления теста на хлебопекарных предприятиях: учеб. пособие. – Кемерово: Изд-во КемТИПП, 2015. – 270 с.
16. *Вершинина О.Л., Гончар В.В., Росляков Ю.Ф.* Развитие естественной заквасочной культуры ржаной симбиотики для выпечки // Хлебные изделия. – 2016. – № 2. – С. 40–42.
17. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 года: распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2009 г. № 2094-р // Собр. законодательства РФ. – 2010. – 25.01. – Ст. 421.
18. *Шириннибуева Б.Ц., Мяханова Н.Т., Будаева Н.А.* Интенсивные сорта облепихи бурятской селекции // Современное садоводство. – 2014. – № 3 (11). – С. 60–64.
19. *Тарасенко Н.А., Быкова Н.С., Никонович Ю.Н.* Виды нетрадиционного растительного сырья и его использование // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2016. – № 5–6 (353–354). – С. 6–9.
20. *Дугарова И.К., Жалсараева Б.Д., Шотхоноева Я.Л.* К вопросу об эффективном использовании вторичных сырьевых ресурсов облепихи // Вестник ВСГУТУ. – 2023. – № 1. – С. 5–13.

Bibliography

1. *Mingaleeva Z.Sh., Starovoytova O.V.* Production of bread and bakery products textbook – Kazan: KNITU Publishing House, 2016. – 104 p.
2. *Kozlova T.S., Marzaeva M.Kh., Pervushin D.L.* Development of new rye processing products and creation of functional food products based on them // ESSUTM Bulletin. – 2014. – N 3. – P. 74.
3. *Cena H., Calder P.C.* Defining a healthy diet: evidence for the role of contemporary dietary patterns in health and disease // Nutrients. – 2020. – Vol. 12 (2). – P. 334–349. – URL: <https://doi.org/10.3390/nu12020334>
4. *Nosova M.V., Dremucheva G.F.* Studies of baking properties of rye baking flour, supplied to bakery enterprises of the Russian Federation // Storage and Processing of Farm Products. – 2023. – N 1 – P. 69–82.
5. *Averyanova E.V.* Biological value of sea buckthorn as basis for its complex waste-free processing // Modern Science and Innovations. – 2018. – Vol. 23, N 3. – P. 104–111.
6. *Romanov A.S., Davydenka N.I.* Bakery products expertise – St. Petersburg, 2021. – P. 314.
7. *Johnson J., Wallace T.* Whole grains and their biologically active substances: Composition and health benefits. – John Wiley & Sons Ltd, 2019. – URL: <https://doi.org/10.1002/9781119129486>
8. *Kozak V., Buldyaeva O.A.* Analysis of differences in the healing properties of clarified juice and sea buckthorn oil. – Tyumen, 2023. – URL: <https://infourok.ru/issledovatelskaya-rabota-izuchenie-oblepihovogoso-soka-6515039.html>
9. *Hamaker B.R.* Technology of functional grain products. – Woodhead Publishing, 2007.

10. Patent SU 1,789,167 A1 USSR, MPK51 A21D 8/02. The method of preparing dough for bread products / Traubenberg S.E., Miloradova E.V., Lyashenko E.V., Solovyova V.V., Mammadova D.R. – Applicant: Moscow Technological Institute of Food Industry. – Application N 4897403, appl. 28.12.1990, publ. 23.01.1993.
11. Department of Health, Government of Victoria, Australia. (2020). Cereals and whole grain products – A channel about better health. URL: <https://www.betterhealth.vic.gov.au/health/healthyliving/cereals-and-wholegrain-foods> (access date 27.06.2022).
12. *Manzhesov V.I., Tertychnaya T.N., Kalashnikova S.V.* Technology of crop production processing. – M.: Kolos Publishing House, 2016. – 809 p.
13. On approval of the Strategy for improving food products quality in the Russian Federation until 2030: Decree of the Government of the Russian Federation dated June 26, 2016 N 1364-r // Collection of Legislation of the Russian Federation, 2016. – July 11 – Art. 4758.
14. *Kostyuchenko M.N., Shaposhnikov I.I., Kosovan A.P.* Development problems of market of bakery products with rye flour in the Russian Federation // *Khleboproducty*. – 2020. – N 8. – P. 6–10.
15. *Romanov A.S. [et al.]*. Modern technologies of dough preparation at bakeries: textbook. – Kemerovo: KemTIFI, 2015. – 270 p.
16. *Vershinina O.L., Gonchar V.V., Roslyakov Yu.F.* The development of a natural starter culture of rye symbiotics for baking // *Khleboproducty*, 2016. – N 2. –P. 40–42.
17. On approval of the Strategy of socio-economic development of the Far East and the Baikal region for the period up to 2025: Decree of the Government of the Russian Federation dated December 28, 2009 N 2094-r // Collection of Legislation of the Russian Federation, 2010. – 25.01. – Art. 421.
18. *Shiripnibueva B.Ts, Myakhanova N.T., Budaeva N.A.* Intensive varieties of sea buckthorn of Buryat breeding // Contemporary horticulture. – 2014. – N 3 (11). – P. 60–64.
19. *Tarasenko N.A. Bykova N.S., Nikonovich Yu.N.* Types of non-traditional vegetable raw materials and their use // *Izvestia vuzov. Food Technology*. – 2016. – N 5–6 (353–354). – P. 6–9.
20. *Dugarova I.K., Zhalsaraeva B.D., Shotkhonoeva Ya.L.* Study on the effective use of secondary sea-buckthorn raw material resources // *ESSUTM Bulletin*. – 2023. – N 1. – P. 5–13.

DOI 10.53980/24131997_2025_1_13

Е.В. Ражина, канд. биол. наук, доц., e-mail: eva.mats@mail.ru
Е.С. Смирнова, канд. с.-х. наук, e-mail: ekaterina-kazantseva@list.ru
О.П. Неверова, канд. биол. наук, e-mail: opneverova@mail.ru
О.В. Горелик, д-р с.-х. наук, e-mail: olgao205en@yandex.ru
Н.Л. Лопалева, канд. биол. наук, e-mail: lopaeva77@mail.ru
И.М. Хайрова, ст. преподаватель, e-mail: khairova70@mail.ru
Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург

УДК 637.146

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЮБИСТКА ЛЕКАРСТВЕННОГО В ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОМОЛОЧНОГО ПРОДУКТА

В статье представлены результаты разработки рецептуры, технологии изготовления и контроля качества кисломолочных продуктов с внесением сока любистка лекарственного разной концентрации. В качестве обогатителя был выбран сок растения, обладающий высокой биологической ценностью. В составе натурального сока сохранены сахара и аскорбиновая кислота, которые в совокупности с другими биологически активными веществами способны оказывать благоприятное влияние на формирование функциональных потребительских свойств готовых продуктов. Изготовлено 4 образца кисломолочного продукта, три из них обогащены соком любистка лекарственного и один – контрольный. Провели оценку качества полученных образцов по органолептическим и физико-химическим составляющим. Установлено, что образец № 3, изготовленный с максимальным количеством вносимой добавки – 2 кг на 100 кг продукта, – имел резко выраженный аромат любистка лекарственного, горький привкус. У образца № 2, произведенного с введением в рецептуру сока любистка массой 1,5 кг, отмечен менее выраженный аромат добавки, легкий горьковатый привкус. Лучшим по итогам органолептических испытаний признан образец № 1, изготовленный с внесением сока любистка лекарственного в количестве 1 кг. Кисломолочный продукт характеризовался свойственным кисломолочным вкусом с легким пряным привкусом. Результаты физико-химических испытаний свидетельствуют о повышении кислотности и содержания белка в готовых продуктах по мере увеличения вносимой добавки в рецептуру. Наибольшее содержание жира определено в образце, изготовленном с внесением сока любистка лекарственного в количестве 2 кг. В результате проведенных исследований подобраны оптимальные режимы получения нового кисломолочного напитка, обогащенного соком любистка, с использованием закваски на основе тибетского гриба.

Ключевые слова: любисток лекарственный, кисломолочный продукт, органолептические и физико-химические показатели качества, молочный тибетский гриб.

E.V. Razhina, Cand. Sc. Biology, Assoc. Prof.
E.S. Smirnova, Cand. Sc. Agriculture
O.P. Neverova, Cand. Sc. Biology
O.V. Gorelik, Dr. Sc. Agriculture
N.L. Lopaeva, Cand. Sc. Biology
I.M. Khairova, Senior Lecturer
Ural State Agrarian University, Ekaterinburg

USE OF LOVAGE IN FERMENTED MILK PRODUCTS

The article presents formulation, manufacturing technology and quality control of fermented milk products with lovage juice of different concentrations. The juice of the plant with high biological value was chosen as an enriching agent. Composition of natural juice contains sugars and ascorbic acid, which, in combination with other biologically active substances, can have a favourable effect on functional consumer properties of finished products. Four samples of fermented milk product were made, three of them enriched with lovage juice and one is a control one. Organoleptic and physicochemical components of the obtained samples were evaluated and assessed. It was found that sample No. 3, made with the maximum amount of the additive – 2 kg per 100 kg of product was strongly flavored with lovage and had bitter taste. Sample No. 2, produced with 1.5 kg of lovage juice had a less pronounced flavor of the additive, slight bitter taste. Organoleptic tests

showed that sample No. 1 (with 1 kg of lovage juice addition) was the best. The fermented milk product had characteristic fermented milk taste, with a slight spicy aftertaste. The results of physicochemical tests indicate an increase in acidity and protein content in finished products as the additive amount in the formulation increases. The highest fat content was found in the sample made with 2 kg of lovage juice. The conducted research resulted in obtaining optimal modes of a new fermented milk drink enriched with lovage juice and Tibetan fungus starter culture.

Key words: *lovage, fermented milk product, organoleptic and physicochemical quality indicators, Tibetan diary fungus.*

Введение

В настоящее время целью пищевой промышленности является производство высококачественной молочной продукции в расширенном ассортименте, в том числе обогащенных биологически активными веществами дикорастущих лекарственных и/или окультуренных растений [1–4]. Специфические органолептические свойства вносимого сырья могут способствовать образованию невыраженного или резкого вкуса и аромата. В связи с этим следует проводить исследования, направленные на сохранение вкусовых и ароматических характеристик разрабатываемых продуктов питания [2–3].

Авторами [2, 5] разработано значительное число кисломолочных продуктов, обогащенных вкусовыми добавками на основе натурального растительного сырья. Однако ароматообразованию уделяется меньше внимания. Источниками ароматических составляющих являются натуральные соки, эфирные масла, экстракты и настои, концентраты растений [2]. В состав пряных растений входят витамины, макро- и микроэлементы, пищевые волокна, эфирные масла, антиоксиданты. Многие пряные растения могут обладать тонизирующими, антимикробными, общеукрепляющими, иммуностимулирующими свойствами [6]. Кроме того, они способствуют выведению шлаков из организма, нейтрализации антипитательных составляющих, катализации ферментов [7].

В последнее время в продукты питания, в том числе кисломолочные, вводят эфиромасличное сырье, представленное растениями семейства *Lamiaceae*. К ним относятся шалфей, мелисса, лаванда, базилик, розмарин, чабрец [8–9].

К пряно-ароматическим растениям также относится любисток лекарственный – многолетнее травянистое растение, произрастающее на территории Российской Федерации. Любисток может использоваться в различных отраслях промышленности. В состав растения входят разнообразные биологически активные вещества, наиболее ценными из которых являются кумарины, обладающие фармакологической активностью. Кумарин – антагонист витамина К, обладает спазмолитическим, противоопухолевым действием на организм человека [10, 11]. Кроме того, в состав любистка входят эфирные масла, смолистые вещества, крахмал, сахара, ангеликовая кислота. Основной составляющей эфирных масел растения является β-фелландрен, относящийся к группе фталидов. Основной фталид любистка – z-лигустилид, определен в значительных количествах в листьях и стеблях. Эфирное масло любистка содержит также терпеноиды, карбоновые кислоты. Определена бактериологическая активность компонентов сырья любистка лекарственного [10, 12].

В расчете на 100 г сока любистка содержание углеводов составляет 5,47 %, белков – 4,07 %, жиров – 0,6 %. В состав сока входят витамины (А, В1, В2, В5, В6, В9, В12, С, D, Е, Н, РР), минеральные вещества (К, Са, Mg, Na, P, Cl, Fe, I, Co, Mn, Cu, Mo), дубильные вещества, смолы, органические кислоты, эфирные масла, лецитин, кумарины, фенольные кислоты.

В надземной части растения содержатся жирные кислоты с преобладанием полиненасыщенной жирной кислоты – α-линолевой, а также органические кислоты и токоферолы. Наиболее распространенной кислотой, входящей в состав надземной части растения, является щавелевая кислота, из токоферолов – изоформа витамина Е – α-токоферол. Доминирующим флавоноидом, входящим в состав листьев любистка, является рутин, основным компонентом фенольных кислот – 5-кофеилхиновая кислота. К действующим веществам любистка отно-

сятся кумарины и алкалоиды. Все вещества, входящие в состав любистка лекарственного, способны оказывать лечебное воздействие на организм [13]. Листья любистка лекарственного имеют острый запах, стойкий аромат. Вкус пряный, горьковатый [14].

Одним из основных видов сырья, применяемых при производстве кисломолочной продукции, являются молочнокислые микроорганизмы. Перспективным направлением становится применение зооглей в молочной промышленности. Одним из представителей зооглей является молочный тибетский гриб, оказывающий благоприятное воздействие на состояние организма человека. В состав гриба входят молочнокислые дрожжи, лактобактерии, уксуснокислые бактерии, витамины А, В1, В2, В12, С [15–19].

Определено влияние антимикробной активности пряно-ароматического сырья на жизнеспособность молочнокислых бактерий. Молочнокислые микроорганизмы имеют относительную устойчивость к ингибирующему воздействию эфирного масла растений и других составляющих [20, 21]. Авторами исследовано внесение настоев аира и душицы обыкновенной в десертные молочные продукты, что повлияло на активизацию ферментных систем микроорганизмов [2]. А.А. Кцоева использовала Melissa лекарственную в производстве кисломолочных продуктов. В готовых обогащенных образцах улучшились вкусовые и ароматические свойства продукта [6].

Анализ научных исследований авторов свидетельствует об отсутствии разработок, направленных на использование любистка лекарственного при производстве кисломолочных продуктов.

Цель работы – разработка рецептуры и технологии производства, исследование качества кисломолочных продуктов, изготовленных на основе закваски из тибетского гриба с добавлением сока любистка лекарственного.

Материалы и методы исследования

Опытные образцы кисломолочных продуктов были произведены на кафедре биотехнологии и пищевых продуктов ФГБОУ ВО «Уральский ГАУ». Для напитка использовали молоко, нормализованное жирностью 3,2 % (ГОСТ 31449-2013), жидкую закваску из тибетского гриба прямого внесения (ГОСТ 34372-2017). В качестве добавки использовали сок, полученный из любистка лекарственного разной концентрации методом прямого отжима (с применением шнековой соковыжималки Polaris 0602). Внесение тибетского гриба осуществлялось в стерильных условиях.

Всего было приготовлено четыре образца напитка, три из которых являлись опытными (образец № 1 – 1 кг сока; образец № 2 – 1,5 кг; образец № 3 – 2 кг; образец № 4 – контроль).

Оценку качества готовых образцов по органолептическим показателям проводила экспертная комиссия из числа профессорско-преподавательского состава кафедры согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 22935-2-2011. Была разработана 5-балльная система органолептической оценки качества кисломолочного напитка, изготовленного с использованием сока любистка лекарственного (табл. 1).

Таблица 1

Органолептическая оценка качества кисломолочного напитка, изготовленного с использованием сока любистка лекарственного по 5-балльной шкале

Наименование показателя	Критерии оценивания	Балл
1	2	3
Вкус и запах	кисломолочные, освежающие, с легкими пряными нотками	5 (отлично)
	кисломолочные, освежающие, пряные, с легким горьковатым привкусом	4 (хорошо)
	кисломолочные, освежающие, пряные, с выраженным устойчивым горьковатым привкусом	3 (удовлетворительно)
	пустые, с наличием излишнего газообразования	2 (неудовлетворительно)
	резкие, сброженные	1 (неудовлетворительно)

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Цвет	от светло-зеленого до зеленого, равномерный	5 (отлично)
	от светло-зеленого до зеленого, слегка неравномерный	4 (хорошо)
	неравномерный, с легким оттенком молочного	3 (удовлетворительно)
	значительные различия оттенков кремового, молочного, белого, зеленого	2 (неудовлетворительно)
	от серо-зеленого до серого	1 (неудовлетворительно)
Консистенция	однородная с нарушенным сгустком; допускается газообразование в виде отдельных глазков, незначительное отделение сыворотки не более 3 % от объема продукта	5 (отлично)
	однородная с нарушенным сгустком; допускается умеренное газообразование, отделение сыворотки не более 5 % от объема продукта	4 (хорошо)
	однородная с нарушенным сгустком, вязкая, отделение сыворотки не более 8 %	3 (удовлетворительно)
	наблюдается незначительное количество хлопьев или крупинок, отделение сыворотки более 10 %	2 (неудовлетворительно)
	хлопьевидная, крупинчатая, дряблая; наблюдается излишнее вспучивание и газообразование	1 (неудовлетворительно)

Определены физико-химические показатели кисломолочных продуктов. Кислотность готовых изделий определяли титриметрическим методом (ГОСТ 3624-92), массовая доля белка определена методом формольного титрования (ГОСТ 25179-2014), массовая доля жира – кислотным методом (ГОСТ 5867-2023). Физико-химические показатели оценивали только в готовых образцах кисломолочных продуктов, промежуточные испытания не осуществлялись.

Профилограммы вкуса и запаха образцов разработали согласно шкале интенсивности выраженности признака:

- 0 – признак отсутствует;
- 1 – только узнаваемый или ощущаемый;
- 2 – слабая интенсивность;
- 3 – умеренная интенсивность;
- 4 – сильная интенсивность;
- 5 – очень сильная интенсивность.

Профилограммы строились на основании результатов дегустационной оценки экспертной комиссии, состоящей из пяти человек. Консистенцию определяли визуально и опробованием образцов. Статистическая обработка данных проводилась в программе Microsoft Excel методом вариационной статистики с применением таблицы Стьюдента. Исследования проводили в трехкратной повторности.

Результаты исследований и их обсуждение

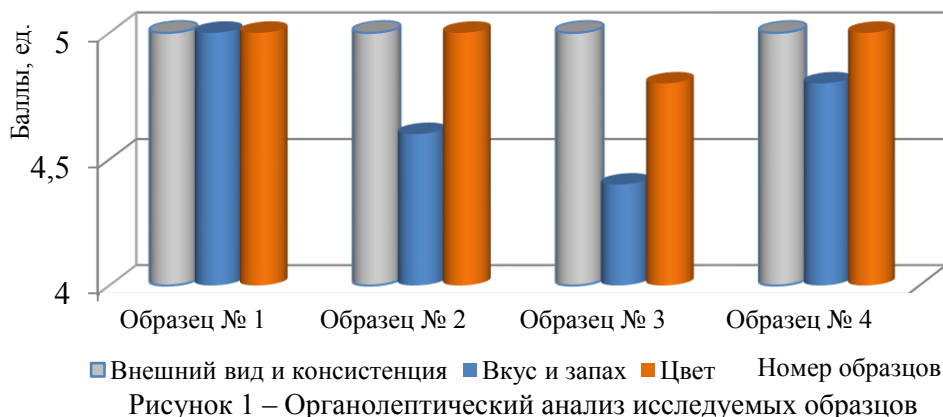
Рецептура производства кисломолочного напитка с включением разного объема сока любистка лекарственного представлена в таблице 2.

Таблица 2

Рецептура обогащенных кисломолочных напитков (в расчете на 100 кг продукта)

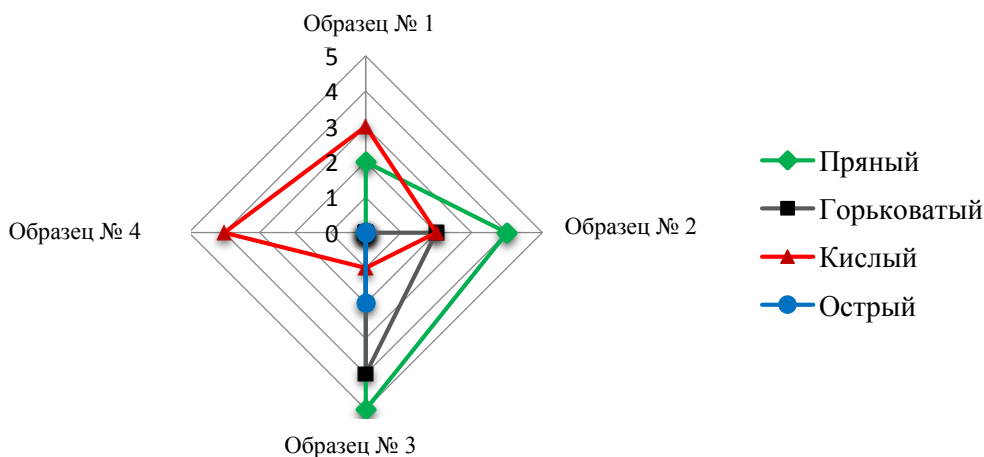
Наименование вносимого сырья	Номер образца			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Молоко с массовой долей жира 3,2 %, кг	97	96,5	96	98
Закваска, кг	2,0	2,0	2,0	2,0
Сок любистка лекарственного, кг	1,0	1,5	2,0	–

На первом этапе исследований была проведена оценка органолептических показателей подобранных рецептов кисломолочного напитка согласно разработанной балльной системе. Результаты представлены на рисунке 1.



По результатам органолептической оценки лучшим был признан образец № 1, набравший максимальную оценку – 5. Вкус и запах – кисломолочные, с легким пряным привкусом. Цвет светло-зеленый. Консистенция однородная, отделение сыворотки составило 1,1 % от объема продукта. Образец № 2 имел пряный вкус с легкой горчинкой, в связи с чем эксперты снизили баллы до 4,9. Запах – выраженный пряный, цвет светло-зеленый, равномерный. Консистенция однородная, отстой сыворотки занял 2 % от объема кисломолочного продукта. В образце № 3 присутствовал выраженный устойчивый горьковатый привкус, пряный запах, цвет – зеленый, неравномерный, консистенция являлась однородной, отделение сыворотки составило 2,5 %, образцу присвоено 4,7 балла. Образец № 4 (контроль) имел свойственный кисломолочный вкус и запах, белый с кремовым оттенком цвет, однородную консистенцию с минимальным отделением сыворотки – 1 %.

Построены профилограммы вкуса трех обогащенных образцов (рис. 2).



Отметили интенсивность выраженности привкусов исследуемых образцов. Образец № 1, изготовленный с использованием наименьшей концентрации вносимой добавки – 1 кг, имел кисломолочный вкус, легкие пряные нотки любистка. У образца № 2 определили достаточно выраженный пряный привкус и легкую горьковатость. Образец № 3, произведенный с максимальным объемом внесенного сока любистка, имел умеренно выраженную горьковатость, вкус пряный, ощущалась острота вкуса. У образца № 4 отмечен наиболее выраженный кислый вкус. Соответственно, с точки зрения интенсивности выраженности привкусов и общих вкусовых свойств готовых продуктов предпочтение отдается образцу № 1. При увеличении концентрации вносимой добавки усиливался горьковатый привкус и появлялся острый.

Интенсивность выраженности запаха кисломолочных продуктов определяли с использованием профилограммы запаха (рис. 3).

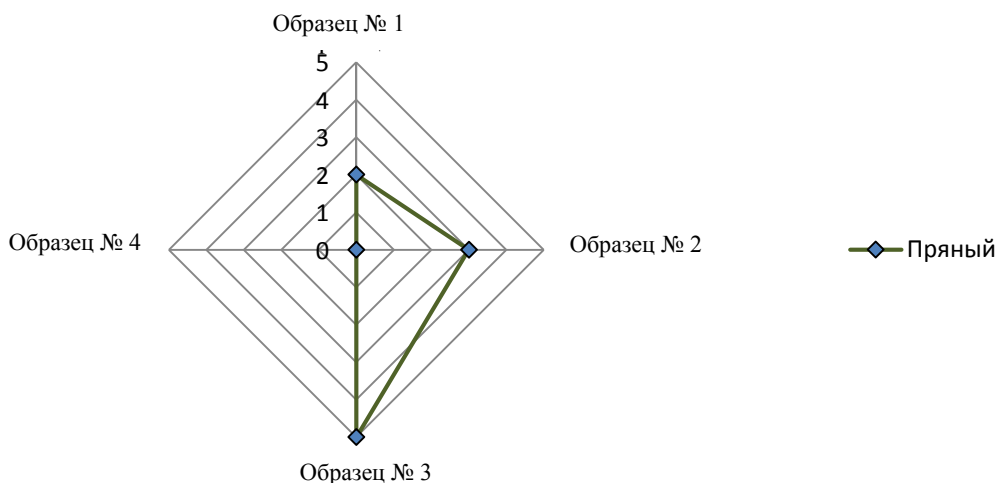


Рисунок 3 – Профилограмма запаха кисломолочных продуктов

Экспертами была отмечена интенсивность выраженности пряного запаха у представленных образцов (№ 1–3), обогащенных соком любистка лекарственного. Наиболее интенсивный пряный запах был определен у образца № 3, изготовленного с внесением максимального количество сока любистка лекарственного – 2 кг. Достаточно легкий пряный аромат выявили у образца № 1 с использованием добавки массой 1 кг.

По совокупности представленных показателей было отмечено, что наилучшими органолептическими показателями характеризовался напиток, приготовленный по рецептуре № 1.

На следующем этапе исследований определили физико-химические показатели готовой продукции (рис. 4, 5). Содержание жира в готовых продуктах составило от 3,1 до 3,5 %. Повышение массовой доли белка в полученных образцах наблюдалось с увеличением вносимой добавки, что обусловлено содержанием белка 4,07 г на 100 г сока любистка.

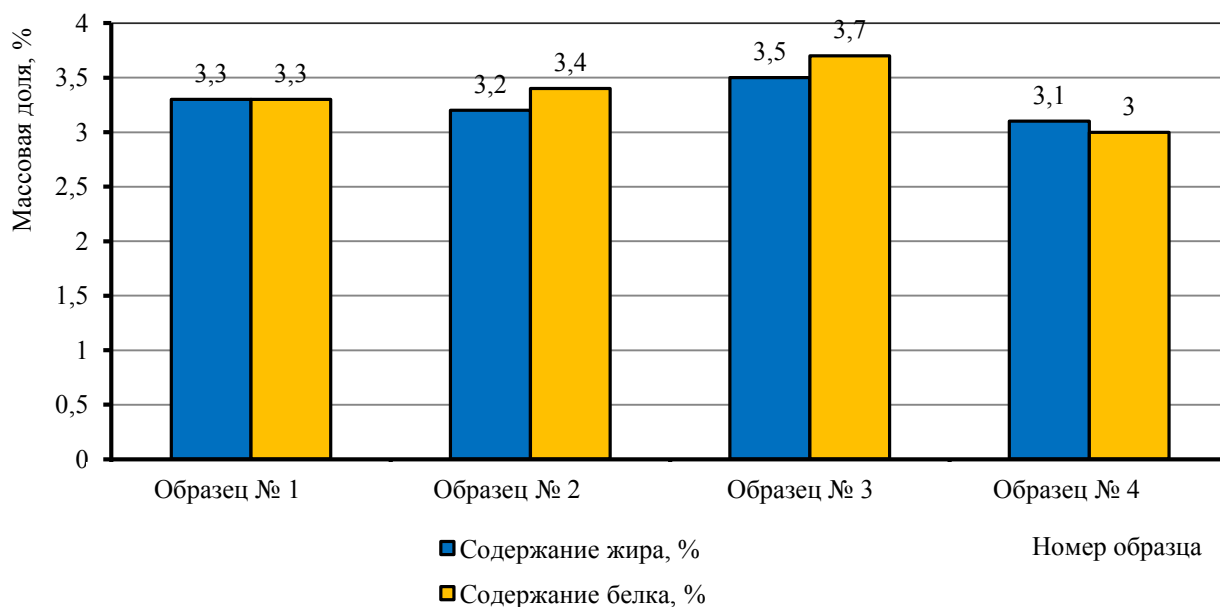


Рисунок 4 – Содержание жира и белка в кисломолочных продуктах

По результатам титриметрического анализа (рис. 5) было установлено, что наибольшим показателем кислотности (98 °Т) характеризовался опытный образец № 3 с концентрацией сока любистка лекарственного 2,0 кг. Наименьший показатель (91 °Т) был зафиксирован в опытном образце № 1 с концентрацией сока 1,0 кг. При этом все исследуемые показатели образцов кисломолочных напитков находились в пределах установленных норм (ГОСТ Р 54669-2011) установленных значений (60,0–130,0 °Т).

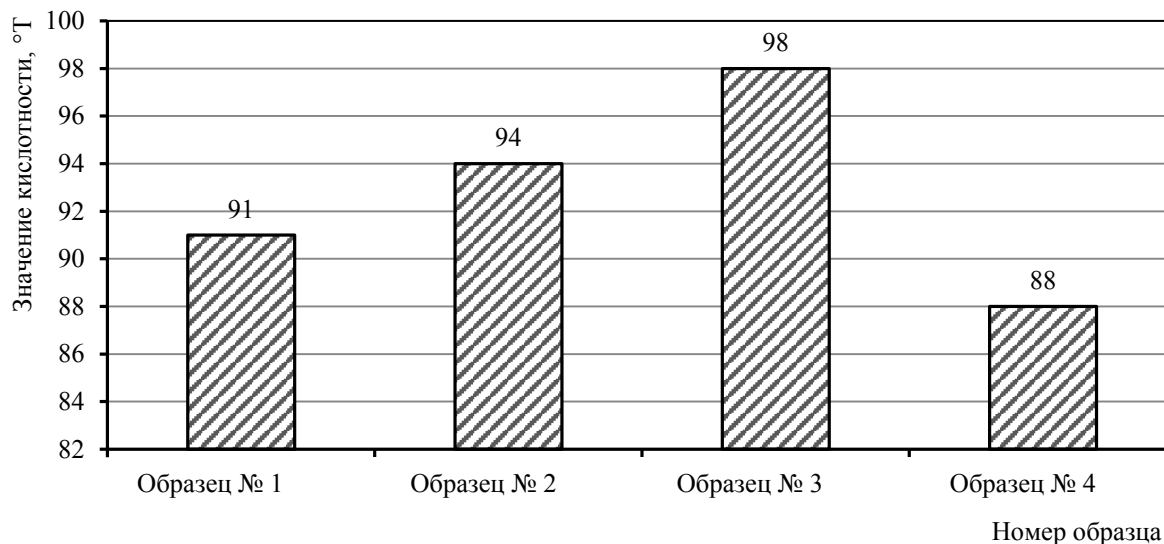


Рисунок 5 – Результаты определения кислотности, °Т

Технология производства кисломолочного продукта

По результатам проведенных исследований были подобраны оптимальные режимы технологии приготовления нового кисломолочного напитка. Производство опытных образцов кисломолочного напитка начали с подготовки сырья:

– подготовка любистка (промывали листья, высушивали и измельчали при помощи соковыжималки);

– приготовление закваски. Закваску производили из оживленного тибетского гриба. Грибки промывали в сите теплой кипяченой водой, раскладывали на стерильную марлю для стекания воды. Помещали грибки в подготовленное молоко (из расчета 1 часть грибков на 10 частей молока) с температурой 24 °С и выдерживали в термостате в течение 12 ч. Взбалтывание проводили в трехкратной повторности.

После подготовки основных ингредиентов приступали к приготовлению напитка.

1. Вносили сок любистка в нормализованное молоко согласно представленной рецептуре.

2. Гомогенизировали при температуре 55–60 °С с давлением (150±25) бар.

3. Проводили термическую обработку (Т = 72 °С, в течение 20 с).

4. Охлаждали до Т = 24 °С.

5. Вносили закваску (2 кг).

6. Термостатировали опытные образцы (Т = 24 °С, время – 24 ч).

7. Фильтровали на ситах.

8. Розливали.

9. Ставили на хранение.

Заключение

Использование любистка лекарственного в рецептуре кисломолочных продуктов повлияло на органолептические и физико-химические составляющие готовой продукции. По ре-

зультатам физико-химических исследований наибольшее содержание жира, белка и кислотности было определено в образце № 3, содержащем максимальное количество сока любистка – 2,0 кг на 100 кг продукта. Из всех опытных образцов лучшим с учетом органолептической оценки был признан образец № 1 с внесением сока любистка в количестве 1,0 кг на 100 кг продукта.

Таким образом, введение в рецептуру кисломолочного напитка сока любистка лекарственного в количестве 1,0 кг на 100 кг сырья обеспечивало кисломолочный, слегка сладковатый с легкими пряными нотками вкус продукта и обогащало его биологически активными веществами любистка.

Библиография

1. Тыхенова О.Г., Дагбаева Т.Ц., Семенова Е.Г. Разработка рецептуры и технологии производства творожной массы с использованием растительного сырья // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 3 (82). – С. 13–20.

2. Коновалов С.А., Медведева Е.Ю., Мартемьянова Л.Е. Использование добавки на основе натурального вкусоароматического вещества в технологии десертных молочных продуктов // Перспективы производства продуктов питания нового поколения: материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти проф. Г.П. Сапрыгина (13–14 апр. 2017 г.). – Омск: Изд-во Омского гос. аграр. ун-та, 2017. – С. 340–343.

3. Решетник Е.И., Грибанова С.Л., Егоров Д.В. и др. Использование растительного сырья при производстве кисломолочных продуктов для специализированного питания // Индустрия питания. – 2021. – Т. 6, № 4. – С. 39–46.

4. Мусина О.Н. Новые молочные продукты для здорового питания // Переработка молока. – 2016. – № 1. – С. 32–35.

5. Долматова О. И., Пожидаева Е. А., Гребенкина А. Г. Использование экстракта дикорастущих трав при производстве кисломолочного напитка // Пищевая промышленность. – 2017. – № 12. – С. 26–28.

6. Кюева А.А. Использование Melissa лекарственной при производстве кисломолочных продуктов // Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (20 января 2019 г, г. Пермь). – Уфа: Аэтерна, 2019. – С. 26–31.

7. Малащенко Н.Л. Совершенствование технологий получения поликомпонентных пряно-ароматических пищевых добавок: дис. канд. техн. наук / Н.Л. Малащенко. – Краснодар, 2015. – 127 с.

8. Ляцук Ю.О., Мартынушкин А.Б., Пехнов С.А. и др. Особенности производства функциональных молочных продуктов с растительными наполнителями из эфиромасличных растений // Вестник КрасГАУ. – 2022. – № 8. – С. 207–214. – DOI: 10.36718/1819-4036-2022-8-207-214.

9. Kozłowska M., Laudy A. E., Przybył J. et al. Chemical composition and antibacterial activity of some medicinal plants from Lamiaceae family // Acta Pol Pharm. – 2015. – Vol. 72, N 4. – P. 757–767.

10. Кубасова Е.Д., Корельская Г.В., Суханов А.Е. и др. Обнаружение и количественное определение кумаринов в растительном сырье любистка лекарственного, произрастающего в Архангельской области // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 10 (112). – С. 145–148. – DOI: 10/2367/ IRJ.2021/112.10.024.

11. Ваулина К.И., Нестерова О.В. Сравнительный анализ суммарного содержания некоторых групп биологически активных веществ в траве, листьях и корневищах и корнях любистка лекарственного // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». – 2019. – Т. 21, № 11. – С. 110–116.

12. Ториков В.Е., Мешков И.И. Культивируемые и дикорастущие лекарственные растения: монография. – СПб.: Лань, 2023. – 272 с.

13. Кубасова Е.Д., Корельская Г.В., Кубасов Р.В. Любисток лекарственный (*Levisticum officinale*, *F. apiaceae*): ареал произрастания, ботаническое описание и химический состав (обзор литературы) // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». – 2023. – Т. 23, № 9. – С. 67–75.

14. Наумкин В.Н., Коцарева Н.В., Манохина Л.А. и др. Пищевые и лекарственные свойства культурных растений. – СПб.: Лань, 2022. – 400 с.

15. Сысоева М.Г., Калашикова С.В. Разработка кисломолочного продукта с применением растительного сырья // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2015. – № 5 (34). – С. 27–30.

16. Шпак Т.И., Насиров Ю.З. Применение растительных компонентов для обогащения традиционных кисломолочных продуктов полезными веществами // Вестник Донского гос. аграр. ун-та. – 2021. – № 1–1(39). – С. 107–112.
17. Абдусаломова Д.О., Султанова Ш.А. Применение симбиотических групп бактерий и микроорганизмов в пищевой технологии // Universum: технические науки. – 2019. – № 3 (60). – С. 39–41.
18. Смирнова И.А., Еремина И.А. Влияние температурных режимов сквашивания молока тибетским молочным грибом при получении кисломолочного напитка // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 2. – С. 93–96.
19. Чеченихина О.С., Ражина Е.В., Смирнова Е.С. и др. Производство молочного продукта с использованием тибетского гриба и молока разных изготовителей // Молочнохозяйственный вестник. – 2023. – № 3 (51). – С. 204–215.
20. DUCKOVÁ V., KROČKO M., KŇAZOVICKÁ V. *Et al.* Evaluation of yoghurts with thyme, thyme essential oil and salt // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. – 2018. – N 66. – P. 39.
21. Голубева Л.В., Долматова О.И., Иванцова М.И. Кисломолочный продукт функционального назначения // Вестник ВГУИТ. – 2016. – № 2. – С. 148–152.

Bibliography

1. Tykhenova O.G., Dagbaeva T.Ts., Semenova E.G. Development of the recipe and technology for the production of curds using vegetable raw materials // ESSUTM Bulletin. – 2021. – N 3(82). – P. 13–20.
2. Konovalov S.A., Medvedeva E.Yu., Martemyanova L.E. Use of additives based on natural flavoring substances in the technology of dessert dairy products // Prospects of new generation food production: Materials of the All-Russian scientific and Practical conference with international participation commemorating Professor Georgiy P. Saprygin (April 13–14, 2017). – Omsk: Omsk State Agrarian University, 2017. – P. 340–343.
3. Reshetnik E.I., Gribanova S.L., Egorov D.V. *et al.* Use of vegetable raw materials in production of fermented dairy products for specialized nutrition // Food Industry. – 2021. – Vol. 6, N 4. – P. 39–46.
4. Musina O.N. New dairy products for healthy diet // Milk Processing magazine. – 2016. – N 1. – P. 32–35.
5. Dolmatova O.I., Pozhidaeva E.A., Grebenkina A.G. Use of wild herbs extracts in the production of fermented milk drink // Food industry. – 2017. – N 12. – P. 26–28.
6. Ktsoeva A.A. Use of Melissa Officinalis in the production of fermented milk products // Innovative research: problems of implementation of results and directions of development. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference (January 20, 2019, Perm). – Ufa: Aeterna Publishing House, 2019. – P. 26–31.
7. Malashenko N.L. Improvement of technologies for the production of polycomposite spicy-aromatic food additives: diss. ... Cand. Sc. Engineering / N.L. Malashenko. – Krasnodar, 2015. – 127 p.
8. Lyashchuk Yu.O., Martynushkin A.B., Pekhnov S.A. *et al.* Features of functional dairy products with vegetable fillers from oilseed plants // The Bulletin of KrasGAU. – 2022. – N 8. – P. 207–214. – DOI: 10.36718/1819-4036-2022-8-207-214.
9. Kozłowska M., Laudy A. E., Przybył J. *et al.* Chemical composition and antibacterial activity of some medicinal plants from Lamiaceae family // Acta Poloniae Pharmaceutica, 2015. – Vol. 72, N 4. – P. 757–767.
10. Kubasova E.D., Korelskaya G.V., Sukhanov A.E. *et al.* Detection and quantitative determination of coumarins in plant raw materials of lovage growing in the Arkhangelsk region // International Research Journal. – 2022. – N 10 (112). – P. 145–148. – DOI: 10/2367/ IRJ.2021/112.10.024.
11. Vaulina K.I., Nesterova O.V. Comparative analysis of total content of some groups of biologically active substances in lovage grass, leaves and rhizomes and roots // Medical and Pharmaceutical Journal «Pulse». – 2019. – Vol. 21, N 11. – P. 110–116.
12. Torikov V.E., Meshkov I.I. Cultivated and wild medicinal plants: monograph. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2023. – 272 p.
13. Kubasova E.D., Korelskaya G.V., Kubasov R.V. Lovage officinale (*Levisticum officinale*, *F. apiaceae*): Habitat, botanical description and chemical composition (literature review) // Medico and Pharmaceutical Journal «Pulse». – 2023. – Vol. 23, N 9. – P. 67–75.

14. *Naumkin V.N., Kotsareva N.V., Manokhina L.A. et al.* Food and medicinal properties of cultivated plants. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2022. – 400 p.
15. *Sysoeva M.G., Kalashnikova S.V.* Development of a fermented milk product using vegetable raw materials // Technology and merchandising of the innovative foodstuff. – 2015. – N 5 (34). – P. 27–30.
16. *Shpak T.I., Nasirov Yu.Z.* Use of plant components for enriching traditional fermented milk products with useful substances // Bulletin of Don State Agrarian University. – 2021. – N 1–1(39). – P. 107–112.
17. *Abdusalomova D.O., Sultanova Sh.A.* Use of symbiotic groups of bacteria and microorganisms in food technology // Universum: Technical Science. – 2019. – N 3 (60). – P. 39–41.
18. *Smirnova I.A., Eremina I.A., Gulbani A.D. et al.* Influence of temperature regimes of milk fermentation by Tibetan fungus in fermented milk drink production // Food Processing: Techniques and Technology. – 2014. – N 2. – P. 93–96.
19. *Chechenikhina O.S., Razhina E.V., Smirnova E.S. et al.* Production of a dairy product using Tibetan diary fungus and milk from different manufacturers // Dairy Bulletin. – 2023. – N 3 (51). – P. 204–215.
20. *Ducková V., Kročko M., Kňazovická V. et al.* Evaluation of yoghurts with thyme, thyme essential oil and salt // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. – 2018. – N 66. – P. 39.
21. *Golubeva L.V., Dolmatova O.I., Ivantsova M.I.* Fermented milk product of functional purpose // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2016. – N 2. – P. 148–152.

DOI 10.53980/24131997_2025_1_23

С.Л. Масанский¹, канд. техн. наук, проф., e-mail: tot505@yandex.ru

Ю.М. Пинчукова², канд. техн. наук, доц., e-mail: pinchykova@gmail.com

¹ Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,

² Белорусский государственный экономический университет

г. Могилев, Беларусь

УДК 641.1:330.133.1

ГОЛУБИКА ВЫСОКОРОСЛАЯ В ШКОЛЬНОМ ПИТАНИИ: СТРУКТУРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ

*Представлены данные системного анализа потребительной стоимости голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.), обоснована целесообразность использования голубики в производстве продукции для детей и подростков. Экспериментально оценены показатели потребительских свойств ягод голубики высокорослой, культивируемой в Республике Беларусь. Полученные данные систематизированы в виде структурно-аналитической модели потребительских свойств, отражающей количественные оценки показателей свойств назначения, сохраняемости, безопасности, эргономических и технологических свойств. Новые данные о технологических свойствах относятся к операциям термической и гидротермической обработки (замораживание, экстрагирование, бланширование). Предложены направления развития ассортимента продукции для школьного питания на основе голубики. Методом гигиенического ранжирования дана оценка потенциального влияния разработанной продукции на организм.*

Ключевые слова: голубика высокорослая, школьное питание, потребительские свойства, пищевая ценность, технологические свойства, ассортимент, гигиеническое ранжирование.

S.L. Masanskiy¹, Cand. Sc. Engineering, Prof.

Yu.M. Pinchukova², Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

¹ Belarusian State University of Food and Chemical Technologies

² Belarus State Economic University, Mogilev, Belarus

BLUEBERRY IN SCHOOL MEALS: STRUCTURAL AND ANALYTICAL MODELING OF CONSUMER PROPERTIES

*The article presents systematic analysis of use value of highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.), and substantiates the expediency of using blueberries in products for children and adolescents. Consumer properties indicators of highbush blueberries cultivated in the Republic of Belarus were experimentally assessed. The obtained data are systematized in the form of a structural-analytical model of consumer properties, reflecting assessment rate of purpose properties, shelf life, safety, ergonomic and technological properties. New data on technological properties relate to thermal and hydrothermal processing operations (freezing, extraction, blanching). Directions of product range development of blueberry-based school meals are proposed. The potential impact of the developed products on the body was assessed using the hygienic ranking method.*

Key words: highbush blueberry, school meals, consumer properties, nutritional value, technological properties, assortment, hygienic ranking.

Введение

Программа школьного питания является одной из важнейших программ социальной защиты детей и подростков. Горячее питание в школах Республики Беларусь ежедневно получают порядка одного миллиона обучающихся, что способствует их благополучию, сохранению и укреплению их здоровья. Соответствующая государственная политика закреплена в

ст. 38 Кодекса об образовании. Программа является частью глобальной концепции устойчивого развития, цели которой Республика Беларусь поддерживает [1].

Вместе с тем эволюционные изменения потребностей детей и подростков в питании актуализируют использование новых подходов к этой деятельности. В частности, необходимы вмешательства в практику организации питания, направленные на повышение лояльности детей и подростков к питанию в школе. Как известно, отказ от питания или несъедаемость (отходы) – проблема актуальная. Соответственно, не удовлетворяются в полной мере потребности в пищевых веществах и энергии, необходимых для компенсации их расхода в период нахождения детей в учебном заведении. Как известно, это влияет на когнитивную способность, способность к усвоению учебной программы в школе, состояние здоровья и в целом на благополучие детей и подростков [2].

Для обеспечения устойчивости здорового питания важной задачей является повышение вкусовой привлекательности рационов питания детей и подростков. С этой целью предложено состав обеда формировать по принципу обед из двух блюд – основного блюда как источника белка и дополнительного десертного блюда. Основное блюдо готовится методами общественного питания и рассматривается прежде всего как источник белка – разнообразные блюда из мяса, рыбы, птицы, субпродуктов с гарниром или заправочные супы. Дополнительное блюдо, как правило, на основе фруктов, овощей, злаковых как источников «правильных» углеводов и биологически активных веществ – кисели, компоты, безалкогольные напитки на фруктово-ягодной основе, напитки чайные на основе фитосырья (травяные чаи), пюре, фрукты, фруктовые салаты, желе, запеканки или пудинги из творога, круп, пироги, блинчики с фруктовой, ягодной или творожной начинкой [3].

В данном случае идея состоит в том, чтобы вызывать у детей желание обедать в школе и ожидание приятных вкусовых ощущений, которые связаны с потреблением сладких блюд и десертов. По словам И.П. Павлова, *«...еда, начатая с удовольствием вследствие потребности в еде, должна и закончиться им же, несмотря на удовлетворение потребности, причем объектом этого удовольствия является вещество, почти не требующее на себя пищеварительной работы... – сахар»*. Роль сладких (десертных) блюд определяется не их калорийностью, а высокими вкусовыми достоинствами. Особую ценность представляют те блюда, в состав которых входят свежие плоды и ягоды, являющиеся источником витаминов С, Р, минеральных элементов, органических кислот, а также ряда других биологически активных веществ [4].

Определение дополнительного блюда как сладкого условное. Специальный ассортимент сладких блюд с минимальным содержанием рафинированного сахара или без него не усугубляет проблему избыточного потребления сахара. Как раз наоборот – проблема в массовом злоупотреблении среди школьников различными кондитерскими изделиями, сахаросодержащими напитками при их полной доступности и сильной рекламной поддержке на потребительском рынке. Внедрение специального ассортимента сладких блюд позволит формировать у школьников собственное понимание необходимости ограничивать сахар в питании и не злоупотреблять им вне школы. Необходимо создать альтернативу – через школьное питание предлагать ассортимент сладких блюд (десертов), которые играют положительную роль в питании, и на этой основе формировать правильное отношение к сладкому и правильное пищевое поведение.

Специальный ассортимент сладких блюд и изделий, а также из соответствующих продуктов промышленного производства должен стать частью общего ассортимента продуктов, используемых для питания детей в организованных коллективах. Предлагается для этого ввести в товароведную классификацию пищевых продуктов отдельную группу продуктов специального назначения – «продукты здорового питания детей в организованных коллективах», объединяющую не только специализированные продукты для питания детей дошкольного и школьного возраста, но и продукты общего назначения с заданными потребительскими свойствами. Обобщающим критерием для включения продуктов в данную группу является содержание в них пищевых волокон, жира, рафинированного сахара, соли. Цель классификации –

формирование практико-методических знаний¹ путем целенаправленного сбора, систематизация, формализация товароведной информации о таких продуктах.

На практике такая классификация позволит обеспечить на более высоком уровне систематизацию межотраслевых связей между профессиональными областями педагогики, медицины, общественного питания, которые проявляются в деятельности по формированию ассортимента продуктов для организации питания детей в учреждениях образования. Каждодневный для детей своего рода урок-практика в школьной столовой позволит формировать у них собственное отношение к выбору продуктов здорового питания в настоящем и будущем. Такой подход является частью педагогической модели школьного питания, соответствует концепции устойчивого здорового питания населения.

Прагматичная целесообразность обусловлена также экономическими факторами, что имеет значение в условиях бюджетного ограничения. Как известно, стоимость сбалансированного и обеспеченного специализированными продуктами детского питания довольно высока. Например, для детей 6 лет стоимость рациона при потреблении продуктов общего назначения в сравнении с рационом, в который включены 30 % специализированных продуктов для детского питания, на 58 % выше [5].

Голубика высокорослая является одним из пяти полезных продуктов, рекомендованных Организацией Объединенных Наций для здорового питания. Известны научные данные о ее свойствах – биоактивные экстракты, выделенные из голубики, проявляют антиоксидантный, противовоспалительный, противораковый эффект [6].

В Республике Беларусь отмечается активное развитие голубиководства, в стране организованы современные питомники, внедряются эффективные технологии возделывания и размножения голубики. Если в 2012 г. площадь промышленных насаждений данной культуры в Беларуси составляла 389 га, то в 2020 г. – свыше 1200 га [7]. Увеличение площадей возделывания и производства ягод, делает голубику все более доступной для массового потребления. Необходимо отметить, что основные производители – фермерские хозяйства. Привлечение местных фермеров к программе школьного питания соответствует целям устойчивого развития. Вместе с тем голубика практически не используется для питания детей в организованных коллективах, что связано, в частности, с недостаточностью соответствующих практико-методических знаний.

Цель исследования – сбор, систематизация, формализация товароведно-технологической информации о потребительских свойствах голубики высокорослой для формирования ассортимента продуктов в составе рационов школьного питания.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования – ягоды сортов голубики высокорослой (*Earliblue, Spartan, Puru, Bluetta, Northland, Patriot, Jersey, Elizabeth*), интродуцированных в Беларусь.

Биохимический состав ягод определяли стандартными физическими, химическими и органолептическими методами в трехлетнем цикле наблюдений. Антиоксидантная активность по показателю окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) оценена по методу В.И. Прилуцкого.

Оценку потенциального влияния разработанных блюд и изделий на здоровье проводили методом гигиенического ранжирования, разработанного Министерством здравоохранения Республики Беларусь [8].

Для систематизации информации о потребительских свойствах голубики применяли структурное моделирование, которое является методологической разновидностью системного

¹ Под методическими знаниями понимали практико-методические знания, «организованные в виде предписаний для деятельности, – что именно и с какими объектами нужно делать для получения определенного продукта» (Щедровицкий Г.П., 1995).

анализа [9]. Для структурирования приняли за основу классификацию потребительских свойств, характеризующих потребительскую стоимость продуктов, предложенную М.А. Николаевой [10].

В модифицированном виде модель потребительской стоимости выражена как сумма потребительских и технологических свойств:

$$ПС = f(П_{наз} + П_{над} + П_{эрг} + П_{без} + ТС), \quad (1)$$

где ПС – потребительская стоимость; $П_{наз}$ – показатели назначения; $П_{над}$ – показатели надежности; $П_{эрг}$ – показатели эргономичности; $П_{без}$ – показатели безопасности; $ТС$ – показатели технологических свойств.

Информация о потребительской стоимости систематизируется и представляется табличным способом с целью формирования единого банка данных (БД) о потребительских свойствах заданного ассортимента продуктов здорового питания детей в организованных коллективах и разработки системы управления базами данных (СУБД). Формат таблицы с информацией о потребительской стоимости продукта включает отдельные единичные показатели ключевых групп потребительских свойств (1...*i*-й), описывает полученные значения этих показателей, включает объекты методических знаний, отражающие практический результат исследований. Такая информатизация ассортимента в данном случае имеет принципиальное значение для эффективного сбора, обработки и манипулирования данными в практической деятельности по организации питания. На основе накапливаемых данные синтезируются методические знания, которые, в свою очередь, становятся доступными для развития и совместного использования через сеть. В перспективе это приведет к созданию цифровой онтологии предметной области, которая позволит создавать компьютерные модели проблемных ситуаций реальной практики для их оперативного решения, что в сочетании с возможностями искусственного интеллекта соответствует технологиям индустрии 4.0 и 5.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведен обзор и систематизация информации о свойствах назначения ягод голубики высокорослой для формирования информационных элементов БД. Анализ информации по публикациям отечественных и зарубежных авторов показал, что ягоды являются ценным для полноценного питания источником биологически активных веществ. Отмечается высокое содержание органических кислот (лимонной, аскорбиновой), фенольных соединений (дубильные вещества и флавоноидные соединения, включая антоцианы, флаваноны, флаванолы, кверцетин), сахара, минералы, витамины, пищевые волокна.

Питательный профиль голубики определяет наличие уникальных свойств и полезных эффектов на организм, описанных в ряде контролируемых исследований:

– **замедление старения и предотвращение появления раковых клеток** – фенольные соединения, присутствующие в голубике – танины, флавоноиды, включая антоцианы, флаванолы и флавоны, обуславливают ее высокие антиоксидантные свойства. Перечисленные вещества характеризуются свойствами поглощения свободных радикалов, повышенное количество которых считается одной из прямых причин возникновения новообразований [11–14]. Известны исследования, где метаболиты хинной, метилянтарной, хлорогеновой и яблочной кислот голубики положительно коррелировали с противораковой активностью. Экстракты из голубики выступали как потенциальный радиосенсибилизатор для лечения рака шейки матки [15];

– **повышение чувствительности организма к инсулину** – витамины, фенольная кислота и антоцианы противодействуют окислительному стрессу, регулируют метаболизм глюкозы, способствуют улучшению липидного профиля. Опубликованы исследования, которые

показывают, что голубика может улучшить чувствительность к инсулину у людей с ожирением, у которых выявлена резистентность к инсулину. Это означает, что потребление голубики может помочь в профилактике и лечении диабета и ожирения [16];

– **защита от нейродегенеративных заболеваний и повышение когнитивных функций** – голубика является нейропротекторным средством в основном из-за ее огромного содержания антиоксидантов, помогает предотвратить снижение когнитивных способностей и развитие некоторых дегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера и Паркинсона. Она делает это, предотвращая окисление клеток в мозге, позволяя им дегенерировать медленнее [17];

– **укрепление стенок и клеток сердечно-сосудистой системы, улучшение баланса жиров в крови** – голубика способна снижать уровень холестерина ЛПНП (холестерин липопротеидов низкой плотности, который может окисляться и становиться злокачественным, одновременно вызывая раковые заболевания) и повышать уровень холестерина ЛПВП (холестерин липопротеидов высокой плотности, который организм использует для транспортировки жиров), уменьшая вероятность закупорки артерий [18];

– **противовоспалительный эффект** – исследования показывают, что голубика может оказывать мощное воздействие на уменьшение воспаления, особенно при употреблении перед стрессовыми или высокоинтенсивными нагрузками [19];

– **улучшение зрения** – сетчатка глазного яблока подвержена окислительному повреждению. Это уязвимая ткань, которая может легко повреждаться воспалением или инфекциями. Антоцианы, содержащиеся в голубике, проявляют защитную активность против повреждений, вызванных ультрафиолетовыми лучами [12].

Как известно, для создания многокомпонентных пищевых систем требуется поиск и анализ функциональных ингредиентов на основе природных сырьевых ресурсов, которые содержат уникальный комплекс биологически активных веществ [20]. По мере углубления знаний о химическом составе голубики высокорослой и его влиянии на здоровье растет интерес как со стороны производителей, так и потребителей. По результатам собственных исследований было установлено высокое содержание в ягодах биофлавоноидов – 2398...3110 мг / 100 г (в сухом веществе), включая антоцианы, катехины и флавонолы. В зависимости от сорта содержание витамина С варьировало от 296 до 777 мг/100 г (в сухом веществе).

Наблюдались значительные колебания в зависимости от сорта содержания сахаров и органических кислот, что влияло на сахарокислотный индекс (от 2,4 до 9,1), отражающий вкус ягод: содержание общего сахара – от 10,9 до 25,8 % (из них редуцирующие сахара – от 7,9 до 19,6 %, сахароза – 5,6 до 7,4 %); содержание титруемых кислот – 1,8...7,3 %. Профилактическое значение имело содержание в ягодах пектиновых веществ – 3,4–7,0 % в зависимости от сорта.

С практической точки зрения была актуальна оценка возможного использования ягод голубики высокорослой для обеспечения коррекции витаминного и минерального статуса детей и подростков. Для оценки рассчитывали *интегральный скор* (мера пищевой ценности продукта). По содержанию биофлавоноидов для детей в возрасте 6–10 лет скор ягод составил 178 %, в частности, по катехинам – 124 % при потреблении 100 г ягод, по содержанию витамина С – 118 %. Содержание витаминов РР, группы В, таких как В1 и В2, было относительно низкое – порядка 2,4...15,8 % от суточной потребности в 100 г ягод. Отмечено высокое содержание селена – 35 мкг в 100 г, что превышало суточную потребность на 40 %, что делает голубику полезным дополнением к рациону, особенно в контексте антиоксидантной активности. Важно отметить, что голубика также содержала калий (14,0 мг), медь (0,1 мг). С учетом низкого содержания натрия это делает голубику очень полезной для питания детей.

Далее в соответствии с предложенной моделью потребительской стоимости полученная информация была систематизирована в виде блока свойств назначения ($P_{\text{наз}}$) в табличном формате (табл. 1).

Таблица 1

Данные о показателях потребительских свойств назначения ($\Pi_{\text{наз}}$) ягод голубики

Показатель	Значение показателя	Объект методических знаний
Химический состав ²	$\text{Полученный массив данных: } \mu_{ij} \begin{cases} i = \overline{1,3} \\ j = \overline{1,8} \\ n = \overline{1,34} \end{cases}$ <p>где, μ - содержание n-го вещества в j-том сорте i-го года</p>	Химический состав восьми новых сортов голубики, интродуцированных в Беларуси
Вариабельность состава	$\begin{cases} \mu_{\text{малый}} = \overline{1,5} \Rightarrow \text{Сухие вещества, сахароза, биофлавоноиды, флавонолы, дубильные вещества, редуцирующие вещества} \\ \mu_{\text{средний}} = \overline{1,7} \Rightarrow \text{Гидропектин, протопектин, клетчатка, катехины, витамин С, антоциановые пегменты} \\ \mu_{\text{высокий}} = \overline{1,3} \Rightarrow \text{Титруемая кислотность, сахарокислотный индекс, антоцианы} \end{cases}$ <p>где, $v[\mu]$ - уровень вариабельности признака</p>	<p>Ранжирование сортов голубики по содержанию пищевых веществ по степени вариабельности признаков биохимического состава</p> <p>Оценка соответствия потребительских свойств ягод голубики требованиям к питанию детей школьного возраста</p>
Интегральный скор	$\mu_{I'} \Rightarrow \text{биофлавоноиды, катехины, витамин С, селен}$ <p>где, $\mu_{I'}$ - содержание пищевого вещества более 15% суточной потребности</p>	Оценка антиоксидантных свойств
ОВП	$\begin{cases} \mu_{\text{биофл}} \cup \mu_{\text{катех.}} \cup \mu_{\text{вит.С}} \cup \mu_{\text{селен}} = mB = 220 \\ 0,7 \leq R_i \leq 1 \end{cases}$ <p>где, μ - содержание n-го пищевого вещества mB - антиоксидантная активность</p>	

В группу свойств **надежности** были включены показатели, которые отражали способность продукции сохранять свои первоначальные количественные и качественные характеристики на протяжении всего срока годности. Период, когда ягоды могут потребляться в свежем виде, ограничен. Изучалось, как процесс замораживания влияет на потребительские качества высокорослой голубики. Установлен высокий уровень сохраняемости сахаров, пектиновых веществ, витамина С, фенольных соединений в процессе ее хранения – соответственно 93; 87; 83; 94 % (применяли быстрый способ заморозки при -30 °С, хранили в течение девяти месяцев хранения ягод при температуре -18...-20 °С). После 12 месяцев хранения органолептические показатели ягод также оставались на высоком уровне – ягоды сохраняли привлекательный внешний вид и характерный для каждого сорта цвет. После размораживания наблюдалось легкое смягчение текстуры, однако цвет оставался неизменным и соответствовал свежим ягодам. Рекомендуется применять данный способ хранения ягод с целью обеспечения учреждениям образования в межсезонный период. Полученная информация систематизирована в виде блока свойств надежности (табл. 2).

Группа **эргономических свойств** ягод голубики высокорослой. Показатели свойств служили критериями для идентификации продукции при экспертизе качества, выявления фальсификации. Определена номенклатура признаков для идентификации помологического сорта голубики на основании помологического описания более 30 сортов голубики, произрастающих в Республике Беларусь.

² Количественные данные измерений конкретных показателей биохимического состава ягод голубики, сгруппированные в таблицы, приведены в работе [21].

Таблица 2

Данные о показателях свойств надежности ($\Pi_{\text{над}}$) ягод голубики высокорослой

Показатель	Значение показателя	Объект методических знаний
Содержание биологически активных веществ	$\begin{cases} y(\text{биофл.}) = -0,19x^2 - 1,74x + 36,68 \\ y(\text{вит. С}) = -0,16x^2 - 1,42x + 36,13 \\ y(\text{пект.в.}) = -0,28x^2 - 1,47x + 35,13 \end{cases}$ <p>где, $f(\mu)$ - содержание n-го пищевого вещества x - продолжительность хранения</p>	Оценка сохраняемости потребительских свойств ягод голубики в процессе замораживания и хранения в замороженном виде
Показатели потребительских свойств после размораживания	$j' = \overline{1,6} \Rightarrow \frac{\text{Bluecrop, Duke, Puru, Jersey, Northland, Patriot}}{\text{_____}}$ <p>где, j' - сорт, пригодный к замораживанию</p>	Сортопригодность отдельных сортов голубики к замораживанию

Обоснование показателей, входящих в номенклатуру, было осуществлено на основе анализа взаимосвязи между отдельными показателями биохимического состава ягод и установления множественной корреляционной зависимости между ними. Отмечены сильные корреляционные связи ($R_2 = 0,7 \dots 0,8$) между содержанием редуцирующих сахаров и катехинов (связь обратная), сахарозы и лейкоантоцианов, сахаров и пектиновых веществ. Соотношения между этими веществами наряду с помологическими характеристиками ягод и отдельными показателями химического состава ягод были рекомендованы в качестве признаков идентификации. Полученная информация систематизирована в виде табличного блока свойств эргономичности (табл. 3).

Таблица 3

Данные о показателях эргономических свойств ($\Pi_{\text{эрг}}$) ягод голубики высокорослой

Показатель	Значение показателя	Объект методических знаний
Показатели корреляционной связи Корреляционные зависимости показателей биохимического состава ягод голубики	$n = 10 \left\{ \begin{array}{l} \text{- высокая парная корреляция: массовая доля редуцирующих сахаров – катехины; массовая доля сахарозы – лейкоантоцианы; массовая доля сахаров – пектиновые вещества} \\ \text{- содержание пищевых веществ: пектиновые вещества, селен, биофлавоноиды, сахарокислотный индекс} \end{array} \right.$	Номенклатура критериев идентификации ягод голубики
Помологические характеристики ягод голубики	$k = 5 \left\{ \begin{array}{l} \text{масса, размер, окраска, цвет мякоти, прочность мякоти} \end{array} \right.$ <p>где, n, k - критерии идентификации: n - функциональные показатели; k - эргономические показатели</p>	

Данные о показателях **безопасности** (токсичные элементы, радионуклиды) в ягодах голубики были получены при их измерении в образцах ягод из различных мест произрастания Республики Беларусь в трехлетнем цикле наблюдений. Ни в одном из изученных образцов голубики не был выявлен микотоксин патулин, а уровень радионуклидов цезия-137 оставался в пределах допустимых норм. Числовые значения измеряемых показателей находились на значительно низком уровне, чем предельно допустимые их концентрации в продуктах питания (подтверждено статистически по критерию Стьюдента). Показатели безопасности представлены в виде таблицы согласно модели потребительской стоимости (табл. 4).

Таблица 4

Данные о показателях безопасности ($\Pi_{без}$) ягод голубики высокорослой

Показатель	Значение показателя	Объект методических знаний
Показатели безопасности ягод, выращенных в разных сырьевых зонах в разные годы	η_{ir} - различается незначительно (по tст) где, η - содержание n-го токсического элемента i - год; r - район произрастания,	Оценка безопасности ягод голубики высокорослой

Группа **технологических свойств** ягод голубики высокорослой. Были изучены технологические параметры, влияющие на извлечение растворимых веществ из ягод голубики и их мезги, что важно для производства напитков и десертов. Рассмотрены методы предварительной гидротермической обработки ягод и их влияние на выход пюре при изменении температуры и времени. Установлено, что бланширование при $(98 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 1–2 мин увеличивает выход пюре на 30 %, достигая 84–85 % с сохранением витамина С на уровне 85–90 %. Максимальное извлечение растворимых сухих веществ достигалось при обработке в течение 60 мин при $(98 \pm 2)^\circ\text{C}$, однако при этом теряется до 80 % витамина С и 30 % биофлавоноидов. Исследована связь между антиоксидантной активностью отваров и содержанием растворимых сухих веществ. Оптимальными параметрами обработки были признаны 15 мин при $(98 \pm 2)^\circ\text{C}$, что обеспечивает выход 2,0 % растворимых сухих веществ, антиоксидантную активность 206 мВ, сохранение витамина С на уровне 70 % и биофлавоноидов – 90 %. Результаты систематизированы в таблице 5 в соответствии с моделью потребительной стоимости голубики высокорослой.

Таблица 5

Данные о технологических свойствах ягод голубики высокорослой

Показатель	Значение показателя	Объект методических знаний
Показатели сокоотдачи ягод и экстрагируемости биологически активных веществ в процессе гидротермической обработки	$\begin{cases} f(y_1) = -0,39x^2 + 4,57x + 71,45 \\ f(y_2) = -0,28x^2 - 1,47x + 35,13 \end{cases}$ где, Y_i - технологические параметры $(y_1$ – сокоотдача, y_2 – экстрагируемость БАВ) x – продолжительность гидротермической тепловой обработки при t_{const}	Ассортимент блюд и изделий с использованием голубики высокорослой, рецептуры и технологии их производства

С учетом установленных технологических свойств голубики высокорослой был разработан ассортимент сладких блюд, десертов, напитков и кулинарных изделий, который может быть использован для организации экспресс-питания как услуги школьной столовой и обслуживания в режиме буфета (кафе, кафетерия). В рецептурах было снижено содержание сахара до 30 % по сравнению с традиционными рецептурами, что обусловлено высоким сахарокислотным индексом ягод голубики.

Для каждого разработанного блюда был составлен нутриентный профиль – содержание в пищевом продукте целевых нутриентов и ингредиентов. На основании полученных данных рассчитали интегральный показатель, отражающий соотношение в пищевом продукте целевых нутриентов и ингредиентов, – нутриентный скор. В таблице 6 приведен пример расчета нутриентного сора для кулинарной продукции «Грилита с голубикой».

Таблица 6

Расчет нутриентного сора для кулинарной продукции «Грилита с голубикой»

Алиментарный фактор	Содержание в 100 г продукции	Уровень оценки	Балл для алиментарного фактора
<i>Дисквалифицирующие алиментарные факторы</i> $HC_A = C_E + C_{HЖ} + C_C + C_{Na}$			
Энергия (ккал), C_E	228,9	более 240	2
Насыщенные жиры (г), $C_{HЖ}$	1,9	более 1	1
Общие сахара (г), C_C	5,3	более 4,5	1
Натрий (мг), C_{Na}	275,1	более 270	3
<i>Квалифицирующие алиментарные факторы</i> $HC_B = C_{ФО} + C_{Кл} + C_B$			
Фрукты, овощи и орехи (%), $C_{ФО}$	24,7	менее 40	0
Общее количество пищевых волокон (г), $C_{Кл}$	2,2	более 1,9	2
Белок (г), C_B	6,5	более 6,4	4
Нутриентный скор ($HC = HC_A - HC_B$)			1

Далее приведены результаты расчета нутриентного сора для разработанного ассортимента блюд и изделий с использованием ягод голубики (рис.).

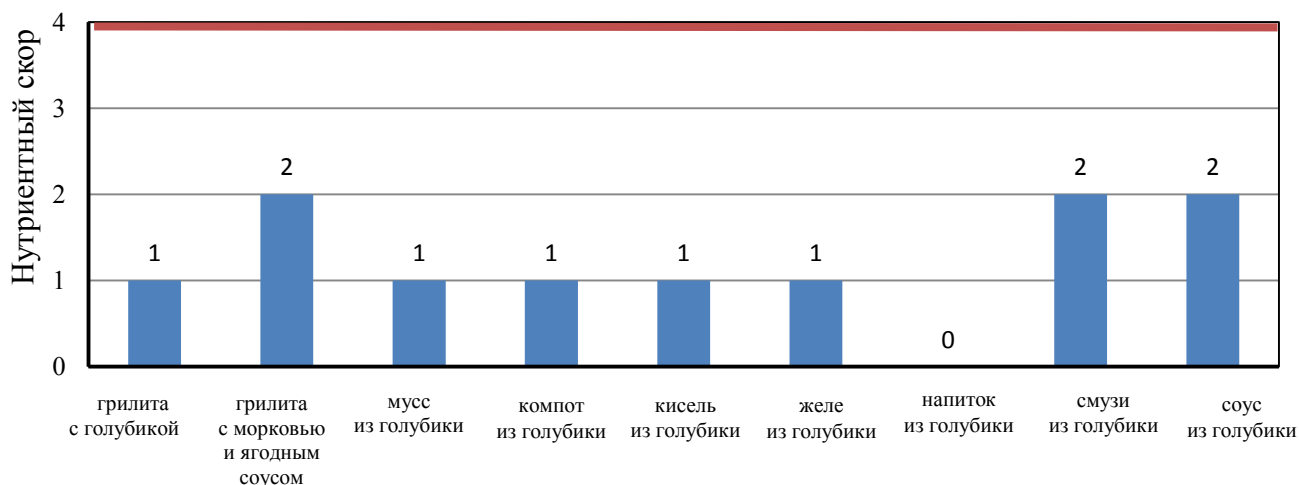


Рисунок – Нутриентный скор для разработанного ассортимента продукции на основе голубики высокорослой

Разработанный ассортимент продукции для школьного питания с использованием ягод голубики характеризовался значениями нутриентного сора до 4 баллов для блюд и изделий, до 1 балла – для напитков, что в соответствии с принципами гигиенического ранжирования [8] позволяет отнести ее к продуктам здорового питания, содержащим дефицитные в питании эссенциальные нутриенты – витамины, микро- и макроэлементы [22].

Заключение

Предложенная модель потребительской стоимости ягод голубики высокорослой, объединяющая показатели потребительских свойств назначения, надежности, эргономичности, безопасности и технологические свойства, приведенные в формате таблицы, является попыткой структурно-аналитического моделирования информации для формирования единого банка данных (БД) о потребительских свойствах заданного ассортимента продуктов здорового питания детей и подростков в организованных коллективах в составе специализированной системы управления базами данных (СУБД).

Интродуцированные в Беларуси сорта голубики высокорослой характеризуются высоким содержанием пектиновых веществ, биофлавоноидов и могут стать основой для разработки новых продуктов здорового питания детей в организованных коллективах. Голубика высокорослая является безопасным сырьем, не накапливающим токсичные вещества в условиях существующего экологического состояния мест произрастания. Данный факт особенно важен при формировании зон сбора сырья для производства продуктов, предназначенных для детей и подростков.

Разработан ассортимент продукции на основе ягод голубики высокорослой, в рецептурах снижено содержание сахара до 30 % по сравнению с традиционными рецептурами. Рекомендуются для этого сорта голубики с высоким сахарокислотным индексом (Duke, Earliblue, Spartan, Jersey).

Дана оценка потенциального влияния блюд и изделий на здоровье методом гигиенического ранжирования. Отмечено, что разработанные блюда и изделия с большей вероятностью могут быть отнесены к продукции здорового питания. Расширение ассортимента продукции с использованием голубики позволит повысить пищевую и биологическую ценность рационов питания. В частности, потребление голубики из расчета 100 г в сутки позволяет удовлетворить потребность детей и подростков в биофлавоноидах до 70 %, катехинах – до 50 %, витамине С – до 25 %, селене – до 50 %.

Библиография

1. Устойчивое здоровое питание – руководящие принципы / FAO и ВОЗ. – Рим, 2020. – 44 с. – URL: <https://doi.org/10.4060/ca6640ru> (дата обращения: 26.02.2024).
2. State of School Feeding Worldwide 2020 / WFP [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.wfp.org/publications/state-school-feeding-worldwide-2020> (дата обращения: 26.02.2024).
3. Масанский С.Л. Нормирование школьного питания на основе педагогической модели питания // Вестник Белорусского гос. ун-та пищевых и химических технологий. – 2021. – № 2 (31). – С. 49–61.
4. Ковалев Н.И. [и др.]. Технология приготовления пищи: учебник / под ред. М.А. Николаевой. – М.: Деловая литература, 2003. – 467 с.
5. Шпак А.П. [и др.]. Методические рекомендации по оценке уровня обеспеченности детского населения основными продуктами питания с целью внедрения их в систему мониторинга национальной продовольственной безопасности. – Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2018. – 51 с.
6. Zou H., Ye H., Zhang J. et al. Recent advances in nuclear receptors-mediated health benefits of blueberry // *Phytomedicine*. – 2022. – Vol. 100. – P. 154063. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944711322001416> (дата обращения: 13.07.2024).
7. Радкевич Т.В. Современное состояние и тенденции развития культуры голубики // *Плодоводство*. – 2022. – № 34 (1). – С. 211–219.
8. Принципы гигиенического ранжирования пищевых продуктов на основе их состава и потенциального влияния на здоровье: инструкция по применению, утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 11.05.2022. – Минск: Респ. центр гигиены, эпидемиологии и обществ. здоровья, 2021. – 22 с.
9. Чернышов В.Н. и др. Теория систем и системный анализ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.
10. Николаева М.А. Товароведение потребительских товаров. Теоретические основы. – М.: Норма, 1997. – 283 с.
11. Рупасова Ж.А. [и др.]. Формирование биохимического состава плодов видов семейства *Ericaceae* (Вересковые) при интродукции в условиях Беларуси. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 307 с.
12. Duan Y., Tarafdar A., Chaurasia D. et al. Blueberry fruit valorization and valuable constituents: A review // *International Journal of Food Microbiology*. – 2022. – Vol. 381. – P. 109890. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160522003622> (дата обращения: 10.08.2024).

13. Li D., Li B., Ma Y. et al. Polyphenols, antho-cyanins, and flavonoids contents and the antioxidant capacity of various cultivars of highbush and half-high blueberries // *Journal of Food Composition and Analysis*. – 2017. – Vol. 62. – P. 84–93. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157517300728> (дата обращения: 10.08.2024).
14. Castrejón A.D.R., Eichholz I., Rohn S. et al. Phenolic profile and antioxidant activity of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) during fruit maturation and ripening // *Food Chemistry*. – 2008. – Vol. 109, Iss. 3. – P. 564–572. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814608000587> (дата обращения: 10.07.2024).
15. Davidson, K.T., Zhu, Z., Bai, Q. et al. Blueberry as a Potential Radiosensitizer for Treat-ing Cervical Cancer // *Pathol. Oncol. Res.* – 2019. – Vol. 25. – P. 81–88. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12253-017-0319-y> (дата обращения: 09.08.2024).
16. Min Shi, Hayley Loftus, Andrew J. McAinch et al. Blueberry as a source of bio-active compounds for the treatment of obesity, type 2 diabetes and chronic inflammation // *Journal of Functional Foods*. – 2017. – Vol. 30. – P. 16–29. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464616304352> (дата обращения: 09.08.2024).
17. Nikolaj Travica, Nathan M. D'Cunha, Nenad Naumovski et al. The effect of blueberry interventions on cognitive performance and mood: A systematic review of randomized controlled trials // *Brain, Behavior, and Immunity*. – 2020. – Vol. 85. – P. 96–105. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889159118311954> (дата обращения: 03.08.2024).
18. Basu A, Lyons TJ. Strawberries, blueberries, and cranberries in the metabolic syndrome: clinical perspectives // *J Agric Food Chem.* – 2012. – Vol. 60 (23). – P. 5687-92. – DOI: 10.1021/jf203488k. – URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf203488k> (дата обращения: 03.09.2024).
19. Mehnaz Pervin, Md. Abul Hasnat, Ji-Hong Lim et al. Preventive and therapeutic effects of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) extract against DSS-induced ulcerative colitis by regulation of antioxidant and inflammatory me-diators // *The Journal of Nutritional Biochemistry*. – 2016. – Vol. 28. – P. 103–113. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955286315002995> (дата обращения: 13.08.2024).
20. Фролова Н.А., Верхотуров В.В., Шкрабтак Н.В. и др. Анализ биологически активных веществ плодов *Hipporhae rhamnoides* L. // *Вестник ВСГУТУ*. – 2024. – № 4 (95). – С. 36–42.
21. Пинчукова Ю.М. Товароведно-технологические свойства ягод голубики высокорослой и ее использование в составе сладких блюд и напитков: дис. канд. техн. наук: 05.18.15 / Ю.М. Пинчукова. – Могилев, 2013. – 172 с. – URL: <http://dep.nlb.by/jspui/handle/nlb/42456>
22. Лебедева С.Н., Жамсаранова С.Д. Оценка рациона студентов и его роль в формировании факторов риска алиментарно-зависимых заболеваний // *Вестник ВСГУТУ*. – 2017. – № 3 (66). – С. 78–84.

Bibliography

1. Sustainable healthy diets – Guidelines / FAO and WHO. – Rome, 2020. – 44 p. – URL: <https://doi.org/10.4060/ca6640ru> (access date: 02/26/2024).
2. State of School Feeding Worldwide 2020 / WFP [Electronic resource] – URL: <https://www.wfp.org/publications/state-school-feeding-worldwide-2020>
3. Masanskiy S.L. Rationing of school meals based on nutrition pedagogical model // *Bulletin of Belarusian State University of Food and Chemical Technologies*. – 2021. – N 2 (31). – P. 49–61.
4. Kovalev N.I. [et al.]. *Technology of cooking: textbook*. – M.: Business literature Publishing House, 2003. – 467 p.
5. Shpak A.P [et al.]. *Methodological recommendations for assessing the level of basic foodstuff provision of the child population in order to introduce them into the system of national food security monitoring*. – Minsk: Institute of System Research in Agro- Industrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018. – P. 21–51.
6. Zou H., Ye H., Zhang J. et al. Recent advances in nuclear receptors-mediated health benefits of blueberry // *Phytomedicine*. – 2022. – Vol. 100. – P. 154063. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944711322001416> (access date: 13.07.2024).
7. Radkevich T.V. Current state and development trends of blueberry crop // *Fruit Growing*. – 2022. – N 34 (1). – P. 211–219.

8. Principles of hygienic ranking of food products based on their composition and potential impact on health: instructions: approved by the Ministry of Health of the Republic Belarus 05.11.22. – Minsk: Republican Centre for Hygiene, Epidemiology and Public Health, 2021. – 22 p.
9. *Chernyshov V.N. [et al.]*. Systems theory and system analysis: textbook. – Tambov: Publishing House of Tambov State Technical University, 2008. – 96 p.
10. *Nikolaeva M.A.* Consumer goods merchandising. Theoretical background. – M.: Norma Publishing House, 1997. – 283 p.
11. *Rupasova Zh. A. [et al.]*. Biochemical composition formation of fruits of Ericaceae (Heaths) family species during introduction in conditions of Belarus – Minsk: Belarusian Science Publishing House, 2011. – 307 p.
12. *Duan Y., Tarafdar A., Chaurasia D. et al.* Blueberry fruit valorization and valuable constituents: A review // *International Journal of Food Microbiology*. – 2022. – Vol. 381. – P. 109890. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160522003622> (access date: 10.08.2024).
13. *Li D., Li B., Ma Y. et al.* Polyphenols, anthocyanins, and flavonoids contents and the antioxidant capacity of various cultivars of highbush and half-high blueberries // *Journal of Food Composition and Analysis*. – 2017. – Vol. 62. – P. 84–93. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889157517300728> (access date: 10.08.2024).
14. *Castrejón A.D.R., Eichholz I., Rohn S. et al.* Phenolic profile and antioxidant activity of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) during fruit maturation and ripening // *Food Chemistry*. – 2008. – Vol. 109, Iss. 3. – P. 564–572. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814608000587> (access date: 10.07.2024).
15. *Davidson, K.T., Zhu Z., Bai Q. et al.* Blueberry as a potential radio sensitizer for treating cervical cancer // *Pathology and Oncology Research*. – 2019. – Vol. 25. – P. 81–88. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12253-017-0319-y> (access date: 09.08.2024).
16. *Min Shi, Hayley Loftus, Andrew J. McAinch et al.* Blueberry as a source of bio-active compounds for the treatment of obesity, type 2 diabetes and chronic inflammation // *Journal of Functional Foods*. – 2017. – Vol. 30. – P. 16–29. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464616304352> (access date: 09.08.2024).
17. *Nikolaj Travica, Nathan M. D'Cunha, Nenad Naumovski et al.* The effect of blueberry interventions on cognitive performance and mood: A systematic review of randomized controlled trials // *Brain, Behavior, and Immunity*. – 2020. – Vol. 85. – P. 96–105. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889159118311954> (access date: 03.08.2024).
18. *Basu A, Lyons T.J.* Strawberries, blueberries, and cranberries in the metabolic syndrome: clinical perspectives // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2012. – Vol. 60 (23). – P. 5687–92. – DOI: 10.1021/jf203488k. – URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf203488k> (access date: 03.09.2024).
19. *Mehnaz Pervin, Md. Abul Hasnat, Ji-Hong Lim et al.* Preventive and therapeutic effects of blueberry (*Vaccinium corymbosum*) extract against DSS-induced ulcerative colitis by regulation of antioxidant and inflammatory mediators // *Journal of Nutritional Biochemistry*. – 2016. – Vol. 28. – P. 103–113. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955286315002995> (access date: 13.08.2024).
20. *Frolova N.A., Verkhoturov V.V., Shkrabtak N.V. et al.* Analysis of biologically active substances of *Hippophae rhamnoides* L. fruit // *ESSUTM Bulletin*. – 2024 – N 4 (95). – P. 36–42.
21. *Pinchukova Yu.M.* Commodity and technological properties of highbush blueberries and their use in sweet dishes and drinks: diss. ... Cand. Sc. Engineering: (05.18.15) / Yu.M. Pinchukova. – Mogilev, 2013. – 172 p. – URL: <http://dep.nlb.by/jspuryyi/handle/nlb/42456>
22. *Lebedeva S.N., Zhamsaranova S.D.* Assessment of the students nutrition and its role in the formation of risk factors of alimentary diseases // *ESSUTM Bulletin*. – 2017 – N 3 (66). – P. 78–84.

4.3.5 – БИОТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

DOI 10.53980/24131997_2025_1_35

К.А. Рухляда, аспирант, e-mail: ksn.ruh@gmail.com

В.В. Матыцина, аспирант, e-mail: vikaamtcn@mail.ru

Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

УДК 633.529.3

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРАКЦИИ КАРОТИНОИДОВ ИЗ БУРЫХ ВОДОРОСЛЕЙ *FUCUS VESICULOSUS* И ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ ЭКСТРАКТА

*Бурые морские водоросли являются перспективным сырьем для получения биологически активных веществ, так как содержат большое количество химических соединений, способных оказывать влияние на здоровье организма человека. К тому же водоросли – это дешевое сырье, не требующее сложных технологий получения и переработки, что делает их экономически выгодным исходным материалом. Одной из перспективных тем в пищевой промышленности является получение антиоксидантов для дальнейшего использования их при производстве продуктов питания с целью увеличения сроков годности продуктов и создания функциональных продуктов питания. В данной статье описаны антиоксидантные свойства экстрактов, полученных из бурых водорослей Балтийского моря *Fucus vesiculosus*. Описаны математические методы моделирования полнофакторного эксперимента для определения оптимальных параметров экстракции каротиноидов, обладающих антиоксидантными свойствами, построены графики поверхностей отклика, а также выведено уравнение регрессии. Определены перспективы использования бурых водорослей для экстракции каротиноидов.*

Ключевые слова: *Fucus vesiculosus*, бурые водоросли, антиоксидантная активность, каротиноиды, спиртовая экстракция.

K.A. Rukhlyada, PG student

V.V. Matytsina, PG student

National Research University ITMO, Saint Petersburg

SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF CAROTENOIDS EXTRACTION FROM BROWN ALGAE *FUCUS VESICULOSUS* AND DETERMINATION OF ANTIOXIDANT ACTIVITY OF THE EXTRACT

*Brown algae are promising raw materials to produce biologically active substances, as they contain many chemical compounds affecting human health. Moreover, algae are cheap raw stuff that does not require complex production and processing technologies, making them an economically profitable source material. One of the promising topics in the food industry is to obtain antioxidants for further use in food production for increasing shelf life and creating functional foods. This article describes antioxidant properties of extracts obtained from the brown algae *Fucus vesiculosus* of the Baltic Sea. It describes mathematical methods of modeling a full-factor experiment to determine the optimal parameters of carotenoids extraction, with antioxidant properties and derives response surface graphs and regression equation. Prospects of using brown algae for carotenoid extraction have been determined.*

Key words: *Fucus vesiculosus*, brown algae, antioxidant activity, carotenoids, alcohol extraction.

Введение

Морские коричневые макроводоросли производят множество высокобиоактивных вторичных метаболитов со структурами, которые не встречаются в других организмах. Различные компоненты и фракции в коричневых макроводорослях имеют большой потенциал в качестве антиоксидантных пищевых добавок, подходящих для коммерческой эксплуатации. Также в их составе имеются широко распространенные красящие пигменты, относящиеся по химической

природе к флавоноидным и каротиноидным соединениям, которые являются основой красных, оранжевых и желтых красителей. β -каротин служит для защиты иммунной системы, профилактики гастроэнтерологических, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, известен как антиокислитель. Флавоноиды обладают антиоксидантным, капилляроукрепляющим, желчегонным, гепатопротекторным, противовирусным и антимикробным действием [1].

Натуральные пигменты (как хлорофиллы, так и каротиноиды) обладают антиоксидантной активностью [2, 3], что позволяет использовать бурые водоросли в качестве источника природных антиоксидантов. Свободные радикалы могут повреждать клетки и способствовать развитию различных заболеваний, поэтому антиоксиданты важны для поддержания здоровья и защиты организма. Чем выше процент антиоксидантной активности, тем эффективнее продукт в борьбе со свободными радикалами [4].

Каротиноиды – это семейство пигментированных соединений, которые синтезируются растениями и микроорганизмами, но не животными. Считается, что каротиноиды отвечают за полезные свойства фруктов и овощей в профилактике заболеваний человека, включая сердечно-сосудистые, рак и другие хронические заболевания [5]. Каротиноиды представляют собой важные природные пигменты, обладающие мощными антиоксидантными свойствами [6] и играющие ключевую роль в поддержании здоровья человека. Они не только способствуют защите клеток от окислительного стресса, но и участвуют в процессах фотосинтеза у растений. Каротиноиды являются источником провитамина А, способствуют здоровому цвету кожи, помогают поддерживать нормальное зрение. Также имеются достоверные доказательства улучшения когнитивных функций после приема определенных каротиноидов. Пищевая добавка E₁₆₀ – каротин – придает продуктам оранжевый цвет.

Натуральные антиоксиданты – это соединения, которые вызвали большой интерес, так как могут заменить синтетические антиоксиданты в продлении срока хранения продуктов питания и косметики, задерживая окисление. Они также могут придать продукту ценные свойства, действуя против заболеваний, связанных с окислением, старения и воздействия ультрафиолета на кожу. Одним из способов регулирования адаптационного уровня организма человека является доставка нутриентов, обладающих антиоксидантными свойствами [7]. В последние годы были предложены биологически активные соединения морских водорослей для получения нутрицевтиков и функциональных продуктов питания.

Морские водоросли обычно делятся на три группы в зависимости от их пигментации: коричневые (*Phaeophyceae*), красные (*Rhodophyceae*) и зеленые (*Chlorophyceae*). Сообщалось, что *Phaeophyta* содержат сравнительно более высокое количество и более активные антиоксиданты, чем зеленые и красные водоросли [8, 9]. Пигменты водорослей, участвующие в процессах фотосинтеза, могут быть использованы в качестве биологически активного вещества с антиоксидантными свойствами. В последние годы изучение антиоксидантных свойств каротиноидов было основным направлением исследований [10, 11]. Например, фукоксантин, являющийся основным каротиноидом, производимым бурыми водорослями, оказывает противоопухолевую активность, ингибирует рост раковых клеток [12]. В настоящее время фукоксантин считается безопасной добавкой Европейским управлением по безопасности пищевых продуктов.

Одним из перспективных источников каротиноидов являются бурые водоросли, среди которых особое внимание привлекает вид *Fucus vesiculosus* (рис. 1).

Этот вид водорослей широко распространен в северных морях и обладает уникальным химическим составом, что делает его ценным объектом для исследований. *F. Vesiculosus* часто характеризуется как самый важный из всех фитобентических видов в прибрежной зоне Балтии. Это связано с его широким распространением и высокой скоростью набора биомассы. Этот вид обитает вдоль скалистых и каменистых берегов, где играет важную структурную роль и оказывает положительное влияние на биоразнообразие [13].

Фукус пузырчатый является устойчивым ресурсом, который может быть собран с минимальным воздействием на окружающую среду. Его использование в качестве источника каротиноидов может способствовать развитию устойчивых практик в аквакультуре и морском хозяйстве.



Рисунок 1 – *Fucus vesiculosus*

Цель данного исследования – определение целесообразности использования бурых водорослей в качестве сырья для извлечения каротиноидов, обладающих антиоксидантной активностью.

В процессе работы будут рассмотрены различные факторы экстракции, включая температуру, гидромодуль и продолжительность экстракции, что позволит выявить наиболее эффективные подходы для извлечения каротиноидов. Оценка антиоксидантной активности экстракта позволит установить его потенциальное применение в пищевой и фармацевтической промышленности.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись бурые водоросли *Fucus vesiculosus*, собранные в Балтийском море в осенний сезон. Перед экстракцией водоросли были высушены и измельчены.

Каротиноиды извлекали путем экстрагирования материала этиловым спиртом, так как в ходе экстракции этанолом извлекается основная часть минеральных и органических веществ, обладающих биологической активностью. Низкая токсичность этанола определяет его использование в пищевой промышленности в качестве растворителя.

Для определения оптимальных условий экстракции каротиноидов из бурых водорослей, а также целесообразности использования бурых водорослей в качестве источника каротиноидов был проведен полнофакторный эксперимент. Для определения параметров экстракции была использована матрица экспериментов, составленная в соответствии с принципами систематического подхода к моделированию процессов. План факторного эксперимента был разработан в соответствии с дизайном Бокса – Бенкена (ориг. Box – Behnken design, или BBD), который позволяет построить регрессионную модель при меньшем количестве экспериментальных серий, нежели CCD (Central composite design), или полный факторный эксперимент, за счет отсутствия точек, в которых сразу несколько факторов принимают экстремальные значения. При оптимизации использовали метод отклика поверхности для исследования взаимосвязей между входными факторами и откликом на основе данных, полученных в ходе эксперимента [14].

Для описания процесса была выбрана полиномиальная модель второго порядка (формула 1).

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i X_i + \sum_{i=1}^3 A_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 A_{ij} X_{ij}, \quad (1)$$

где A_0 , A_i , A_{ii} и A_{ij} – коэффициенты регрессии; Y – значение зависимой переменной; X_i , X_j – независимые переменные. Уравнение отражает линейное, квадратичное и перекрестное влияние независимых факторов на отклик.

В качестве входных факторов были выбраны следующие параметры: температура – от 2 до 50 °С, гидромодуль – от 1:20 до 1:5, длительность экстракции – в диапазоне от 120 до 360 мин. Для удобства каждому фактору был присвоен буквенный код (А – температура, °С, В – гидромодуль, С – продолжительность экстракции, мин). Уровни независимых переменных с их значениями приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уровни независимых переменных для экстракции каротиноидов

Фактор		Уровень		
		-1	0	+1
А	Температура, °С	2	26	50
В	Гидромодуль	1:20	1:10	1:5
С	Продолжительность экстракции, ч	120	240	360

Откликом являлось количество каротиноидов, которое рассчитывали по формуле (2) [15]:

$$C_c = \frac{1000 \cdot D_{470} - 2,13 \cdot C_{ch(a)} - 97,63 \cdot C_{ch(b)}}{209}, \quad (2)$$

где C_c – количественное содержание каротиноидов (мг/л); D_{470} – оптическая плотность в области максимума поглощения каротиноидов; $C_{ch(a)}$, $C_{ch(b)}$ – содержание хлорофиллов а и b в экстракте.

Планирование, статистическая обработка данных и оптимизация эксперимента проводились в программе Minitab 21.1.1 (Minitab, Inc., США).

Для определения антиоксидантной активности каротиноидов в экстракте использовали метод DPPH, основанный на взаимодействии радикалов со стабильным хромоген-радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (DPPH) [16]. Раствор DPPH готовили по стандартной методике: в мерной колбе взвешивали реактив массой 0,004 г и разбавляли его 100 мл этилового спирта. Кинетику снижения оптической плотности раствора до и после добавления DPPH регистрировали в течение 30 мин при длине волны 517 нм [17].

Антирадикальную активность определяли по формуле 3.

$$\% \text{ ингибирования} = \frac{A_0 - A_x}{A_0} \times 100 \%, \quad (3)$$

где A_x – оптическая плотность исследуемого раствора; A_0 – оптическая плотность экстракта.

Результаты эксперимента

Для экстракции каротиноидов в качестве растворителя был использован этиловый спирт (96 %), количественные параметры изменялись в следующем порядке: температура (20, 35, 50 °С), гидромодуль (1:20, 1:10, 1:5) и время экстракции (120, 240, 360 мин).

Полученные данные для дизайна каждого эксперимента приведены в таблице 2. Все измерения проведены в трех повторностях.

При статистическом анализе была определена значимость параметров. На диаграмме Парето стандартизированных эффектов (рис. 2) все параметры имели значение ниже 2,228 – концентрации каротиноидов (мг/л) при критерии значимости $p = 0,05$. Это позволило сделать вывод, что при данной модели независимые параметры не оказывали влияние на статистическую модель.

Дизайн эксперимента

Номер эксперимента	Температура, °С	Гидромодуль	Продолжительность экстракции, мин	Содержание каротиноидов, мг/л
1	35	1:20	240	не обнаружено
2	50	1:20	120	не обнаружено
3	50	1:5	120	0,45 ± 0,02
4	20	1:5	360	0,71 ± 0,02
5	35	1:10	240	0,01 ± 0,02
6	35	1:10	120	0,02 ± 0,02
7	35	1:10	240	0,09 ± 0,02
8	20	1:10	240	0,37 ± 0,02
9	20	1:20	360	не обнаружено
10	35	1:10	240	0,04 ± 0,02
11	35	1:5	240	0,63 ± 0,02
12	50	1:20	360	0,11 ± 0,02
13	20	1:20	120	не обнаружено
14	35	1:10	360	0,04 ± 0,02
15	20	1:5	120	0,14 ± 0,02
16	35	1:10	240	0,03 ± 0,02
17	35	1:10	240	0,49 ± 0,02
18	35	1:10	240	не обнаружено
19	50	1:5	360	не обнаружено
20	50	1:10	240	0,22 ± 0,02

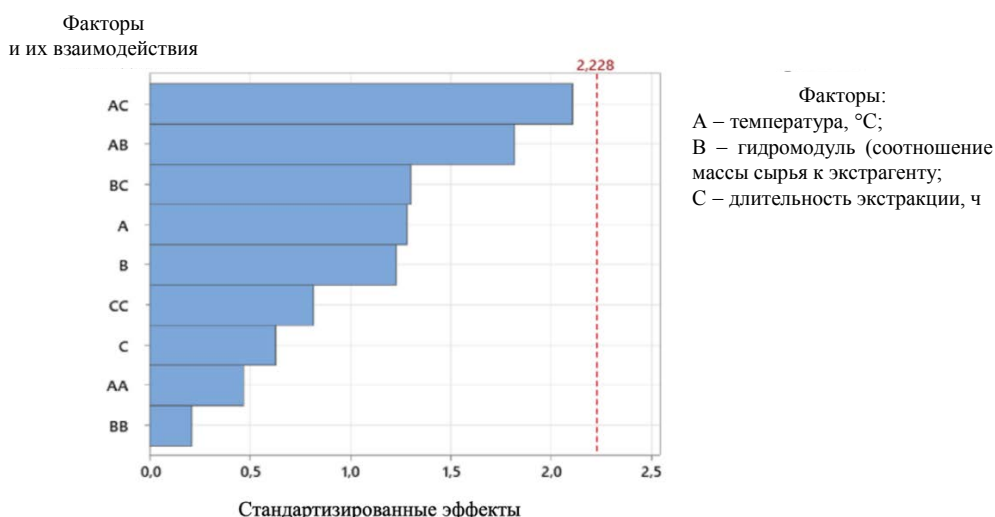


Рисунок 2 – Диаграмма Парето стандартизированных эффектов (отклик – содержание каротиноидов, мг/л)

Также была определена регрессионная модель, в которой коэффициент детерминации равен 0,5835. Это означало, что примерно 58 % вариации зависимой переменной можно было объяснить независимыми переменными в модели. Подобный коэффициент детерминации являлся удовлетворительным при статистической обработке модели, модель являлась статистически значимой, но нуждалась в доработке или изменении параметров.

Статистически значимыми параметрами оказались гидромодуль и температура. Длительность экстракции оказывала незначительное влияние.

С помощью дисперсионного анализа была выполнена оценка статистической значимости каждого из регрессионных коэффициентов, включая линейные, квадратичные и эффекты взаимодействий. Для эксперимента было определено уравнение регрессии (4).

$$Y = -2,47 + 0,0192 \times A + 14,8 \times B + 0,000428 \times A^2 - 7,8 \times B^2 - 0,196 \times AB, \quad (4)$$

где А – температура, °С; В – гидромодуль.

Графики поверхности также иллюстрируют характер зависимости отклика от входных факторов (рис. 3).

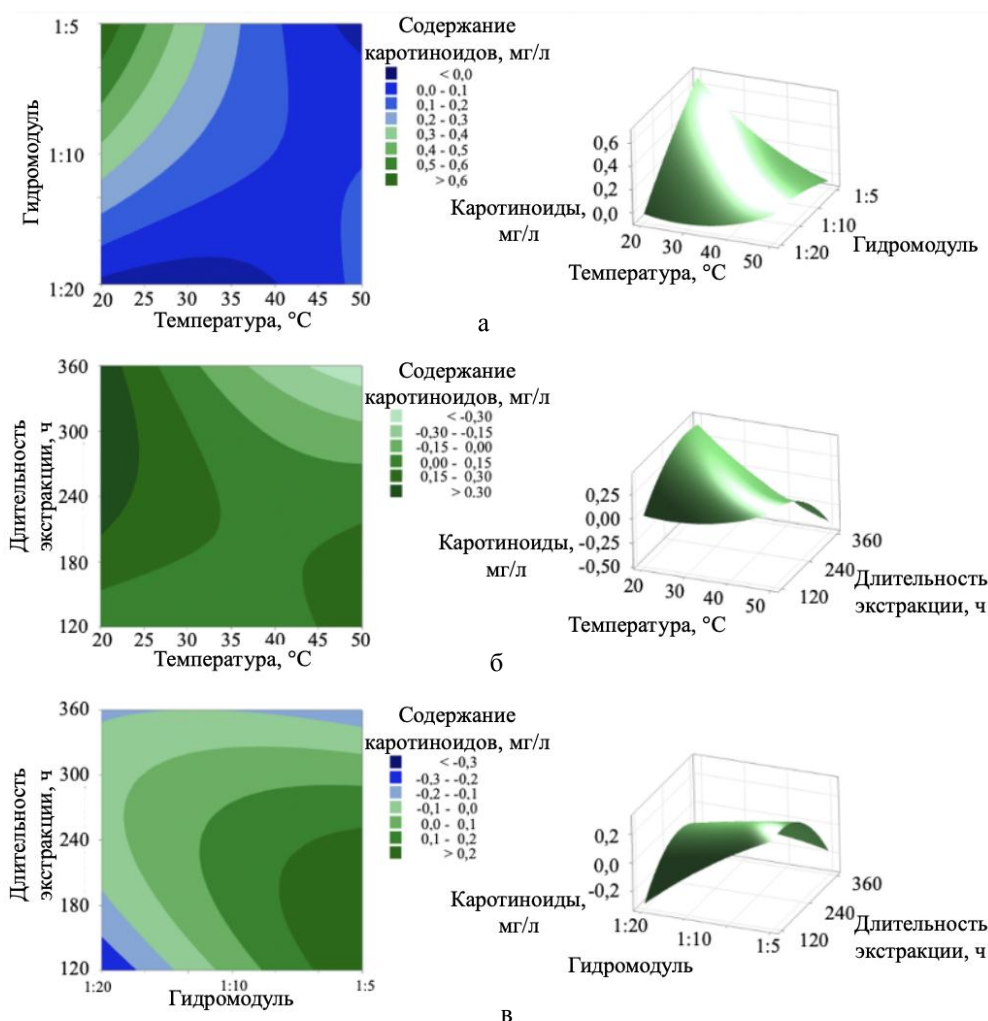


Рисунок 3 – Графики поверхности отклика и контурные графики для экстракции каротиноидов: а – зависимость содержания каротиноидов (мг/л) при взаимном влиянии гидромодуля и температуры; б – зависимость содержания каротиноидов (мг/л) при взаимном влиянии продолжительности экстракции и температуры; в – зависимость содержания каротиноидов (мг/л) при взаимном влиянии продолжительности экстракции и гидромодуля

На рисунке 3а форма поверхности соответствовала взаимному влиянию переменных температуры и гидромодуля, при этом максимум функции отмечался при максимальном уровне гидромодуля и минимальной температуре. На рисунке 3б форма поверхности соответствовала взаимному влиянию переменных температуры и продолжительности экстракции, при этом максимум функции отмечался при максимальной длительности экстракции. На рисунке 3в форма поверхности соответствовала взаимному влиянию переменных гидромодуля и продолжительности экстракции, при этом максимум функции отмечался при максимальном значении гидромодуля.

В ходе эксперимента было установлено, что максимальное извлечение каротиноидов наблюдалось при гидромодуле 1:5 и температуре экстракции 20 °C. При этом статистическая модель нуждалась в доработке, поэтому в рамках дальнейших исследований планируется рассмотреть в качестве экстрагентов хлороформ и ацетон, при использовании которых потребуются дальнейшая очистка полученных каротиноидов, так как эти экстрагенты небезопасны при использовании в пищевом производстве.

Антиоксидантная активность каротиноидов была определена в экстракте с наибольшим выходом каротиноидов (гидромодуль 1:5, температура экстракции 20 °С, растворитель – этиловый спирт (96 %)) по формуле (3). Антиоксидантная активность выбранного экстракта составила 75 %, следовательно, каротиноиды, экстрагированные из исследуемых водорослей, обладали высокой способностью защиты клеток от действия свободных радикалов.

Заключение

Наибольший выход каротиноидов наблюдался в экстракте, полученном при температуре 20 °С и гидромодуле 1:5. Данный экстракт показал хороший результат ингибирования свободных радикалов – 75 %, что позволило сделать вывод о высокой антиоксидантной активности экстрактов бурых водорослей и перспективности их использования в качестве сырья для получения биологически активных добавок.

С учетом растущего интереса к натуральным продуктам и здоровому образу жизни фукус может стать ценным источником биоактивных соединений, что откроет новые возможности для его применения в различных отраслях, включая пищевую, косметическую и фармацевтическую. Дальнейшие исследования и разработки технологий экстракции помогут максимально эффективно использовать этот ресурс и раскрыть его потенциал для здоровья человека.

В рамках дальнейших исследований планируется расширить спектр биологически активных веществ, выделенных из бурых водорослей, для получения биологически активных добавок (полифенольные, йодсодержащие соединения, полисахариды) с терапевтическими и антиоксидантными свойствами.

Работа выполнена при поддержке научного проекта НИРМА Университета ИТМО № 623096 «Научно-практические аспекты переработки возобновляемых источников сырья для получения биотоплива и продуктов с высокой добавленной стоимостью» (руководитель: О.В. Кригер).

Библиография

1. Babich O. [et al.]. Phytotherapeutic Approaches to the Prevention of Age-Related Changes and the Extension of Active Longevity // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, N 7. – P. 2276.
2. Pérez-Gálvez A., Viera I., Roca M. Carotenoids and Chlorophylls as Antioxidants // *Antioxidants*. – 2020. – Vol. 9, N 6. – P. 505.
3. Гинойн П.В. Сравнительная оценка экспериментальных образцов творожной массы с различными растительными добавками // *Вестник ВСГУТУ*. – 2020. – № 3 (78). – С. 6–13.
4. Parcheta M. [et al.]. Recent Developments in Effective Antioxidants: The Structure and Antioxidant Properties // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, N 8. – P. 1984.
5. Meléndez- Martínez A.J. An Overview of Carotenoids, Apocarotenoids, and Vitamin A in Agro-Food, Nutrition, Health, and Disease // *Mol Nutr Food Res*. – 2019. – Vol. 63, N 15.
6. Eggersdorfer M., Wyss A. Carotenoids in human nutrition and health // *Arch Biochem Biophys*. – 2018. – Vol. 652. – P. 18–26.
7. Егорова П.А. Влияние лука угловатого *Allium angulosum* L. на процесс окисления разных видов животного жира при хранении // *Вестник ВСГУТУ*. – 2020. – № 1 (76). – С. 26–36.
8. Aziz E. [et al.]. An overview on red algae bioactive compounds and their pharmaceutical applications // *J Complement Integr Med*. – 2021. – Vol. 17, N 4.
9. Balboa E.M. [et al.]. *In vitro* antioxidant properties of crude extracts and compounds from brown algae // *Food Chem*. – 2013. – Vol. 138, N 2–3. – P. 1764–1785.
10. Britton G. Carotenoid research: History and new perspectives for chemistry in biological systems // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular and Cell Biology of Lipids*. – 2020. – Vol. 1865, N 11. – P. 158699.
11. Rao A., Rao L. Carotenoids and human health // *Pharmacol Res*. – 2007. – Vol. 55, N 3. – P. 207–216.
12. Karpiński T.M. [et al.]. What Do We Know about Antimicrobial Activity of Astaxanthin and Fucoxanthin? // *Mar Drugs*. – 2021. – Vol. 20, N 1. – P. 36.

13. Torn K., Krause-Jensen D., Martin G. Present and past depth distribution of bladderwrack (*Fucus vesiculosus*) in the Baltic Sea // *Aquat Bot.* – 2006. – Vol. 84, N 1. – P. 53–62.
14. Ying Y. [et al.]. Optimization of ultrasonic-assisted freezing of *Penaeus chinensis* by response surface methodology // *Food Quality and Safety.* – 2021. – Vol. 5.
15. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // *Biochem Soc Trans.* – 1983. – Vol. 11, N 5. – P. 591–592.
16. Adesanwo J.K., Makinde O.O., Obafemi C.A. Phytochemical analysis and antioxidant activity of methanol extract and betulinic acid isolated from the roots of *Tetracera potatoria* // *J Pharm Res.* – 2013. – Vol. 6, N 9. – P. 903–907.
17. Huang D., Ou B., Prior R.L. The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays // *J Agric Food Chem.* – 2005. – Vol. 53, N 6. – P. 1841–1856.

Bibliography

1. Babich O. [et al.]. Phytotherapeutic approaches to the prevention of age-related changes and the extension of active longevity // *Molecules.* – 2022. – Vol. 27, N 7. – P. 2276.
2. Pérez-Gálvez A., Viera I., Roca M. Carotenoids and chlorophylls as antioxidants // *Antioxidants.* – 2020. – Vol. 9, N 6. – P. 505.
3. Ginoyan R.V. Comparative evaluation of experimental samples of curd mass with various plant additives // *ESSUTM Bulletin.* – 2020. – N 3 (78). – P. 6–13.
4. Parcheta M. [et al.]. Recent developments in effective antioxidants: the structure and antioxidant properties // *Materials.* – 2021. – Vol. 14, N 8. – P. 1984.
5. Meléndez-Martínez A.J. An Overview of carotenoids, apocarotenoids, and vitamin A in agro-food, nutrition, health, and disease // *Molecular Nutrition and Food Research* – 2019. – Vol. 63, N 15.
6. Eggersdorfer M., Wyss A. Carotenoids in human nutrition and health // *Archives of Biochemistry and Biophysics.* – 2018. – Vol. 652. – P. 18–26.
7. Egorova R.A. Influence of angular onion *Allium angulosum* L. on the oxidation process of different types of animal fat during storage // *ESSUTM Bulletin.* – 2020. – N 1 (76). – P. 26–36.
8. Aziz E. [et al.]. An overview on red algae bioactive compounds and their pharmaceutical applications // *Journal of Complementary and Integrative Medicine.* – 2021. – Vol. 17, N 4.
9. Balboa E.M. [et al.]. In vitro antioxidant properties of crude extracts and compounds from brown algae // *Food Chemistry.* – 2013. – Vol. 138, N 2–3. – P. 1764–1785.
10. Britton G. Carotenoid research: History and new perspectives for chemistry in biological systems // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular and Cell Biology of Lipids.* – 2020. – Vol. 1865, N 11. – P. 158699.
11. Rao A., Rao L. Carotenoids and human health // *Pharmacological Research.* – 2007. – Vol. 55, N 3. – P. 207–216.
12. Karpiński T.M. [et al.]. What do we know about antimicrobial activity of astaxanthin and fucoxanthin? // *Marine Drugs.* – 2021. – Vol. 20, N 1. – P. 36.
13. Torn K., Krause-Jensen D., Martin G. Present and past depth distribution of bladderwrack (*Fucus vesiculosus*) in the Baltic Sea // *Aquatic Botany.* – 2006. – Vol. 84, N 1. – P. 53–62.
14. Ying Y. [et al.]. Optimization of ultrasonic-assisted freezing of *Penaeus chinensis* by response surface methodology // *Food Quality and Safety.* – 2021. – Vol. 5.
15. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // *Biochemical Society Transactions.* – 1983. – Vol. 11, N 5. – P. 591–592.
16. Adesanwo J.K., Makinde O.O., Obafemi C.A. Phytochemical analysis and antioxidant activity of methanol extract and betulinic acid isolated from the roots of *Tetracera potatoria* // *Journal of Pharmacy Research.* – 2013. – Vol. 6, N 9. – P. 903–907.
17. Huang D., Ou B., Prior R.L. The chemistry behind antioxidant capacity assays // *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* – 2005. – Vol. 53, N 6. – P. 1841–1856.

DOI 10.53980/24131997_2025_1_43

О.В. Табакаева¹, д-р техн. наук, доц., проф., e-mail: tabakaeva.ov@dvmfu.ru

С.В. Капуста¹, аспирант, e-mail: kapusta.sv@dvmfu.ru

А.В. Табакаев¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: tabakaev.av@dvmfu.ru

С.Л. Тихонов^{2,3}, д-р техн. наук, проф., e-mail: tihonov75@bk.ru

¹ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

² Уральский государственный лесотехнический университет

³ Уральский государственный аграрный университет

г. Екатеринбург

УДК 66.094.3

**ФЕРМЕНТАТИВНЫЙ ГИДРОЛИЗ МОРСКИХ БУРЫХ ВОДОРОСЛЕЙ
ASCOPHYLLUM NODOSUM И UNDARIA PINNATIFIDA:
ПОДБОР УСЛОВИЙ
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛОВ**

*В статье рассматривается процесс ферментативного гидролиза морских бурых водорослей *Ascophyllum nodosum* и *Undaria pinnatifida* с целью оптимизации условий для эффективного извлечения полифенолов. Морские бурые водоросли представляют собой богатый источник биоактивных соединений, включая полифенолы, которые обладают антиоксидантными, противовоспалительными и антимикробными свойствами. Исследование акцентирует внимание на сложности клеточной стенки водорослей, которая ограничивает биодоступность их питательных компонентов. Ферментативный гидролиз рассматривается как предпочтительный метод разрушения клеточных стенок, позволяющий сохранить структуру биомолекул и снизить экологическую нагрузку по сравнению с химическими методами. В ходе работы использованы специфические ферменты, способные разрывать белково-полисахаридные комплексы на более усвояемые формы, что повышает биодоступность и сохраняет функциональные свойства полифенолов. Результаты исследования показали, что подбор оптимальных условий ферментативного гидролиза позволяет значительно увеличить извлечение полифенолов из водорослей. Полученные данные открывают перспективы для использования ферментализатов бурых водорослей в пищевой и других отраслях промышленности, предлагая экологически устойчивый подход к использованию морских ресурсов.*

Ключевые слова: водоросли, ферментативный гидролиз, фермент, полифенолы, извлечение, морские ресурсы.

O.V. Tabakaeva¹, Dr. Sc. Engineering, Assoc. Prof., Prof.

S.V. Kapusta¹, PG Student

A.V. Tabakaev¹, Cand. Sc. Engineering, Associate Prof.

S.L. Tihonov^{2,3}, Dr. Sc. Engineering, Prof.

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok

² Ural State Agricultural University

³ Ural State Forestry Engineering University

Ekaterinburg

**ENZYMATIC HYDROLYSIS OF MARINE BROWN ALGAE *ASCOPHYLLUM NODOSUM*
AND *UNDARIA PINNATIFIDA*: CONDITIONS FOR EFFECTIVE
POLYPHENOL EXTRACTION**

*The article considers the process of enzymatic hydrolysis of marine brown algae *Ascophyllum nodosum* and *Undaria pinnatifida* in order to optimize the conditions for effective polyphenol extraction. Marine brown algae are a rich source of bioactive compounds, including polyphenols, which have antioxidant, anti-inflammatory and antimicrobial properties. The study focuses on the complexity of the algae cell wall, which limits the bioavailability of their nutritional components. Enzymatic hydrolysis is considered as the*

preferred method of cell walls destruction, which allows to preserve biomolecules structure and reduce the environmental burden compared to chemical methods. Specific enzymes capable of decomposing protein-polysaccharide complexes into more digestible forms were employed, which increases bioavailability and preserves functional properties of polyphenols. The results of the study showed that the selection of optimal conditions for enzymatic hydrolysis makes it possible to significantly increase the extraction of polyphenols from algae. The obtained data open up new prospects for the use of brown algae fermentolysates in food and other industries, offering an environmentally sustainable approach to the use of marine resources.

Key words: *algae, enzymatic hydrolysis, enzyme, polyphenols, extraction, marine resources.*

Введение

Морские бурые водоросли представляют собой ценный ресурс для пищевой промышленности благодаря содержанию большого разнообразия биоактивных веществ. Пищевые системы, обогащенные биологически активными веществами природного происхождения, становятся популярными у потребителей как средства для поддержания здоровья, а также для лечения и профилактики различных заболеваний, заменяя некоторые традиционные синтетические препараты. Биологически активные соединения природного происхождения проявляют широкий спектр активности: могут оказывать противовоспалительное [1], антимикробное [2], иммуномодулирующее [3], противоопухолевое [4] и антиоксидантное [5] действие.

Антиоксиданты – соединения, способные отдавать электроны, чтобы стабилизировать свободные радикалы, содержащие неспаренные электроны, и нейтрализовать их воздействие на организм [6]. Антиоксиданты могут иметь эндогенное происхождение, т. е. синтезироваться системами организма (глутатионпероксидаза и супероксиддисмутаза), и экзогенное происхождение – поступать в организм из внешних источников [7]. Экзогенные антиоксиданты предотвращают чрезмерную выработку свободных радикалов, тем самым предотвращая повреждение клеток. Если повреждение клетки уже произошло, то экзогенные антиоксиданты способны контролировать уровень свободных радикалов, тем самым предотвращая дальнейшее повреждение и возникновение заболеваний, вызванных окислительным стрессом [8]. Антиоксиданты природного происхождения, такие как полифенолы, содержащиеся в морских водорослях, оказывают эффективное воздействие на свободные радикалы.

Фенольные соединения морских бурых водорослей демонстрируют широкий спектр биологической активности, включая антиоксидантные [9], противомикробные и противовоспалительные свойства [10], что привлекает внимание научного сообщества и производителей пищевой продукции. Однако вопрос усвояемости водорослей имеет первостепенное значение, особенно в отношении сложности клеточной стенки. Прочные структуры клеточных стенок морских водорослей могут препятствовать действию пищеварительных ферментов, затрудняя доступ к внутриклеточным соединениям [11]. Это создает ограничения для биодоступности питательных компонентов водорослей. Для более эффективного извлечения биологически активных веществ были разработаны различные стратегии разрушения клеточной стенки, которые можно разделить на химические, физические и биологические методы. Разрушение клеток предпочтительно проводить в щадящих условиях, чтобы снизить потребление энергии и сохранить структуры биомолекул [12]. Ферментативный гидролиз в пищевой промышленности приобретает все большую популярность благодаря своим многочисленным преимуществам, к которым можно отнести: отсутствие токсичных отходов, селективность и проведение гидролиза в щадящих условиях, что помогает сохранить биологически активные вещества [13]. Этот процесс позволяет извлекать из водорослей ценные компоненты, которые могут быть использованы для создания функциональных продуктов питания, обогащенных биоактивными соединениями. Ферментативный гидролиз водорослей позволяет эффективно использовать морские ресурсы и снижать экологическую нагрузку по сравнению с химическими методами обработки. В процессе ферментативного гидролиза используются специфические ферменты, которые разрушают клеточные стенки водорослей и расщепляют белково-полисахаридные комплексы на более мелкие, легко усваиваемые формы [14]. Это позволяет не только улучшить

усвояемость и биодоступность питательных веществ, но и сохранить их функциональные свойства. Процесс ферментативного гидролиза бурых водорослей хорошо изучен как с точки зрения теоретических основ, так и в аспекте практического применения для отдельных видов водорослей и ферментов. Исследования активно проводятся учеными многих стран, значительный вклад в эту область внесли российские исследователи, такие как Т.Н. Звягинцева, А.А. Хитров, Е.Д. Облущинская, А.В. Подкорытова, И.А. Кадникова, Н.М. Аминина и др. Тем не менее остаются нерешенными задачи, связанные с повышением эффективности выхода целевых компонентов, снижением стоимости ферментов и адаптацией технологий для промышленного применения.

Целью настоящего исследования является получение ферментативных гидролизатов из морских бурых водорослей и определение содержания полифенолов в полученных ферментолизатах. Это позволит оценить потенциал использования ферментолизатов, полученных из бурых водорослей, в пищевой и других областях промышленности.

Материалы и методы

Для изучения содержания полифенолов в ферментолизатах бурых водорослей использовался метод ферментативного гидролиза с варьированием ключевых параметров процесса.

В качестве объектов исследования были выбраны два вида морских бурых водорослей: *Ascophyllum nodosum* и *Undaria pinnatifida*.

Ascophyllum nodosum представляет собой крупную бурую водоросль в виде ветвящегося куста с длинными талломами, которые могут достигать 1–1,5 м в длину [15]. Водоросль растет на каменистом и песчаном грунте в защищенных от прибоя местах, часто образует плотные заросли, предоставляющие среду обитания для морских организмов. Сушеный резаный *Ascophyllum nodosum* приобретен в интернет-магазине «Архангельский водорослевый комбинат» [16].

Undaria pinnatifida – вид бурых водорослей темно-зеленого или оливкового цвета, слоевище состоит из пластины длиной 40–80 см, стволика длиной 8–12 см и ризоидов. Растет на скалистом и каменистом грунтах на глубине 0,5–6,0 м [17]. Сушеные водоросли *Undaria pinnatifida* торговой марки EAT VEGAN приобретены в интернет-магазине [18].

Сухие водоросли предварительно измельчали до порошкообразного состояния на электрическом измельчителе и заливали водой в разном соотношении (порошок водорослей: вода): 1 : 3 (*A. nodosum*) и 1 : 4 (*U. pinnatifida*) для набухания водорослевого порошка. Соотношение водорослевого порошка и воды выбрано исходя из рекомендаций производителей. Каждый подготовленный образец морских водорослей (5,0 г) взвешивали на электронных весах марки Vibra (Shinko Denshi), вносили в термостойкую колбу. Ферментные препараты класса гидролаз (бета-глюканаза и целлюлаза, производитель ООО «Торговый дом “Биопрепарат”») предварительно развели водой, получив растворы с активностью 1000 ед/мл, измерили pH полученного раствора, который составил 4,50 для бета-глюканазы и 4,00 для целлюлазы. Характеристики ферментных препаратов представлены в таблице 1 [19].

Таблица 1

Характеристики ферментных препаратов

Фермент	Активность, ед/мл	Оптимальные условия		Рабочий диапазон	
		pH	°C	pH	°C
Бета-глюканаза (<i>Beta-glucanase</i>)	10 000	4,0–5,0	65–70	3,5–7,5	40–80
Целлюлаза (<i>Cellulase</i>)	4 000	3,5–4,5	50–65	2,0–6,5	30–75

Растворы ферментных препаратов добавляли в термостойкие колбы в разном соотношении (порошок бурой водоросли: раствор ферментного препарата) 1 : 5, 1 : 7, 1 : 10. Колбы закрывали притертыми крышками и ставили в термостат Binder на 12, 18, 24, 36 и 48 ч при температуре 65 °С. Затем помещали колбы в водяную баню ULAB UT-4300 на 30 мин при

температуре 84 ± 1 °С для инактивации ферментов. Колбы охлаждали до комнатной температуры и фильтровали через обеззоленный фильтр. Полученный фильтрат использовали для дальнейших исследований.

Схема получения ферментативных гидролизатов из морских бурых водорослей представлена на рисунке 1.

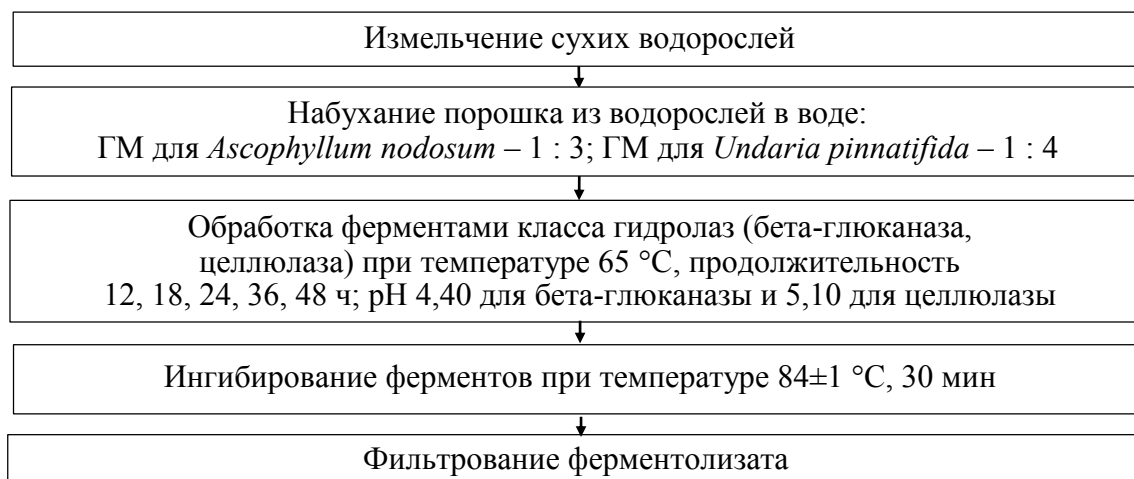


Рисунок 1 – Схема получения ферментативных гидролизатов из морских бурых водорослей

Влияние режимов ферментативного гидролиза на выход полифенолов определяли по общему содержанию полифенолов в гидролизате. Общее содержание полифенолов определяли с помощью реакции с реактивом Folin-Ciocalteu по методу, описанному в работе [20], с небольшими изменениями, используя галловую кислоту в качестве стандарта. Полученные образцы ферментализатов бурых водорослей разводили в 100 раз. Аликвоту разбавленного образца 1 мл смешивали с 5 мл 10%-ного раствора реактива Folin-Ciocalteu. Приливали 4 мл 7,5%-ного раствора Na_2CO_3 и оставляли в темноте на 60 мин при комнатной температуре. После этого измеряли оптическую плотность с помощью спектрофотометра UNICO 2800 при длине волны 765 нм. Общее содержание полифенолов рассчитывали, используя стандартную калибровочную кривую, измерения проводили трижды. Количество полифенолов исследуемых бурых водорослей, перешедших в гидролизат, выражали их массовой долей в анализируемой пробе X , % на сухое вещество, которую рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{c \cdot 100 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 100}{m \cdot \omega_{\text{св}}}, \quad (1)$$

где c – массовая концентрация полифенолов в разбавленном гидролизате, $\text{мг}/\text{см}^3$; 100 – кратность разведения исходного гидролизата бурых водорослей; 1 – общий объем исходного гидролизата бурых водорослей, см^3 ; m – масса пробы, мг ; $\omega_{\text{св}}$ – массовая доля сухого вещества в пробе, %.

Массовую долю воды в пробе W , %, определяли стандартным методом [21]. Вычисления проводили по формуле:

$$W = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1 - m} \cdot 100, \quad (2)$$

где m_1 – масса стаканчика с навеской до высушивания с учетом стеклянной палочки, г; m_2 – масса стаканчика с навеской после высушивания с учетом стеклянной палочки, г; m – масса стаканчика с учетом стеклянной палочки, г; 100 – коэффициент пересчета в проценты.

Массовую долю сухого вещества в пробе $\omega_{св}$, % определяли по формуле:

$$\omega_{св} = 100 - W, \quad (3)$$

где W – массовая доля воды в пробе, %.

Исследования проведены на базе ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет».

Результаты и их обсуждение

Для расчета общего количества полифенолов, перешедших в гидролизат, необходимо было определить массовую долю сухого вещества в пробе. Данные о содержании сухого вещества в полученных ферментолизатах из водоросли *Undaria pinnatifida* и *Ascophyllum nodosum* при разных условиях ферментативного гидролиза представлены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание сухого вещества в полученных ферментолизатах из водоросли *Undaria pinnatifida* и *Ascophyllum nodosum* при разных условиях ферментативного гидролиза, %

Соотношение порошок водоросли (<i>U. pinnatifida</i>) : ферментный препарат	Концентрация активного вещества в растворе, %	Продолжительность гидролиза, ч				
		12	18	24	36	48
Бета-глюканаза (<i>Beta-glucanase</i>)						
1 : 5	11,08	88,6±0,7	88,8±0,7	89,1±0,7	88,9±0,7	88,5±0,7
1 : 7	11,61	88,8±0,7	88,9±0,7	89,4±0,7	89,0±0,7	88,6±0,7
1 : 10	12,05	89,0±0,7	89,3±0,7	89,7±0,7	89,3±0,7	88,8±0,7
Целлюлаза (<i>Cellulase</i>)						
1 : 5	24,00	89,0±0,7	89,7±0,7	89,4±0,7	89,5±0,7	89,1±0,7
1 : 7	25,15	89,1±0,7	89,9±0,7	89,7±0,7	89,5±0,7	89,5±0,7
1 : 10	26,09	89,0±0,7	90,0±0,7	89,8±0,7	89,9±0,7	89,5±0,7
Соотношение порошок водоросли (<i>A. nodosum</i>) : ферментный препарат	Концентрация активного вещества в растворе, %	Продолжительность гидролиза, ч				
		12	18	24	36	48
Бета-глюканаза (<i>Beta-glucanase</i>)						
1 : 5	11,08	88,1±0,7	88,4±0,7	88,6±0,7	88,5±0,7	88,3±0,7
1 : 7	11,61	88,4±0,7	88,4±0,7	88,8±0,7	88,8±0,7	88,4±0,7
1 : 10	12,05	89,0±0,7	89,1±0,7	89,5±0,7	89,2±0,7	88,8±0,7
Целлюлаза (<i>Cellulase</i>)						
1 : 5	24,00	88,3±0,7	88,6±0,7	88,9±0,7	88,4±0,7	88,1±0,7
1 : 7	25,15	88,4±0,7	88,9±0,7	88,8±0,7	88,4±0,7	88,3±0,7
1 : 10	26,09	89,1±0,7	89,3±0,7	89,0±0,7	88,6±0,7	88,4±0,7

По мере продолжения процесса концентрация сухого вещества может стабилизироваться или даже уменьшаться из-за растворения продуктов гидролиза в воде или их дальнейшего превращения.

В ходе исследования было изучено содержание общего количества полифенолов в ферментолизатах, полученных из бурых водорослей при различных условиях ферментативного гидролиза. Полученные данные позволили оценить влияние условий гидролиза на выход це-

левых биологически активных соединений. Данные о содержании общего количества полифенолов в полученных ферментолизатах с помощью ферментного препарата «бета-глюканаза» (*Beta-glucanase*) из водоросли *Undaria pinnatifida* при разных условиях ферментативного гидролиза представлены на рисунке 2. Для каждой концентрации активного вещества представлены данные для пяти временных точек: 12, 18, 36, 24 и 48 ч.

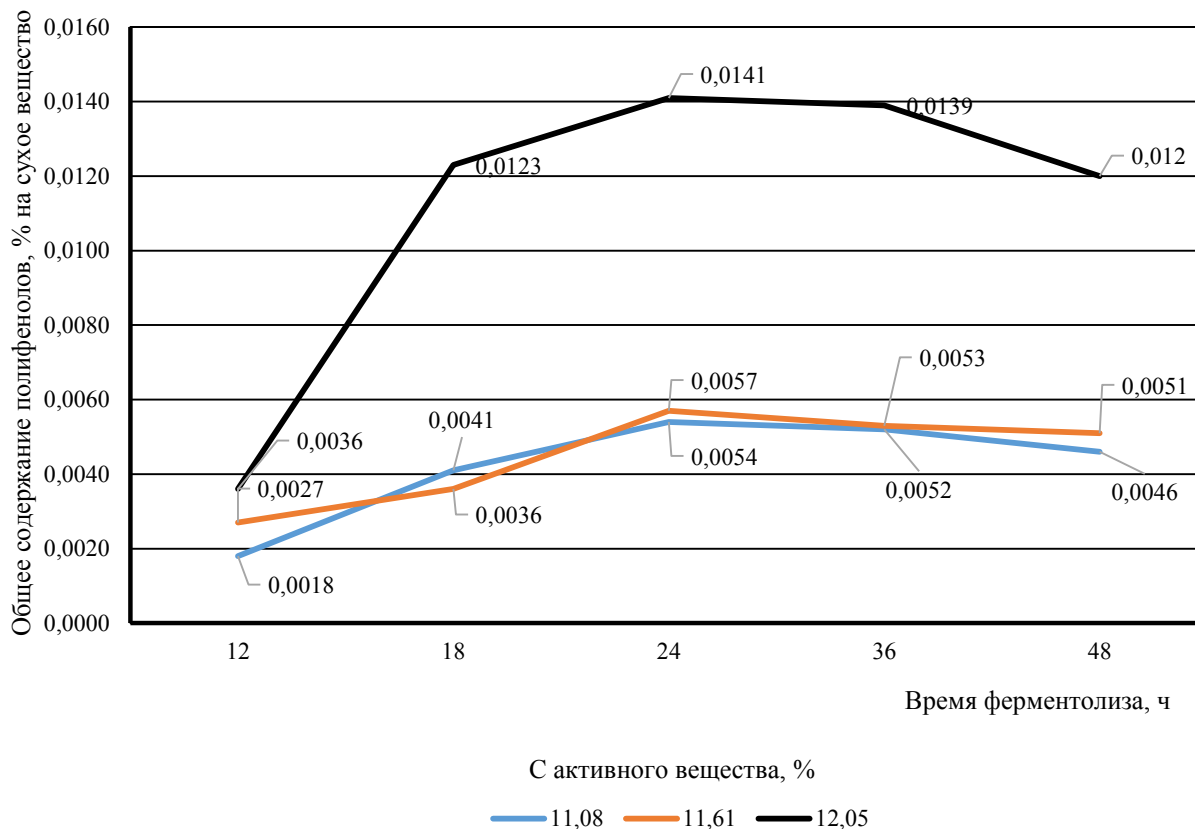


Рисунок 2 – Содержание общего количества полифенолов в полученных ферментолизатах с помощью ферментного препарата «бета-глюканаза» из водоросли *Undaria pinnatifida* при разных условиях ферментативного гидролиза

Данные, представленные на рисунке 2, показывают, что в ферментолизатах, полученных из морской бурой водоросли *Undaria pinnatifida* с использованием ферментного препарата «бета-глюканаза», содержание полифенолов увеличивалось при переходе от 12 до 24 ч, затем постепенно снижалось с увеличением времени гидролиза. Наибольшее содержание полифенолов (0,0141 %) достигалось при соотношении 1 : 10 (концентрация активного вещества в растворе 12,05 %) и времени гидролиза 24 ч. После достижения определенного времени гидролиза (24 ч) дальнейшее увеличение времени не приводило к увеличению содержания полифенолов для всех соотношений.

Данные о содержании общего количества полифенолов в полученных ферментолизатах с помощью ферментного препарата «целлюлаза» (*Cellulase*) из водоросли *Undaria pinnatifida* при разных условиях ферментативного гидролиза представлены на рисунке 3.

В ферментолизатах, полученных с использованием ферментного препарата «целлюлаза», содержание полифенолов при соотношении 1:5 (концентрация активного вещества в растворе равна 24,00 %) и 1 : 7 (концентрация активного вещества в растворе равна 25,15 %) увеличивалось от 12 до 24 ч и затем незначительно снижалось. При соотношении 1 : 10 (концентрация активного вещества в растворе равна 26,09 %) наблюдалось снижение содержания

полифенолов от 12 до 48 ч гидролиза. Увеличение соотношения фермента к порошку водоросли не всегда приводило к увеличению содержания полифенолов. Наибольшее содержание полифенолов (0,0172 %) достигалось при соотношении 1 : 5 и времени гидролиза 24 ч.

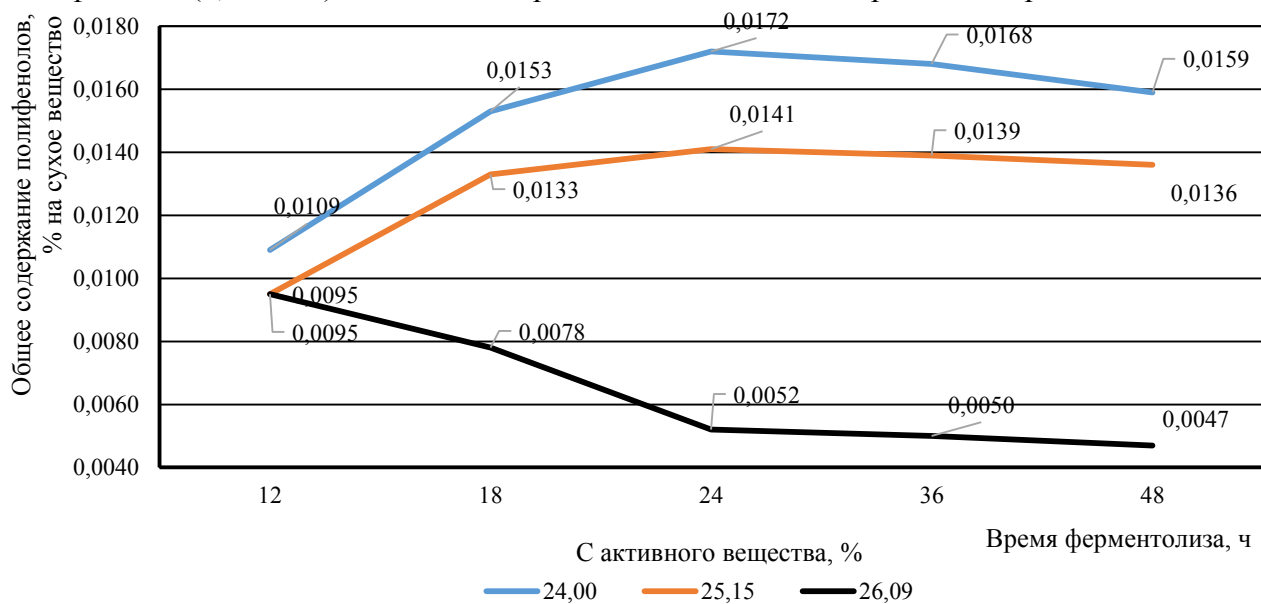


Рисунок 3 – Содержание общего количества полифенолов в полученных ферментолізатах с помощью ферментного препарата «целлюлаза» из водоросли *Undaria pinnatifida* при разных условиях ферментативного гидролиза

При соотношении 1 : 10 наблюдалось снижение содержания полифенолов после 12 ч гидролиза, что может указывать на деградацию полифенолов или другие химические процессы.

Данные о содержании общего количества полифенолов в полученных ферментолізатах с помощью ферментного препарата «бета-глюканаза» (*Beta-glucanase*) из водоросли *Ascophyllum nodosum* при разных условиях ферментативного гидролиза представлены на рисунке 4.

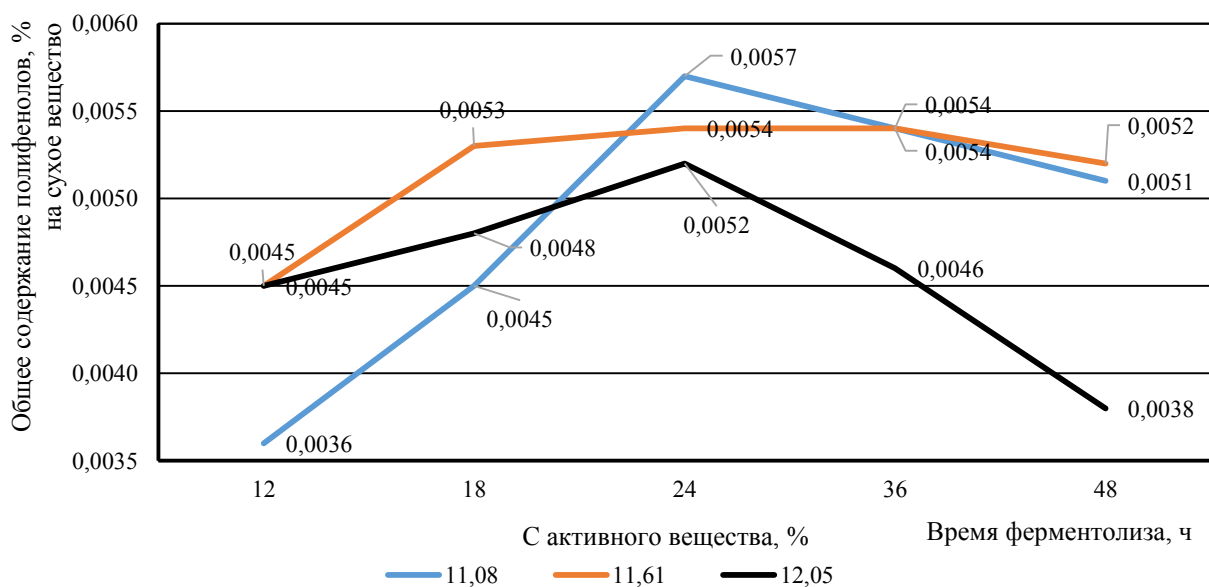


Рисунок 4 – Содержание общего количества полифенолов в полученных ферментолізатах с помощью ферментного препарата «бета-глюканаза» из водоросли *Ascophyllum nodosum* при разных условиях ферментативного гидролиза

Анализ данных, представленных на рисунке 4, показывает, как использование различных ферментных препаратов и условий влияло на содержание полифенолов в ферментолизатах из морской бурой водоросли *Ascophyllum nodosum*. В ферментолизатах, полученных из морской бурой водоросли *Ascophyllum nodosum* с использованием ферментного препарата бета-глюканаза при соотношении 1 : 5 (концентрация активного вещества в растворе 11,08 %), концентрация полифенолов повышалась с увеличением времени гидролиза (0,0036 % после 12 ч до 0,0052 % после 24 ч), но затем уменьшалась. При соотношении 1 : 10 (концентрация активного вещества в растворе 12,05 %) наблюдалась аналогичная тенденция. Это указывает на то, что оптимальное время для гидролиза в данном эксперименте составляет около 24 ч, так как дальнейшее увеличение времени не приводило к значительному увеличению концентрации полифенолов.

Данные о содержании общего количества полифенолов в полученных ферментолизатах с помощью ферментного препарата «целлюлаза» (*Cellulase*) из водоросли *Ascophyllum nodosum* при разных условиях ферментативного гидролиза представлены на рисунке 5.

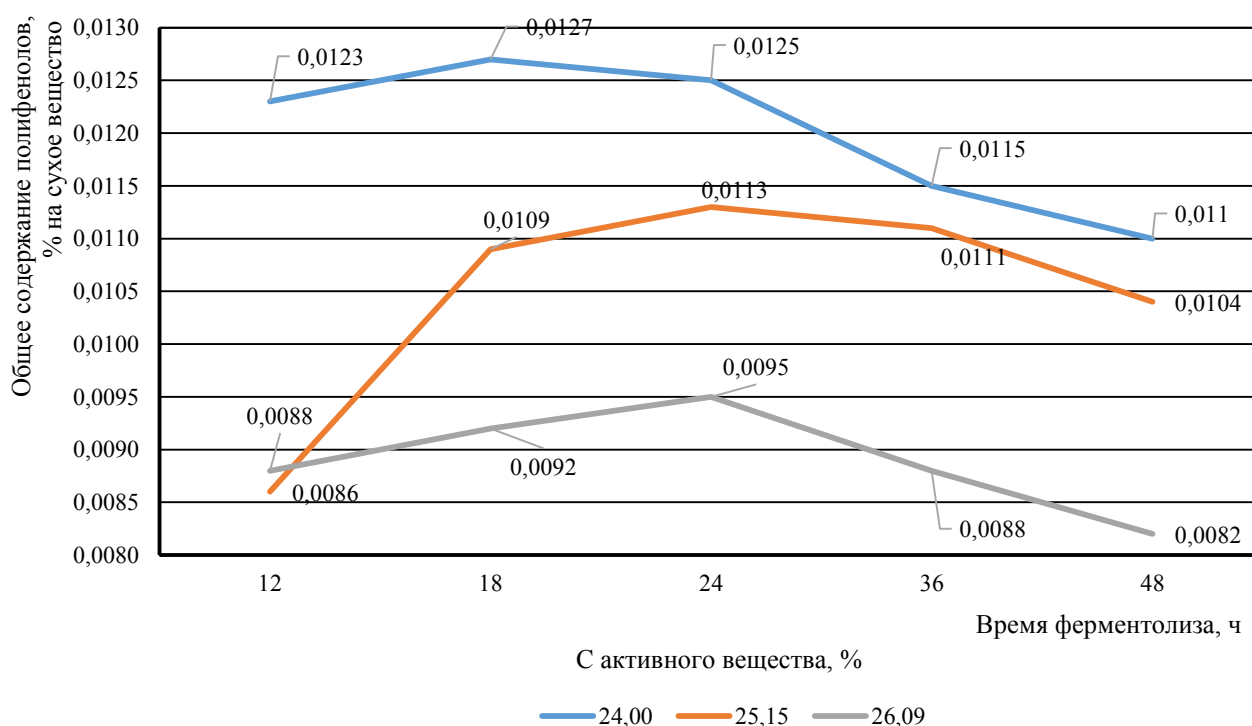


Рисунок 5 – Содержание общего количества полифенолов в полученных ферментолизатах с помощью ферментного препарата «целлюлаза» из водоросли *Ascophyllum nodosum* при разных условиях ферментативного гидролиза

В ферментолизатах, полученных с использованием ферментного препарата целлюлаза, при соотношении 1 : 5 (концентрация активного вещества в растворе 24,00 %), содержание полифенолов составляло 0,0127 % после 12 ч ферментации, затем наблюдалось уменьшение содержания полифенолов с увеличением продолжительности ферментации. Для соотношения 1 : 7 (концентрация активного вещества в растворе 25,15 %) наблюдалось увеличение содержания полифенолов после 24 ч, с последующим уменьшением. При соотношении 1 : 10 (концентрация активного вещества в растворе 26,09 %) содержание полифенолов увеличивалось с 0,0088 % после 12 ч до 0,0095 % после 24, затем снижалось. В данном случае соотношение 1 : 5 при гидролизе в течение 18 ч может быть наиболее эффективным для извлечения полифенолов.

Также была проведена статистическая обработка результатов получением уравнений регрессии, описывающих изменение общего количества полифенолов в ферментолизатах, полученных из бурых водорослей, при разных условиях проведения ферментолиза. Полученные данные представлены в таблице 3. Коэффициенты аппроксимации для уравнений регрессии, представленных в таблице 3, являются высокими и составляют не менее 0,8944.

Таблица 3

Уравнения регрессии, описывающие динамику изменения общего количества полифенолов в ферментолизатах из бурых водорослей при разных условиях проведения ферментолиза от длительности процесса

Концентрация активного вещества (для <i>Cellulase</i>)	Общее количество полифенолов			
	<i>Undaria pinnatifida</i>		<i>Ascophyllum nodosum</i>	
	уравнение регрессии	коэффициент аппроксимации	уравнение регрессии	коэффициент аппроксимации
24,00 %	$y = -0,0009x^2 + 0,0067x + 0,0053$	$R^2 = 0,9829$	$y = -0,0002x^2 + 0,0007x + 0,0118$	$R^2 = 0,9264$
25,15 %	$y = -0,0007x^2 + 0,0048x + 0,0056$	$R^2 = 0,9414$	$y = -0,0005x^2 + 0,0032x + 0,006$	$R^2 = 0,9546$
26,09 %	$y = 0,0004x^2 - 0,0035x + 0,0128$	$R^2 = 0,9695$	$y = -0,0002x^2 + 0,0011x + 0,0079$	$R^2 = 0,9363$
11,08 %	$y = -0,0005x^2 + 0,0038x - 0,0014$	$R^2 = 0,9913$	$y = -0,0003x^2 + 0,0021x + 0,0017$	$R^2 = 0,9406$
11,61 %	$y = -0,0003x^2 + 0,0027x + 0,0002$	$R^2 = 0,8944$	$y = -0,0002x^2 + 0,0011x + 0,0037$	$R^2 = 0,9441$
12,05 %	$y = -0,0017x^2 + 0,0118x - 0,0059$	$R^2 = 0,9601$	$y = -0,0002x^2 + 0,0012x + 0,0035$	$R^2 = 0,9422$

Примечание. y (% на сухое вещество) – общее содержание полифенолов; x (ч) – время ферментолиза.

Полученные результаты открывают новые перспективы для разработки более эффективных методов извлечения полифенолов из водорослей, что может иметь большое значение для пищевой и других видов промышленности. Эти данные подчеркивают важность учета специфики ферментных препаратов и их взаимодействия с различными видами водорослей для достижения максимальной эффективности процесса.

Заключение

В результате проведенного исследования были выявлены оптимальные условия для извлечения полифенолов из морских бурых водорослей *Undaria pinnatifida* и *Ascophyllum nodosum* с использованием ферментолиза. Для ферментных препаратов («бета-глюканаза» и «целлюлаза») содержание полифенолов в ферментолизатах морских бурых водорослей достигает максимума примерно через 24 ч гидролиза. Дальнейшее увеличение времени гидролиза приводит к снижению содержания полифенолов, что может быть связано с их деградацией или другими химическими процессами.

Оптимальными условиями для проведения ферментолиза с использованием ферментного препарата «бета-глюканаза» являются: для водоросли *Undaria pinnatifida* наибольшее содержание полифенолов (0,0141 %) достигается при соотношении фермента к порошку 1 : 10 и времени гидролиза 24 ч. Для водоросли *Ascophyllum nodosum* максимальное содержание полифенолов (0,0052 %) также наблюдается через 24 ч гидролиза при соотношении 1 : 5.

Оптимальными условиями для проведения ферментолиза с использованием ферментного препарата «целлюлаза» являются: для *Undaria pinnatifida* наибольшее содержание поли-

фенолов (0,0172 %) достигается при соотношении фермента к порошку 1 : 5 и времени гидролиза 24 ч. Для *Ascophyllum nodosum* оптимальным является соотношение 1 : 5 и время гидролиза около 18 ч, так как при увеличении продолжительности ферментализации содержание полифенолов уменьшается.

Оптимальные условия зависят от типа ферментного препарата и вида водоросли. Однако в большинстве случаев время гидролиза около 24 ч является наиболее эффективным для извлечения полифенолов. Увеличение соотношения фермента к порошку не всегда приводит к повышению содержания полифенолов. Например, при соотношении 1 : 10 наблюдается снижение содержания полифенолов после определенного времени гидролиза, что может быть связано с деградацией полифенолов. Различные ферментные препараты демонстрируют разные динамики высвобождения полифенолов, что необходимо учитывать при выборе условий для ферментативного гидролиза. Важно отметить, что увеличение количества фермента не всегда приводит к увеличению содержания полифенолов, что подчеркивает значимость точного подбора условий для каждого конкретного случая.

Благодарности: выражаем благодарность за содействие ЦКП «Приморский океанариум», ННЦМБ ДВО РАН (Владивосток).

Библиография

1. Gonfa Y.H., Tessema F.B., Bachheti A. et al. Anti-inflammatory activity of phytochemicals from medicinal plants and their nanoparticles: A review // *Current Research in Biotechnology*. – 2023. – Vol. 6.
2. Годовалов А.П., Быкова Л.П. Антимикробная активность производных некоторых растений // *Современные научные исследования и разработки*. – 2017. – Т. 2, № 1 (9). – С. 58–61.
3. Шепелева О.А., Дегтева Г.Н., Новикова И.И. и др. Морские водоросли как важный функциональный ингредиент и продовольственное сырье для обогащения рационов питания населения Арктической зоны Российской Федерации (обзор) // *Журнал медико-биологических исследований*. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 99–113.
4. Вихарева В.В., Леонтьева Е.А., Бегун М.А. и др. Противоопухолевая активность сульфатированных полисахаридов водоросли *Chondrus armatus* Японского моря // *Сибирское медицинское обозрение*. – 2020. – № 3 (123). – С. 10.
5. Половов С.Ф., Иванушко Л.А., Смолина Т.П. Морские гидробионты – перспективный источник средств профилактики радиационно-индуцированных нарушений // *Морская медицина*. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 18–31.
6. O'Connor J., Garcia-Vaquero M., Meaney S. et al. Bioactive Peptides from Algae: Traditional and Novel Generation Strategies, Structure-Function Relationships, and Bioinformatics as Predictive Tools for Bioactivity // *Mar. Drugs*. – 2022. – Vol. 20. – P. 317.
7. Soledad-Bustos P. Efecto de Flavonoides Frente al Estrés Oxidativo Inducido por Antibióticos: Ph.D. Thesis, Departamento de Farmacia-Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2017.
8. López-García G., Dublan-García O., Arizmendi-Cotero D. et al. Antioxidant and Antimicrobial Peptides Derived from Food Proteins // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27. – P. 1343.
9. Zhao X. [et al.]. The role of seaweed polyphenols in human health: A review // *Nutrients*. – 2021. – Vol. 13. – P. 2.
10. Kim S.K., Lee H.G. Bioactive compounds from seaweeds and their therapeutic potential in human health // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25. – P. 19.
11. Mariana D., Jaqueline Oliveira de Moraes, Ângelo P.M. et al. Digestibility, bioaccessibility and bioactivity of compounds from algae // *Trends in Food Science Technology*. – 2022. – Vol. 121. – P. 114–128.
12. Yingdong Z., Li L., Mingyu Li et al. Algal biomass valorisation to high-value chemicals and bioproducts: Recent advances, opportunities and challenges // *Bioresource Technology*. – 2022. – Vol. 344, Part B.
13. Жамсаранова С.Д., Лебедева С.Н., Болхонов Б.А. и др. Ферментативная конверсия пищевого белка и оценка антиоксидантной активности пептидов // *Вестник ВСГУТУ*. – 2021. – № 4 (83). – С. 5–14.

14. Кадникова И.А., Аминина Н.М. Использование ферментированных смесей макрофитов в технологии комбикормов для индустриального выращивания молоди трепанга *Apostichopus japonicus* // Известия ТИНРО. – 2023. – Т. 203, № 3. – С. 676–685.
15. Табакаева О.В., Табакаев А.В., Силантьев В.Е. и др. Антиоксидантные свойства сверхкритических экстрактов бурых водорослей // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2024. – Т. 14, № 2 (49). – С. 253–264.
16. Архангельские водоросли [Электронный ресурс]. – URL: <https://snowsea.ru> (дата обращения: 03.10.2024).
17. Кулепанов В.Н. Рост и развитие *Undaria pinnatifida* (*Laminariaceae*) в заливе Петра Великого (Японское море) // Растительные ресурсы. – 2005. – Т. 41, № 3. – С. 32–39.
18. Правильный чай и продукты [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ozon.ru/seller/pravilnyu-chay-i-produkty-100632/produkty-pitaniya_9200/?miniapp=seller_100632 (дата обращения: 08.10.2024).
19. Торговый дом Биопрепарат. Ферменты [Электронный ресурс]. – URL: <https://tdbio-preparat.ru/fermenty.html> (дата обращения: 25.10.2024).
20. Патент RU 2519767 С1 МПК G01N 33/02. Способ определения полифенолов чая / Щеголева И.Д., Лисюкова С.В., Лагутин И.А. – Заявка № 2013123427/15, заявл. 22.05.2013, опубл. 20.06.2014.
21. ГОСТ 33331-2015 Водоросли, травы морские и продукция из них. Методы определения массовой доли воды, золы и посторонних примесей. – Введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 8 с.

Bibliography

1. Gonfa Y.H., Tessema F.B., Bachheti A. et al. Anti-inflammatory activity of phytochemicals from medicinal plants and their nanoparticles: A review // Current Research in Biotechnology. – 2023. – Vol. 6.
2. Godovalov A.P., Bykova L.P. Antimicrobial activity of derivatives of some plants // Modern scientific research and development. – 2017. – Vol. 2, N 1 (9). – P. 58–61.
3. Shepeleva O.A., Degtyareva G.N., Novikova I.I. et al. Seaweeds as an important functional ingredient and food raw material for enriching the diets of the population of the Arctic zone of the Russian Federation (review) // Journal of Medical and Biological Research. – 2024. – Vol. 12, N 1. – P. 99–113.
4. Vikhareva V.V., Leontyeva E.A., Begun M.A. et al. Antitumor activity of sulfated polysaccharides of *Chondrus armatus* algae of the Sea of Japan // Siberian Medical Review. – 2020. – N 3 (123). – P. 10.
5. Polovov S.F., Ivanushko L.A., Smolina T.P. Marine hydrobionts – a promising source of means for the prevention of radiation-induced disorders // Marine Medicine. – 2023. – Vol. 9, N 2. – P. 18–31.
6. O'Connor J., Garcia-Vaquero M., Meaney S. et al. Bioactive peptides from algae: traditional and novel generation strategies, structure-function relationships, and bioinformatics as predictive tools for bioactivity // Marine Drugs. – 2022. – Vol. 20. – P. 317.
7. Soledad-Bustos P. Effect of frente al estrés oxidativo inducido por antibióticos: ph.d. thesis, departamento de farmacia-facultad de ciencias químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2017.
8. López-García G., Dublan-García O., Arizmendi-Cotero D. et al. Antioxidant and antimicrobial peptides derived from food proteins // Molecules. – 2022. – Vol. 27. – P. 1343.
9. Zhao X. [et al.]. The role of seaweed polyphenols in human health: A review // Nutrients. – 2021. – Vol. 13. – P. 2.
10. Kim S.K., Lee H.G. Bioactive compounds from seaweeds and their therapeutic potential in human health // Molecules. – 2020. – Vol. 25. – P. 19.
11. Mariana D., Jaqueline Oliveira de Moraes, Ângelo P.M. et al. Digestibility, bioaccessibility and bioactivity of compounds from algae // Trends in Food Science Technology. – 2022. – Vol. 121. – P. 114–128.
12. Yingdong Z., Li L., Mingyu Li, Changwei Hu. Algal biomass valorization to high-value chemicals and bioproducts: Recent advances, opportunities and challenges // Bioresource Technology, 2022. – Vol. 344, Part B.
13. Zhamsaranova S.D., Lebedeva S.N., Bolkhonov B.A. et al. Enzymatic food protein conversion and assessment of antioxidant activity of peptides // ESSUTM Bulletin. – 2021. – N 4 (83). – P. 5–14.
14. Kadnikova I.A., Aminina N.M. Use of fermented macrophyte mixtures in compound feed technology for industrial cultivation of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* // Izvestia TINRO. – 2023. – Vol. 203, N 3. – P. 676–685.

15. *Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V., Silantyev V.E. et al.* Antioxidant properties of supercritical extracts of brown algae // Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. – 2024. – Vol. 14, N 2 (49). – P. 253–264.
16. Arkhangelsk algae [Electronic resource]. – URL: <https://snowsea.ru/> (access date: 03.10.2024).
17. *Kulepanov V.N.* Growth and development of *Undaria pinnatifida* (*Laminariaceae*) in Peter the Great Bay (the Sea of Japan) // Plant Resources. – 2005. – Vol. 41, N 3. – P. 32–39.
18. The Right Tea and Products [Electronic resource]. – URL: https://www.ozon.ru/seller/pravilnyy-chay-i-produkty-100632/produkty-pitaniya-9200/?miniapp=seller_100632 (access date: 08.10.2024).
19. Trading House Biopreparat. Enzymes [Electronic resource]. – URL: <https://tdbiopreparat.ru/fermenty.html> (access date: 25.10.2024).
20. Patent RU 2519767 C1 IPC G01N 33/02. Method for determining tea polyphenols / Shchegoleva I. D., Lisyukova S. V., Lagutin I. A. – Application No. 2013123427/15, appl. 22.05.2013, publ. 20.06.2014.
21. GOST 33331-2015 Algae, sea grasses and products made from them. Methods for determining mass fraction of water, ash and foreign impurities. – Introduced 01.01.2017. – M.: Standartinform Publishing House, 2016. – 8 p.

DOI 10.53980/24131997_2025_1_55

Е.С. Разумовская¹, канд. вет. наук, e-mail: elenabar83@inbox.ru

И.С. Милентьева², д-р техн. наук, e-mail: irazumnikova@mail.ru

¹ КГБУ «Управление ветеринарии Алтайского края по г. Барнаулу», г. Барнаул

² ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово

УДК 543.645.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛИЗА ЖИВОТНОГО БЕЛКА ЭНДОПРОТЕАЗАМИ *IN SILICO*

В последнее время повышенным спросом пользуются продукты питания с функциональной направленностью, способствующие укреплению здоровья. Перспективным сырьем для такой продукции могут быть субпродукты мясные, например свиные желудки, богатые источником биологически доступного белка. Целью данного исследования была оценка потенциальной биологической активности различных изолятов белка животного происхождения. В качестве объекта исследования был использован белок, идентифицированный в базе UniProt, как VIP_PIG (P01284) или глюкагоноподобный белок. С помощью компьютерного моделирования был проведен анализ прогнозирования вероятности появления биоактивных пептидов после гидролиза белка с помощью протеиназы К, термолитина и пепсина (pH>2). Установлено, что данные протеазы продемонстрировали высокий потенциал в расщеплении белка на фрагменты. Пепсин (pH>2) способствовал образованию большего количества пептидов в гидролизате. Наиболее длинный пептид FTSDFSR был обнаружен в образцах, подвергшихся обработке термолитином, в то же время данный пептид обладал самой высокой молекулярной массой (859,3944 кДа). Пептид VKKY был признан наиболее часто встречающимся в образцах, обработанных всеми тремя ферментами, и был первым по массе (537,3395) при обработке пепсином (pH>2). Впоследствии были синтезированы шесть биоактивных пептидов, имеющих баллы пептидного ранкера выше 0,5. Дальнейшая работа исследования будет направлена на определение токсичности, аллергенности, а также наличия терапевтического эффекта in silico и in vivo.

Ключевые слова: белок, пептиды, протеазы, метод *in silico*, молекулярная масса, пептидная последовательность, пептидный ранкер.

E.S. Razumovskaya¹, Cand. Sc. Veterinary

I.S. Milentyeva², Dr. Sc. Engineering

¹ Veterinary Department of the Altai Region in the city of Barnaul, Barnaul

² Kemerovo State University, Kemerovo

MODELING OF ANIMAL PROTEIN HYDROLYSIS BY ENDOPROTEASES *IN SILICO*

Recently, there has been an increased demand for functional foods that promote health. Meat offal can serve as promising raw material for such kind of foods, for example, pork stomachs, rich in bioavailable protein. The purpose of this study was to evaluate the potential biological activity of various protein isolates of animal origin. The object of the study was protein identified in the UniProt database as VIP_PIG (P01284) or glucagon-like protein. Computer modeling was used to analyze the probability of bioactive peptides after protein hydrolysis using proteinase K, thermolysin and pepsin (pH>2). It was found that these proteases demonstrated a high potential in splitting protein into fragments. Pepsin (pH>2) promoted the formation of more peptides in hydrolysate. The longest peptide «FTSDFSR» was found in samples affected with thermolysin, at the same time, this peptide has the highest molecular weight (859.3944 kDa). The VKKY peptide was recognized as the most common in samples with all three enzymes, and was the first by weight (537.3395) when affected with pepsin (pH > 2). Subsequently, 6 bioactive peptides with peptide ranker scores above 0.5 were synthesized. Further work of the study will be aimed at determining toxicity, allergenicity, as well as the presence of therapeutic effect in silico and in vivo.

Key words: *protein, peptides, proteases, in silico method, molecular weight, peptide sequence, peptide ranker.*

Введение

Ежегодно в процессе промышленной переработки сельскохозяйственной продукции производится большое количество пищевых побочных продуктов животного происхождения, которые обычно используются в качестве корма для непродуктивных животных [1, 2].

Мясные субпродукты являются хорошим источником биоактивных пептидов, полученных из белковых гидролизатов при воздействии коммерческих протеаз [3].

В настоящее время существует большой интерес к использованию биоактивных пептидов в функциональных продуктах питания, способствующих укреплению здоровья [4]. Авторами классифицированы биологически активные пептиды, получаемые из продуктов питания, такие как противораковые, противодиабетические, антигипертензивные, противомикробные, снижающие уровень холестерина и другие [5–7].

Кроме того, следуя аналогичной тенденции, используемой при исследовании других гидролизатов, таких как гидролизаты молочного, растительного белка, содержащие производные биоактивных пептидов с широким спектром биологических свойств, разработка гидролизатов животного происхождения представляет собой актуальную задачу для ученых, пытающихся определить связь между химической структурой пептидов и их биологической активностью [8].

В пищевой промышленности ферментативный гидролиз является наиболее распространенным методом, используемым для высвобождения пептидов из белков, в котором обычная тепловая обработка используется в качестве предварительной для усиления гидролитического действия [9].

Гидролиз *in silico* работает в соответствии с предположением, что все расщепляемые пептидные связи в определенном белке будут доступны для фермента и будут легко гидролизованы [10–12].

Преимуществом исследований *in silico* является экономия времени и реагентов, а также возможность выявления того, какие пептиды имеют биологический потенциал. Для оценки прогнозирования биологической активности пептидов используются соответствующие базы данных, позволяющие искать точное соответствие интересующей аминокислотной последовательности [13–14].

В связи с вышеизложенным **целью работы** было использование методов *in silico* при расщеплении животного белка протеазами и прогнозирование биологической активности образованных пептидов для их дальнейшего изучения.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта был использован белок, выделенный методом ВЖЭХ (высокоэффективная жидкостная хроматография) из свиных желудков, который был исследован в ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» в Лаборатории биотестирования природных нутрицевтиков НИУ Центра коллективного пользования «Инструментальные методы анализа в области прикладной биотехнологии», г. Кемерово, идентифицированный в базе UniProt как VIP_PIG (P01284) или глюкагоноподобный белок, вызывающий расширение сосудов, тем самым снижая артериальное давление.

С помощью программного обеспечения PeptideCutter были предсказаны вероятные места расщепления белка выбранными ферментами в наиболее специфичных последовательностях. Инструмент PeptideMass использовали для вычисления массы полученных пептидов. Для прогнозирования потенциальной биологической активности пептидов применяли программный ресурс с открытым исходным кодом Peptide Ranker.

Результаты исследований и их обсуждение

Данная статья является продолжением исследований, направленных на изучение процесса ферментации животного белка методом *in silico*. Ранее авторами было изложено обоснование необходимости проведения вышеуказанных исследований и представлены экспериментальные данные по поиску и идентификации белка VIP_PIG (P01284) [15].

Для определения характеристик пептидов белка VIP_PIG (P01284) выбрали программное обеспечение PeptideCutter, прогнозирующее потенциальные места расщепления заданными протеазами или химическими веществами.

Из доступных ферментов и химических веществ выбрали все ферменты, предложенные программным обеспечением: протеиназа Arg-C, эндопептидаза Asp-N, Asp-N-эндопептидаза + N-концевой Glu, BNPS-скатоле, каспаза1-каспаза10, высокая специфичность химотрипсина (С-термин для [FYW], не перед P), низкая специфичность химотрипсина (С-термин [FYWML], не перед P), клострипаин, CNBr, энтерокиназа, гранзимеБ, фактор Ха, муравьиная кислота, глутамилэндопептидаза, гидроксилламин, йодособензойная кислота, ЛизК, ЛизН, NTCB (2-нитро-5-тиоцианобензойная кислота), пепсин (pH1.3), пепсин (pH>2), пролин-эндопептидаза, протеиназа К, стафилококковая пептидаза I, протеаза вируса травления табака, термолизин, тромбин, трипсин (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расщепления белка P01284 доступными протеазами*

Название фермента	Количество расщеплений	Расположение мест расщепления
Протеиназа Arg-C	4	12 56 58 75
Эндопептидаза Asp-N	4	2 8 46 51
Asp-N-эндопептидаза + N-концевой Glu	5	2 8 23 46 51
CNBr	1	61
Высокая специфичность химотрипсина (С-термин для [FYW], не перед P)	6	6 10 22 50 54 66
Низкая специфичность химотрипсина (С-термин [FYWML], не перед P)	17	1 6 10 13 14 17 22 23 26 45 50 54 57 61 66 67 71
Клострипан	4	12 56 58 75
Муравьиная кислота	4	3 9 47 52
глутамилэндопептидаза	1	24
Гидроксилламин	1	72
ЛизК	6	20 21 59 64 65 74
ЛизН	6	19 20 58 63 64 73
Пепсин (pH 1.3)	14	5 6 9 10 13 16 17 25 26 49 50 57 70 71
Пепсин (pH>2)	18	5 6 9 10 13 16 17 21 25 26 49 50 53 54 57 65 70 71
Протеиназа К	27	2 5 6 7 10 13 14 17 19 22 23 24 26 27 48 49 50 51 54 55 57 62 63 66 67 70 71
Стафилококковая пептидаза I	1	24
Термолизин	19	1 4 5 12 13 16 18 22 25 26 48 49 56 60 61 62 66 69 70
Трипсин	10	12 20 21 56 58 59 64 65 74 75

*Информация получена из результатов поиска с помощью программного обеспечения PeptideCutter 15 ноября 2024 г.

Во время моделирования эксперимента некоторые выбранные протеазы (BNPS-скатоле, каспаза1-каспаза10, энтерокиназа, фактор Ха, гранзимеБ, йодособензойная кислота, NTCB (2-нитро-5-тиоцианобензойная кислота), пролин-эндопептидаза, тромбин, протеаза вируса травления табака) не смогли оптимально расщепить и высвободить биоактивные пептиды.

Тем не менее многие протеазы продемонстрировали высокий потенциал в генерации большого количества расщеплений белка. Количество расщепленных пептидных связей указывает на степень гидролиза белка.

При расчете масс учитывали:

- **отобразить пептиды с массой:** превышающей 500 и меньше, чем unlimited Далтон сортируется по пептидным массам;
- **для каждого отображаемого пептида показать:** все известные посттрансляционные модификации;
- **максимальное количество пропущенных сколов (МС):** 0;
- **модификации цистеинов:** все цистеины в восстановленной форме с аддуктами акриламида (Cys_PAM);
- **модификации метионинов:** метионины не подвергались окислению;
- **расчет массы:** используя моноизотопные массы встречающихся аминокислотных остатков и определяя массу пептида как $[M+H]^+$.

Результат моделирования гидролиза с использованием выбранных коммерческих ферментов представлен в таблице 2.

Таблица 2

Молекулярная масса, положение, пептидная последовательность белка, высвобождаемые различными ферментами*

Молекулярная масса			Положение			Пептидная последовательность		
протеиназа К	пепсин (pH>2)	термолизин	протеиназа К	пепсин (pH>2)	термолизин	протеиназа К	пепсин (pH>2)	термолизин
469,1929	469,1929	859,3944	7–10	7–10	6–12	TADF	TADF	FTADF SR
438,2711	438,2711	509,3082	20–22	20–22	19–22	KKY	KKY	AKKY
375,2350	437,2030	348,1765	11–13	3–6	23–25	SRL	DGVF	LES
348,1765	375,2350	317,1819	24–26	11–13	14–16	ESL	SRL	LGQ
317,1819	227,1138	262,1033	15–17	1–2	2–4	GQL	HA	ADG
290,1346	219,1339	219,1339	3–5	25–26	17–18	DGV	SL	LS
227,1138	204,0979	156,0767	1–2	15–16	1–1	HA	GQ	H
177,0870	177,0870	132,1019	18–19	18–19	13–13	SA	SA	L
166,0862	148,0604	132,1019	6–6	24–24	26–26	F	E	L
132,1019	132,1019	132,1019	14–14	14–14	27–27	L	L	I
132,1019	132,1019	118,0862	23–23	17–17	5–5	L	L	V
132,1019	132,1019	916,4159	27–27	23–23	50–56	I	L	FTDN YTR
633,3501	132,1019	544,3565	58–62	27–27	57–60	RKQMA	I	LRKQ
512,1987	537,3395	537,3395	51–54	63–66	63–66	TDNY	VKKY	VKKY
438,2711	512,1987	429,1728	64–66	51–54	45–48	VKKY	TDNY	HSDA
429,1728	446,2609	333,1768	45–48	68–71	67–69	HSDA	NSIL	LNS
389,2507	431,2725	246,1448	55–57	58–60	71–72	TRL	RKQ	LN
333,1768	429,1728	150,0583	68–70	45–48	61–61	NSI	HSDA	M
166,0862	389,2507	132,1019	50–50	55–57	70–70	F	TRL	I
133,0608	265,1546	118,0862	72–72	49–50	49–49	N	VF	V
132,1019	221,0954	90,0549	67–67	61–62	62–62	L	MA	A
132,1019	133,0608	–	71–71	72–72	–	L	N	–
118,0862	132,1019	–	49–49	67–67	–	V	L	–
118,0862	–	–	63–63	–	–	V	–	–

* Информация получена из результатов поиска с помощью программного обеспечения PeptideMass 06 декабря 2024 г.

Выявлено, что протеиназа К высвобождает большее количество предпочтительных биоактивных пептидов по сравнению с другими ферментами одноименного действия. Эффективность этих ферментов в высвобождении пептидов с биоактивностью зависит в основном от специфичности расщепления.

Наиболее длинный пептид «FTSDFSR» был обнаружен в образцах, подвергшихся обработке термолизинном, в то же время данный пептид обладал самой высокой молекулярной массой (859,3944 кДа). Пептид «VKKY» был признан наиболее часто встречающимся в образцах, обработанных всеми тремя ферментами, и был первым по массе (537,3395) при обработке пепсином (рН>2). Наименьшую массу (90,0549) показал пептид «А», обработанный термолизинном.

Следующим этапом исследования предстояло изучение прогнозируемой биологической активности выбранных пептидов.

Идентифицированные пептиды различались по длине: от 1 до 7 аминокислот, и имели показатели Peptide Ranker в диапазоне от 0,1 до 0,99 (табл. 3).

Таблица 3

Идентифицированные пептидные последовательности из фракции гидролизата VIP белка с молекулярной массой 8,539 кДа

Пептидная последовательность и ранжировка пептидов по прогнозируемой биологической активности					
протеиназа К		пепсин (рН>2)		термолизин	
TSDF	0,3	TSDF	0,3	FTSDFSR	0,498556
KKY	0,105	KKY	0,105	AKKY	0,139303
SRL	0,49389	DGVF	0,729146	LES	0,0577883
ESL	0,0804803	SRL	0,49389	LGQ	0,322493
GQL	0,49668	HA	0,184157	ADG	0,309463
DGV	0,161525	SL	0,330018	LS	0,204782
HA	0,184157	GQ	0,376251	H	0,226978
SA	0,141393	SA	0,141393	L	0,639092
F	0,999052	E	0,0240725	L	0,639092
L	0,639092	L	0,639092	I	0,223609
L	0,639092	L	0,639092	V	0,0266109
I	0,223609	L	0,639092	FTDNYTR	0,283549
RKQMA	0,20774	I	0,223609	LRKQ	0,127531
TDNY	0,106237	VKKY	0,0655318	VKKY	0,0655318
KKY	0,105	TDNY	0,106237	HSDA	0,113
HSDA	0,113	NSIL	0,245434	LNS	0,125503
TRL	0,271255	RKQ	0,0987733	LN	0,257214
NSI	0,118644	HSDA	0,113	M	0,970074
F	0,999052	TRL	0,271255	I	0,223609
N	0,109656	VF	0,815398	V	0,0266109
L	0,639092	MA	0,693293	A	0,208643
L	0,639092	N	0,109656	–	
V	0,0266109	L	0,639092	–	
V	0,0266109	–		–	

* Информация получена из результатов поиска с помощью программного обеспечения Peptide Ranker 12 декабря 2024 г.

Для каждого пептида было получено значение, указывающее на его потенциальную активность. В дальнейших исследованиях будут использованы только те пептиды, у которых показатель пептидного ранкера выше 0,5, так как чем ближе показатель к 1, тем выше биологическая активность пептида.

Таким образом, было идентифицировано 6 пептидных последовательностей, обладающих потенциальной биоактивностью.

В ходе исследования было установлено, что среди использованных ферментов пепсин (pH>2) теоретически продемонстрировал гидролиз большинства биологически активных пептидов, за ним следуют протеиназа К и термолизин.

Данные согласуются с исследованиями других авторов и объясняются тем, что пепсин обладает более широкой специфичностью и преимущественно расщепляет пептидные связи, образованные ароматическими аминокислотами и аминокислотами с карбоксильными группами.

Так, F.C.A. Panjaitan и др. признали пепсин (pH > 2) наиболее перспективным ферментом для получения биоактивных пептидов из белка гигантского морского окуня, идентифицированных с помощью протеомики, который теоретически высвобождает 82 ингибирующих DPP-IV пептида и 47 ингибирующих ACE-I пептидов [16].

Использование пепсина при гидролизе желатина привело к образованию пептидов, полученных из коллагена с низкой молекулярной массой от 3 до 6 кДа [17].

P. Kęska и др. в своей работе использовали пепсин для выделения из вяленой свиной корейки пептидов с молекулярной массой менее 7 кДа, способных ингибировать DPP-IV [18].

Доказано, что расщепление ферментами существенно влияет на процесс протеолиза. Его можно использовать для изменения степени гидролиза пептидов в зависимости от различных ферментов.

Поскольку Peptide Ranker прогнозирует, насколько вероятно биологическая активность пептидов, но не указывает, для каких целей они наиболее подходят, дальнейшие исследования будут направлены на определение токсичности, аллергенности, а также наличия терапевтического эффекта *in silico* и *in vivo*.

Заключение

Представленные в исследовании результаты подтверждают, что применение техники *in silico* может обеспечить быструю и надежную информацию об идентификации биоактивных пептидов из гидролизатов белков и определить выбор подходящего фермента для получения этих пептидов.

Результаты анализа гидролизата P01284 показали, что животные белки могут быть хорошими источниками пептидов. Более того, пепсин (pH>2) продемонстрировал наибольшую перспективность в высвобождении биоактивных пептидов из гидролизатов белков. Кроме того, свиные субпродукты могут быть альтернативным источником биоактивных пептидов, которые могут использоваться в качестве функционального ингредиента в фармацевтической инутрицевтической продукции. Однако необходимо дальнейшее тестирование *in vivo*, чтобы гарантировать безопасность и стабильность этих пептидов во время желудочно-кишечного пищеварения.

Библиография

1. Fu Y., Therkildsen M., Aluko R.E. et al. Exploration of collagen recovered from animal by-products as a precursor of bioactive peptides: Successes and challenges // Crit Rev Food Sci Nutr. – 2019. – Vol. 59(13). – P. 2011–2027. – DOI: 10.1080/10408398.2018.1436038.
2. Зинина О.В., Меренкова С.П., Ребезов М.Б. и др. Исследование свойств белковых гидролизатов, полученных из желудков цыплят-бройлеров, как потенциального компонента биоактивных пленочных покрытий // Пищевые системы. – 2024. – № 7 (1). – С. 44–51. – DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-44-51.
3. Lafarga T., Álvarez C., Hayes M. Bioactive peptides derived from bovine and porcine co-products: // A review Journal of Food Biochemistry. – 2017. – Vol. 41 (6) (2017). – P. e12418.
4. Fadimu G.J., Le T.T., Gill H. et al. Enhancing the Biological Activities of Food Protein-Derived Peptides Using Non-Thermal Technologies: A Review // Foods – 2022. – Vol. 11(13). – P. 1823–1849. – DOI: 10.3390/foods11131823.
5. Daliri E. B.-M., Oh D.H., Lee B.H. Bioactive Peptides // Foods, 2017. – Vol. 6. – P. 32–52. – DOI: 10.3390/foods6050032.21.

6. Зинина О.В., Николина А.Д., Хвостов Д.В. и др. Белковый гидролизат как источник биоактивных пептидов в пищевой продукции диабетического питания // Пищевые системы. – 2023. – № 6 (4). – С. 440–448. – DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-4-440-448.
7. Иванов Н.В. Молекулярный *in silico* скрининг и докинг потенциальных ингибиторов активности ферментов растительного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2023. – № 1. – С. 117–135. – DOI: 10.36107/spfp.2023.399.
8. Echave J., Otero P., Garcia-Oliveira P. et al. Seaweed-Derived Proteins and Peptides: Promising Marine Bioactives // Antioxidants (Basel). – 2022. – Vol. 11 (1). – P. 176–201.
9. Fadimu G.J., Le T.T., Gill H. et al. Enhancing the Biological Activities of Food Protein-Derived Peptides Using Non-Thermal Technologies: A Review // Foods. – 2022. – Vol. 11 (13). – P. 1823–1849. – DOI: 10.3390/foods11131823.
10. Fu Y., Therkildsen M., Aluko R.E. et al. Exploration of collagen recovered from animal by-products as a precursor of bioactive peptides: Successes and challenges // Crit Rev Food Sci Nutr. – 2019. – Vol. 59 (13). – P. 2011–2027. – DOI: 10.1080/10408398.2018.1436038.
11. Чиряпкин А.С., Глушко А.А., Чиряпкин В.С. и др. Методы и достижения компьютерного моделирования клетки // Бюллетень науки и практики. – 2019. – Vol. 5 (5). – P. 128–135. – DOI: 10.33619/2414-2948/42/17.
12. Ivanyak A., Darevich M., Mogut D. et al. Clarification of the role of *in silico* methodologies in approaches to the study of bioactive peptides obtained from food products // Journal of Functional Foods. – 2019. – Vol. 61. – P. 103486. – DOI: 10.1016/j.jff.2019.103486.
13. Тихонов С.Л., Тихонова Н.В. Пищевой пептид для предупреждения избыточной массы тела: виртуальный скрининг прогнозирования токсичности выведения // Вестник ВСГУТУ. – 2024. – № 2 (93) – С. 37–45.
14. Тихонов С.Л., Тихонова Н.В. Разработка с использованием молекулярной пептидной трансплантации потенциального нейропротекторного биопептида // Вестник ВСГУТУ. – 2024. – № 1 (92) – С. 53–61.
15. Разумовская Е.С. [и др.]. Оценка содержания белка и аминокислотного состава субпродуктов свиней породы «Крупная белая» // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 1 (65). – С. 103–107. – EDN: XJBIMW.
16. Panjaitan F.C.A., Gomez H.L.R., Chang Y.W. In Silico Analysis of Bioactive Peptides Released from Giant Grouper (*Epinephelus lanceolatus*) Roe Proteins Identified by Proteomics Approach // Molecules. – 2018. – Vol. 23(11). – P. 2910–2924. – DOI: 10.3390/molecules23112910.
17. Iwaniak A., Minkiewicz P., Pliszka M. et al. Characteristics of Biopeptides Released In Silico from Collagens Using Quantitative Parameters // Foods. – 2020. – Vol. 9 (7). – P. 965–994. – DOI: 10.3390/foods9070965.
18. Kęska P., Stadnik J. Potential DPP IV Inhibitory Peptides from Dry-Cured Pork Loins after Hydrolysis: An In Vitro and In Silico Study // Curr Issues Mol Biol. – 2021 Vol. 43 (3). – P. 1335–1349. – DOI: 10.3390/cimb43030095.

Bibliography

1. Fu Y., Therkildsen M., Aluko R.E. et al. Exploration of collagen recovered from animal by-products as a precursor of bioactive peptides: Successes and challenges // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 59 (13). – P. 2011–2027. – DOI: 10.1080/10408398.2018.1436038.
2. Zinina O.V., Merenkova S.P., Rebezov M.B. et al. Study of the properties of protein hydrolysates obtained from stomachs of broiler chickens as a potential component of bioactive film coatings // Food Systems. – 2024. – N 7 (1). – P. 44–51. – DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-1-44-51.
3. Lafarga T., Álvarez C., Hayes M. Bioactive peptides derived from bovine and porcine co-products: // Journal of Food Biochemistry. – 2017. – Vol. 41 (6). – P. e12418.
4. Fadimu G.J., Le T.T., Gill H. et al. Enhancing the biological activities of food protein-derived peptides using non-thermal technologies: a review // Foods. – 2022. – Vol. 11 (13). – P. 1823–1849. – DOI: 10.3390/foods11131823.
5. Daliri E. B.-M., Oh D.H., Lee B.H. Bioactive Peptides // Foods. – 2017. – Vol. 6. – P. 32–52. – DOI: 10.3390/foods6050032.21.

6. *Zinina O.V., Nikolina A.D., Khvostov D.V. et al.* Protein hydrolysate as a source of bioactive peptides in food products for diabetic nutrition // *Food systems*. – 2023. – N 6 (4). – P. 440–448. – DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-4-440-448.
7. *Ivanov N.V.* Molecular in silico screening and docking of potential inhibitors of plant raw material enzyme activity // *Storage and Processing of Farm Products*. – 2023. – N 1. – P. 117–135. – DOI: 10.36107/spfp.2023.399.
8. *Echave J., Otero P., Garcia-Oliveira P. et al.* Seaweed-derived proteins and peptides: promising marine bioactives // *Antioxidants (Basel)*. – 2022. – Vol. 11 (1). – P. 176–201.
9. *Fadimu G.J., Le T.T., Gill H. et al.* Enhancing the biological activities of food protein-derived peptides using non-thermal technologies: A review // *Foods*. – 2022. – Vol. 11 (13). – P. 1823–849. – DOI: 10.3390/foods11131823.
10. *Fu Y., Therkildsen M., Aluko R.E., Lametsch R.* Exploration of collagen recovered from animal by-products as a precursor of bioactive peptides: Successes and challenges // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2019. – Vol. 59 (13). – P. 2011–2027. – DOI: 10.1080/10408398.2018.1436038.
11. *Chiryapkin A.S., Glushko A.A., Chiryapkin V.S. et al.* Methods and achievements of computer modeling of the cell // *Bulletin of Science and Practice*. – 2019. – Vol. 5 (5). – P. 128–135. – DOI: 10.33619/2414-2948/42/17.
12. *Ivanyak A., Darevich M., Mogut D. et al.* Clarification of the role of in silico methodologies in approaches to the study of bioactive peptides obtained from food products // *Journal of Functional Foods*. – 2019. – Vol. 61. – P. 103486. – DOI: 10.1016/j.jff.2019.103486.
13. *Tikhonov S.L., Tikhonova N.V.* Food peptide for the prevention of overweight: virtual screening of toxicity prediction and elimination // *ESSUTM Bulletin*. – 2024. – N 2 (93) – P. 37–45.
14. *Tikhonov S.L., Tikhonova N.V.* Design of potential neuroprotective biopeptide using molecular peptide transplantation // *ESSUTM Bulletin*. – 2024. – N 1 (92) – P. 53–61.
15. *Razumovskaya E.S. [et al.]*. Evaluation of protein content and amino acid composition of by-products of pigs breed «Large White» // *XXI century: results of the past and problems of the present plus*. – 2024. – Vol. 13, N 1 (65). – P. 103–107. – EDN: XJBIMW.
16. *Panjaitan F.C.A., Gomez H.L.R., Chang Y.W.* In Silico analysis of bioactive peptides released from Giant Grouper (*Epinephelus lanceolatus*) roe proteins identified by proteomics approach // *Molecules*. – 2018. – Vol. 23 (11). – P. 2910–2924. – DOI: 10.3390/molecules23112910.
17. *Iwaniak A., Minkiewicz P., Pliszka M. et al.* Characteristics of Biopeptides Released In Silico from Collagens Using Quantitative Parameters // *Foods*. – 2020. – Vol. 9 (7). – P. 965–994. – DOI: 10.3390/foods9070965.
18. *Kęska P., Stadnik J.* Potential DPP IV inhibitory peptides from dry-cured pork loins after hydrolysis: An In Vitro and In Silico study // *Current Issues of Molecular Biology*. – 2021 –Vol. 43 (3). – P. 1335–1349. – DOI: 10.3390/cimb43030095.

**4.3.1 – ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

DOI 10.53980/24131997_2025_1_64

О.В. Мяло, канд. техн. наук, доц., e-mail: ov.myalo@omgau.org

В.В. Мяло, канд. техн. наук, доц., e-mail: vv.myalo@omgau.org

Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, г. Омск

УДК 621.3.078.3

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ МОЙКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

В последние годы нейросетевые технологии и модели на их основе находят применение в разных отраслях промышленности, на предприятиях агропромышленного комплекса и в автомобильном сервисе. С целью совершенствования работы и управления процессом портальной мойки автомобилей, применяемых на предприятиях агропромышленного комплекса, авторами предложено использовать нейросетевые технологии. При построении математической модели выходных параметров автомойки на основе нейронной сети выбраны следующие: геометрические размеры автомобиля и модель, а также степень загрязненности автомобиля, от которых будут зависеть выходные параметры: расход воды, моющих средств, время и цикл мойки. Установлено, что нейросетевой алгоритм, распознающий уровень загрязнения и тип автомобиля, можно применить для управления подачей воды в портальной мойке, что должно уменьшить расход воды и в целом повысить энергоэффективность мойки. Обоснованы параметры портальной мойки для автомобилей. Определены технологии работы нейросетевого алгоритма в портальной мойке для автомобилей. Разработан алгоритм, определяющий класс автомобиля и ее загрязнение. Практическая значимость работы заключается в обосновании применения автоматической портальной мойки автомобилей для очистки их путем струйной подачи воды с высоким давлением, а также обоснована необходимость совершенствования управления портальной мойкой, на основании новых алгоритмов управления для экономии расхода воды, электроэнергии и времени очистки автомобилей разных марок.

Ключевые слова: уборочно-моечные работы, портальная мойка, нейросеть, автомобиль, алгоритм управления, пороговое значение.

O.V. Myalo, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

V.V. Myalo, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk

**IMPROVEMENT OF CAR WASH CONTROL
USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES**

In recent years, neural network technologies and models have been used in various industries, at agro-industrial enterprises and in car service. In order to improve the operation and management of portal car wash process at agro-industrial enterprises, the authors proposed neural network technologies. When constructing a car wash mathematical model based on neural network, the following output parameters were selected: geometrical dimensions of a vehicle and its model, as well as the dirtiness of the vehicle and its type. Water and detergent consumption, washing time and washing cycle are dependent on the output parameters. It is found that a neural network algorithm recognizing the dirtiness level and vehicle type can be applied to control the water supply in a portal wash, which should reduce water consumption and generally increase the energy efficiency of the wash. The parameters of a portal car wash are substantiated. Neural network algorithm techniques in a car wash are identified. The authors created an algorithm determining vehicle class and dirtiness. The study proves the effectiveness of automatic portal car washing for vehicle cleaning with high pressure water jetting, as well as the need to improve the portal wash control, based on new control algorithms to save water, electricity and time consumption when cleaning vehicles of different makes.

Key words: *cleaning and washing works, portal wash, neural network, vehicle, control algorithm, threshold value.*

Введение

Одним из видов вспомогательных работ при проведении операций технического обслуживания и ремонта автомобилей в агропромышленном комплексе являются уборочно-моечные работы, которые необходимы также в процессе их рядовой эксплуатации. Решение проблем качественной очистки автомобилей в современном сервисе требует поиска новых нестандартных решений по совершенствованию моечного оборудования, направленного на снижение материальных и трудовых затрат, повышение производительности и соблюдении норм экологического законодательства [1]. В последние годы нейросетевые технологии и модели на их основе находят достаточно широкое применение в сельскохозяйственном производстве, промышленных предприятиях, а также в автомобильном сервисе [2, 3]. Авторами на основе анализа определены основные технические и организационные мероприятия при внедрении нейросетевой технологии в процесс уборочно-моечных работ станций технического обслуживания автомобилей, в сервисных центрах предприятий АПК и дилеров [4]. Процесс исследования направлен на совершенствование системы управления работой портальной мойки автомобилей на основе нейросетевых технологий. В качестве математической модели выбрана модель нейронной сети, которая учитывает зависимости расхода воды, моющих средств, времени и цикла мойки от геометрических размеров и формы автомобиля с учетом степени загрязненности автомобиля.

Цель исследования – повышение эффективности процесса наружной очистки автомобилей путем уменьшения расхода воды и повышения энергоэффективности портальной мойки для автомобилей путем применения нейросетевого алгоритма управления.

Материалы и методы исследования

Для выбора необходимого оборудования был проведен поисковый эксперимент, в ходе которого исследованы параметры и особенности нескольких типов моечных установок, применяемых в сельскохозяйственных предприятиях и на станциях технического обслуживания автомобилей. Проанализированы конструкции струйных моечных установок, пенных моечных установок, моечных установок с использованием при мойке горячей воды, автоматических моечных установок, многофункциональных моечных установок [5]. В процессе анализа конструкций применяемых моечных установок в качестве сравниваемых параметров приняты: расход воды на мойку одного автомобиля, время очистки легковых автомобилей. Сравнительные характеристики рассмотренных установок представлены на рисунках 1, 2.

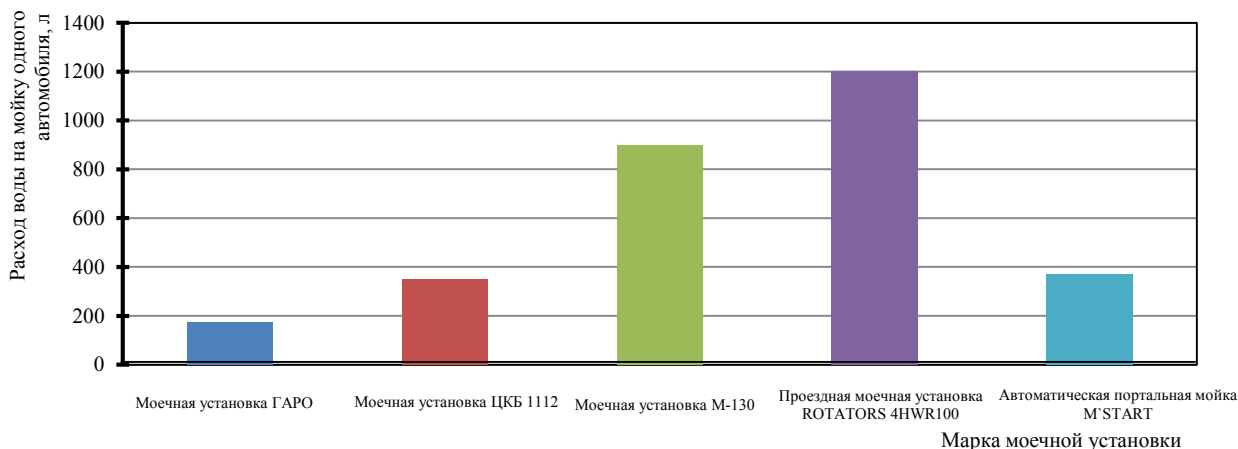


Рисунок 1 – Гистограмма расхода воды на мойку одного автомобиля

По показателю, представленному на рисунке 1, можно сделать следующий вывод: самый малый расход воды имеет моечная установка ГАРО, при этом данная установка струйного типа работает при высоком давлении воды, обычно от 100 до 200 бар, что позволяет эффективно и быстро удалять грязь, пыль, масло и другие загрязнения с поверхности автомобиля. При всех имеющихся достоинствах установка ГАРО уступает многофункциональным моечным установкам, которые представляют собой более продвинутые и разносторонние устройства и позволяют не только мыть автомобиль, но и выполнять другие функции, такие как полировка, нанесение защитных покрытий, удаление вмятин и царапин, а также обработка и очистка салона [6].

Сравнение времени работы рассматриваемых установок на 1 единицу техники представлено на рисунке 2.

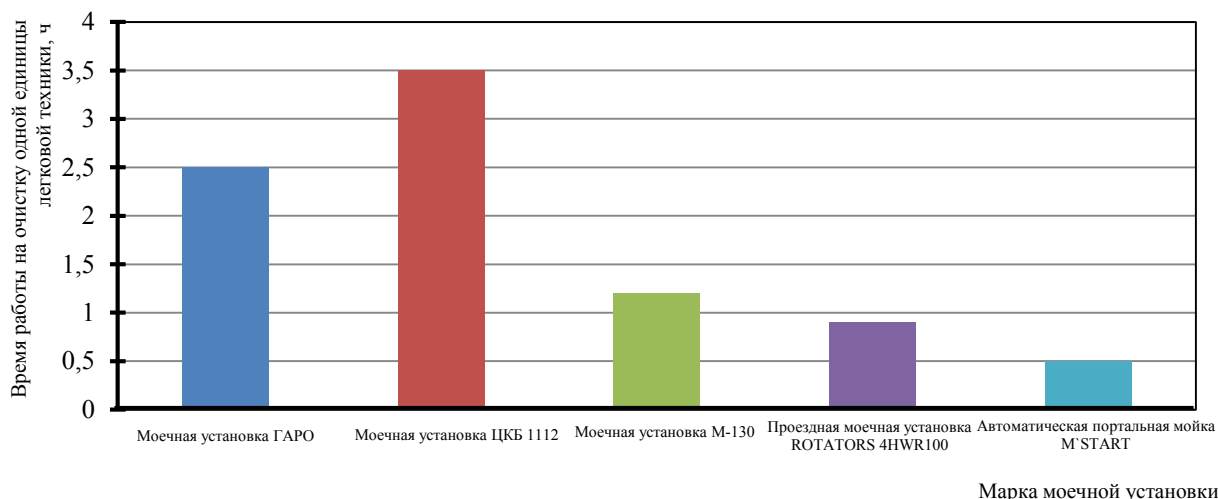


Рисунок 2 – Гистограмма распределения времени очистки автомобилей разными типами моечных установок

По показателю затрат времени на очистку автомобилей меньшее значение имеет автоматическая портальная мойка M'START. Особенностью портальной мойки автомобилей M'START является автоматизация процесса. Это уменьшает вероятность ошибок и обеспечивает более высокое качество мойки. Автоматическая мойка значительно сокращает время мойки автомобиля [7].

На основании двух оценочных показателей работы моечных установок составлена диаграмма распределения эффективности использования различных конструкций моек при техническом обслуживании автомобилей, применяемых на предприятиях агропромышленного комплекса в процентном соотношении (рис. 3).

На основании проведенного анализа рациональным выбором для очистки легковых автомобилей мы считаем автоматическую портальную мойку M'START. Ее работа базируется на водоструйной очистке, в основу которой положена сила гидравлического удара, что может служить базой для дальнейшего совершенствования и применения устройства акустико-кавитационного действия [8]. При анализе работы портальной мойки M'START был выявлен ряд недостатков. Например, качество очистки автомобиля зависит от степени его загрязнения и конструктивных особенностей. Программы, которыми оснащена мойка, направлены на выполнение стандартных циклов, ограниченных по расходу воды и времени очистки и не всегда работающих при отмывании сильных загрязнений. Особенно этот недостаток может проявиться при мойке автомобилей, используемых в сельскохозяйственном производстве, и крупногабаритной техники.

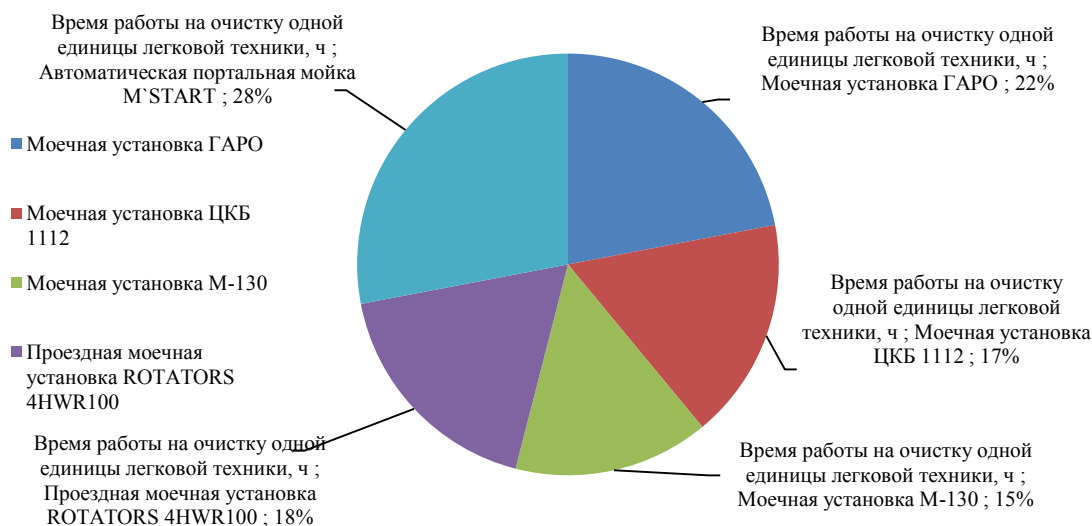


Рисунок 3 – Эффективность применения моек различных конструкций на станциях технического обслуживания (СТО) по двум показателям оценки, %

С целью получения лучшего результата приходится выбирать более продолжительный цикл мойки, что способствует увеличению затрат времени и средств или повторять циклы мойки несколько раз. Причиной этому является использование традиционных математических моделей при программировании, которые дают узкий разбег реализации зависимостей. Решение этой проблемы является актуальным на данный момент.

Одним из возможных подходов к оптимизации процесса мойки является использование системы управления на основе датчиков, которая будет автоматически изменять режимы очистки [9, 10]. Датчики определения степени загрязнения автомобиля могут передавать информацию системе управления, которая будет автоматически регулировать параметры мойки для достижения оптимальных результатов.

Такие системы управления могут быть реализованы с использованием современных технологий Интернета вещей (ИТ), машинного обучения и алгоритмов искусственного интеллекта. Это позволит создать интеллектуальную систему, способную адаптироваться к различным условиям мойки и обеспечивать оптимальное использование ресурсов.

Такой подход не только повысит эффективность процесса мойки, но и снизит потребление воды, электроэнергии и моющих средств, что, в свою очередь, будет положительно сказываться на экологической стороне процесса мойки [11].

Результаты исследования и обсуждение

В контексте промышленных агрегатов и систем управления, использование искусственных нейронных сетей может значительно повысить эффективность управления электроприводными комплексами, особенно при изменении в широком спектре различных параметров механической части и режимов работы электропривода [12]. Это позволяет создавать более гибкие и точные системы управления, способные адаптироваться к новым условиям работы оборудования. Работу нейронных сетей можно описать так: на вход поступают сигналы через несколько входных каналов. Сигнал проходит через соединение (синапс), который имеет определенный вес. У каждого нейрона имеется определенное пороговое значение. Затем вычисляется взвешенная сумма входов, из которой вычитается пороговое значение, и в результате получается величина активации нейрона. С помощью функции активации данное значение преобразуется, и в результате получается выходной сигнал.

Вся работа начинается с ввода требуемых параметров оператором, далее используемая в алгоритме, нейронная сеть фотографирует автомобиль, прибывший на мойку, распознает его параметры, определяет степень загрязнения и подстраивает программу мойки на требуемое

давление воды, моющее средство и время очистки. При проверке работы нейронной сети оценили ее способность классифицировать автомобили по маркам и в зависимости от степени их загрязнения управлять мойкой. При оценке были заданы следующие показатели: «форма автомобиля», «степень загрязнения», «подача воды».

Габаритные размеры LADA 2121: длина 3740 мм, ширина 1680 мм, высота 1640 мм, форма кузова – 1.

Габаритные размеры LADA 2107 Седан: длина 4145 мм, ширина 1620 мм, высота 1446 мм, форма кузова – 2.

Степень загрязнения разделили на три степени: низкая – 1–3; средняя – 4–6; высокая – 7–9, «0» соответствует чистой машине.

С помощью программы Deductor проверили умение нейронной сети классифицировать объекты LADA 2121 и LADA 2107 по геометрическим параметрам и форме, по степени загрязнения. Таким образом, после определения типа машины и степени загрязнения рассчитали необходимый объем воды и давление подачи.

Ожидаемые варианты для LADA 2121: Y11 – низкая степень загрязнения, Y12 – средняя степень загрязнения, Y13 – высокая степень загрязнения, Y10 – чистый автомобиль.

Ожидаемые варианты для LADA 2107: Y21 – низкая степень загрязнения, Y22 – средняя степень загрязнения, Y23 – высокая степень загрязнения, Y20 – чистый автомобиль.

Габаритные размеры (длина, ширина и высота) – X1 X2 X3 соответственно, X4 форма автомобиля, X5 – степень загрязнения. Эти вариации нужны для составления обучающей выборки таблицы 1.

Введенные данные из таблицы 1 в программу Deductor представлены на рисунке 4.

X1,мм	X2,мм	X3,мм	X4	X5	Y11	Y12	Y13	Y10	Y21	Y22	Y23	Y20
3740	1680	1640	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	4	0	1	0	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	5	0	1	0	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	6	0	1	0	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	7	0	0	1	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	8	0	0	1	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	9	0	0	1	0	0	0	0	0
3740	1680	1640	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4145	1620	1446	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0
4145	1620	1446	2	2	0	0	0	0	1	0	0	0
4145	1620	1446	2	3	0	0	0	0	1	0	0	0
4145	1620	1446	2	4	0	0	0	0	0	1	0	0
4145	1620	1446	2	5	0	0	0	0	0	1	0	0
4145	1620	1446	2	6	0	0	0	0	0	1	0	0
4145	1620	1446	2	7	0	0	0	0	0	0	1	0
4145	1620	1446	2	8	0	0	0	0	0	0	1	0
4145	1620	1446	2	9	0	0	0	0	0	0	1	0
4145	1620	1446	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Рисунок 4 – Данные в программе Deductor

В программе указали, что X1-X8 – входные параметры, а Y10-Y13 и Y20-Y23 – выходящие. Нейросеть в виде графа представлена на рисунке 5.

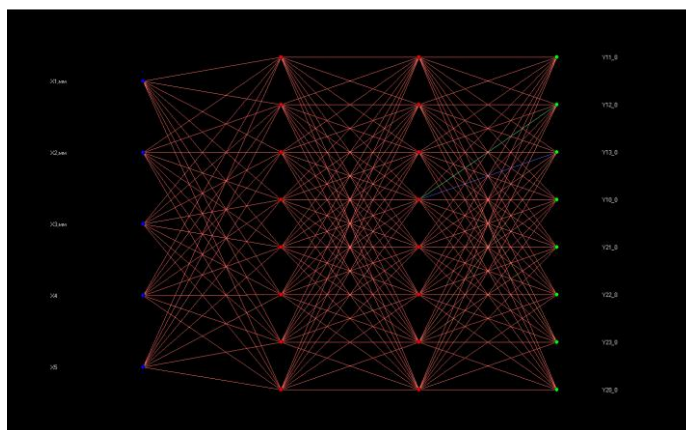


Рисунок 5 – Нейросеть 5×8×8×5

На основании рисунков 4, 5 можно сделать вывод, что результаты работы нейросети и параметров из обучающей выборки совпадали. Качество обучения нейросети представлено на рисунке 6.

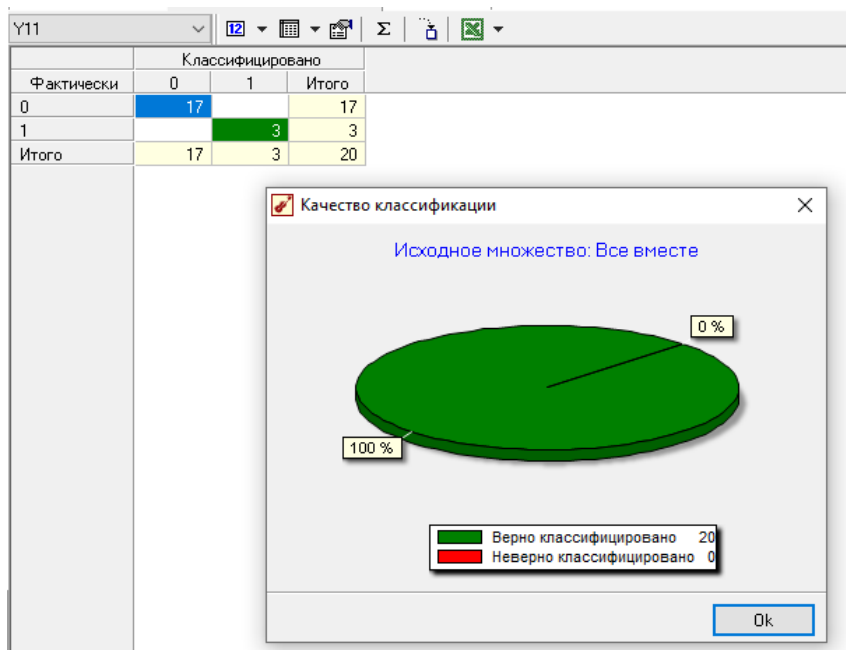


Рисунок 6 – Качество обучения

После оценки качества обучения нейронной сети в программе Deductor была проведена проверка работы сети по 1 варианту выборки (см. рис. 4), результаты проверки показаны на рисунке.

Входные параметры: $X_1=3740$ мм. $X_2=1680$ мм. $X_3=1640$ мм. $X_4=1$ $X_5=1$.

На основании оценки результата распределения нейронная сеть дала верный ответ Y11, т. е. LADA 2121 имела «низкую» загрязненность (рис. 7).

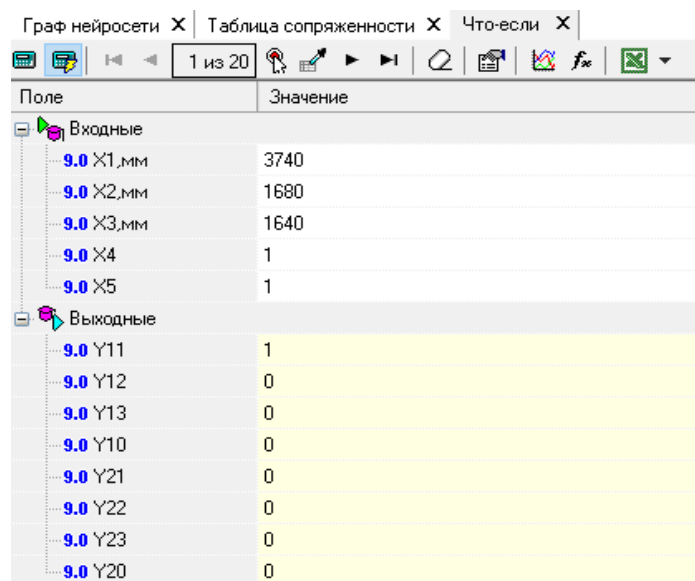


Рисунок 7 – Результат работы по 1-му варианту

На основании представленных данных для применения нейронной сети в управлении портальной автомобильной мойки была сформулирована технология обучения. Обучающая выборка по моделям автомобилей, с которой должна работать портальная мойка, состоит из фотографий по моделям автомобилей. Фотографии размером 16×16 количеством не менее 1000 шт. в разных проекциях (сверху, снизу, справа, слева) и разной степени загрязнения (от высокой до чистого автомобиля) (рис. 8). Такие действия необходимы, чтобы нейронная сеть понимала, какой объем воды и давление необходимы, а также отличала чистый автомобиль от грязного. Для каждого конкретного случая требуется оптимальный расчет объема воды и давления.

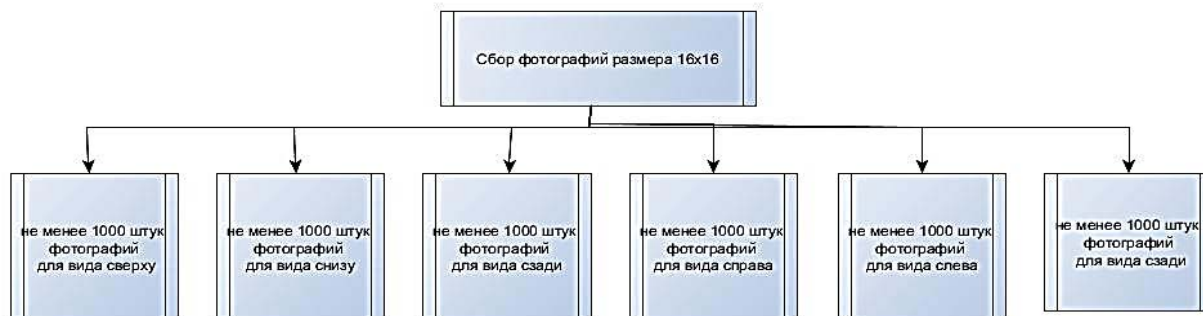


Рисунок 8 – Обучающая выборка по фотографиям

После обучения нейронной сети управлению процессами в портальной мойке необходимо было для постоянной фиксации состояния и формы автомобилей установить 6 камер. Далее задавалась управляющая программа с использованием нейронной сети, которая непосредственно влияет на все параметры процесса очистки.

На основании полученных данных был усовершенствован процесс очистки автомобилей на станции технического обслуживания. Этапы процесса мойки представлены на рисунке 9.



Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма управления мойкой

По новой технологии в порталную мойку помещается автомобиль, при помощи установленных камер он фотографируется, далее используемая в программном управлении нейронная сеть классифицирует автомобиль, подает управляющий сигнал на исполнительные механизмы, которые регулируют объем воды, давление, количество моющих средств за необходимое время. При завершении цикла мойки автомобиль снова фотографируется и проводится его классификация по степени чистоты, если автомобиль классифицирован как чистый, то процесс мойки завершается. На рисунке 9 представлен алгоритм управления усовершенствованной мойкой с использованием нейросетевых технологий.

Заключение

Исходя из проведенных исследований по усовершенствованию процесса мойки с использованием нейросетевых технологий, можно сделать следующие выводы:

1. Обоснована необходимость совершенствования управления порталной мойкой, которая нуждается в применении новых алгоритмов управления для обоснованного расхода воды, электроэнергии и времени очистки.

2. В качестве инструмента алгоритма управления мойкой рассмотрены нейросетевые вычислительные модели. Они являются современным инструментом компьютерных технологий, которые можно применять при проведении уборочно-моечных работ на станциях технического обслуживания автомобилей и сервисных центрах предприятий АПК [13, 14].

3. Оценена возможность применения нейронных сетей для выполнения распределения и идентификации автомобилей на основе параметров, которые зафиксированы камерами на фотографиях. В качестве основных параметров выбраны форма кузова, размеры, марка автомобиля и степень загрязненности. Получена архитектура нейронной сети $5 \times 8 \times 8 \times 8$ с функцией активации – сигмовидная. Дальнейшие исследования данного вопроса могут ориентироваться на этот результат, так как вопрос «какую архитектуру и функцию активации необходимо выбрать» является первым при применении нейронных сетей.

4. Разработана технология обучения нейронной сети для управления порталной мойкой, которая заключается в создании обучающей выборки фотографий автомобилей с шести видов (слева, справа, спереди, сзади, сверху, снизу), и каждый вид также относится к определенному классу загрязнения, который определится при дальнейшем исследовании [15].

6. На основании технологии обучения нейронной сети для управления порталной мойкой получена блок-схема алгоритма управления порталной мойкой на основе нейронной сети.

Библиография

1. Федорцова К.А., Алексеенок К.С., Мяло О.В. Организация работы автомойки под управлением ИИ // Сб. IV Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. «Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК», Омск, ФГБОУ ВО «Омский ГАУ». – Омск: Изд-во Омского гос. аграр. ун-та им. П.А. Столыпина, 2023. – С. 469–475.

2. Myalo O.V., Prokopov S.P., Myalo V.V. et al. Concept for the formation of technical service of agricultural machinery in Western Siberia // II International Conference on Agriculture, Earth Remote Sensing and Environment (RSE-II-2023). – Les Ulis, 2023. – С. 01044.

3. Бураев М.К., Шустеев А.В., Бураева Г.М. и др. Проблемы технического сервиса агропромышленного комплекса Байкальского региона // Вестник ВСГУТУ. – 2022. – № 3 (86). – С. 56–62.

4. Соломкин А.П., Мошкин Н.И., Мяло О.В. и др. Особенности современного состояния и приоритетные направления развития службы технического сервиса Омской области // Вестник ВСГУТУ. – 2019. – № 1 (72). – С. 74–80.

5. Соломкин А.П., Мяло О.В., Прокопов С.П. Формирование системы технического обслуживания машинно-тракторного парка в сельском хозяйстве в современных условиях // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 5 (44). – С. 54–60.

6. *Шимохин А.В., Кине Т.А., Сердалин М.К. и др.* Нейронные сети в техническом сервисе // Сб. III Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. «Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК», Омск, ФГБОУ ВО «Омский ГАУ». – Омск: Изд-во Омского гос. аграр. ун-та им. П.А. Столыпина, 2022. – С. 464–467.
7. *Кузнеценко А.В.* Прогнозирование себестоимости ремонта газотурбинного двигателя с помощью нейронных сетей в программных продуктах // Вестник Международного института рынка. – Самара: «Международный институт рынка» Университет «МИР», 2019. – № 1. – С. 149–155.
8. *Шимохин А.В., Болтовский С.Н.* Методика обучения нейронной сети для поддержки принятия решений в различных задачах менеджмента // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2022. – № 3. – С. 156–163. – DOI: 10.17586/2310-1172-2022-17-3-156-163.
9. *Галушкин А.И.* Нейронные сети: основы теории – М.: Телеком, 2012. – 496 с.
10. *Харламов В.В., Шкодун П.К., Огневский А.С.* Применение нейронной сети для оценки технического состояния тяговых электродвигателей локомотивов в технологическом процессе ремонта // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств: материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск: Изд-во Омского гос. ун-та путей сообщения, 2015. – С. 39–45.
11. *Шистеев А.В., Бурева Г.М.* Формализация уровня работоспособности транспортно-технологических машин в АПК // Вестник ВСГУТУ. – 2020. – № 3 (78). – С. 57–63.
12. *Кузнецов Е.С., Болдин Е.С., Власов В.М.* Техническая эксплуатация автомобилей. – М.: Наука, 2018. – 535 с.
13. *Немцев А.Е., Криков А.М.* Развитие сервиса – основа эффективного использования сервиса в Сибири // Достижения науки и техники АПК. – 2004. – № 10. – С. 21–23.
14. *Бурева Г.М., Шистеев А.В., Буряев М.К.* Применение ремонтно-логистических цепей при техническом сервисе транспортно-технологических машин // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2024. – № 50. – С. 8–18.
15. *Сладкова О.Б., Пирумова Л.Н., Пирумов А.А.* Проблемы использования сетевых информационных ресурсов в области сельского хозяйства. Методические рекомендации // Достижения науки и техники АПК. – М., 2016. – Т. 29, № 3. – С. 59–64.

Bibliography

1. *Fedortsova K.A., Alekseenok K.S., Myalo O.V.* Organization of car wash operation under AI control // Collection of the IV All-Russian (national) scientific and practical conference. The role of students research work in the development of the agro-industrial complex. – Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 2023. – P. 469–475.
2. *Myalo O.V., Prokopov S.P., Myalo V.V. et al.* Concept for the formation of technical service of agricultural machinery in Western Siberia // II International Conference on Agriculture, Earth Remote Sensing and Environment (RSE-II-2023). – Les Ulis, 2023. – P. 01044.
3. *Buraev M.K., Shisteev A.V., Buraeva G.M. et al.* Problems of technical service in agro-industrial complex of Baikal region // ESSUTM Bulletin. – 2022. – N 3 (86). – P. 56–62.
4. *Solomkin A.P., Moshkin N.I., Myalo O.V. et al.* The current state and priority directions of the technical service development in the Omsk region // ESSUTM Bulletin. – 2019. – N 1 (72). – P. 74–80.
5. *Solomkin A.P., Myalo O.V., Prokopov S.P.* Formation of a maintenance system for machinery and tractor fleet in agriculture under modern conditions // ESSUTM Bulletin. – 2013. – N 5 (44). – P. 54-60.
6. *Shimokhin A.V., Kine T.A., Serdalin M.K. et al.* Neural networks in technical service // Collection of the III All-Russian (national) scientific and practical conference. The role of students research work in agro-industrial complex development. – Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 2022. – P. 464–467.
7. *Kuznetchenko A.V.* Forecasting repair cost of a gas turbine engine using neural networks in software products // Bulletin of the International Market Institute. – Samara: «International Market Institute» IMI University, 2019. – N 1. – P. 149–155.
8. *Shimokhin A.V., Boltovskiy S.N.* Methodology for neural network training to support decision-making in various management problems // Scientific journal of NRU ITMO. Series: Economics and Environmental Management, 2022. – N 3. – P. 156–163. – DOI: 10.17586/2310-1172-2022-17-3-156-163.
9. *Galushkin A.I.* Neural networks: basics of theory. – М.: Telecom Publishing House, 2012. – 496 p.

10. *Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Ognevskiy A.S.* Neural network application in assessment of technical condition of locomotive traction electric motors in technological repair process // Innovative projects and technologies of mechanical engineering production: materials of the All-Russian scientific and technical conference with international participation. – Omsk: Omsk State University of Railway Engineering, 2015. – P. 39–45.
11. *Shisteev A.V., Buraeva G.M.* Formalization of the performance level of transport and technological machines in the agro-industrial complex // ESSUTM Bulletin, 2020. – N 3 (78). – P. 57–63.
12. *Kuznetsov E.S., Boldin E.S., Vlasov V.M.* Technical operation of cars. – M.: Nauka Publishing House, 2018. – 535 p.
13. *Nemtsev A.E., Krikov A.M.* Service development – the basis for effective use of service in Siberia // Achievements of Science and Technology of AIC. – 2004. – N 10. – P. 21–23.
14. *Buraeva G.M., Shisteev A.V., Buraev M.K.* Application of repair and logistics chains in technical maintenance of transport and technological machines // Actual Issues of Agrarian Science. – 2024. – N 50. – P. 8–18.
15. *Sladkova O.B., Pirumova L.N., Pirumov A.A.* Problems of using network information resources in the field of agriculture. Methodical recommendations // Achievements of Science and Technology of AIC. – 2016. – Vol. 29, N 3. – P. 59–64.

DOI 10.53980/24131997_2025_1_74

С.С. Ямпиров, д-р техн. наук, проф., e-mail: yampilovss@mail.ru

Н.А. Нехуров, аспирант, e-mail: nexurov@gmail.com

В.Б. Балданов, канд. техн. наук, доц.

Г.Ж. Хандакова, канд. техн. наук, доц.

А.О. Жигжитов, канд. техн. наук, доц.

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ

УДК 631.362

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ В СОРТИРОВКЕ И АНАЛИЗЕ ЗЕРНА

Данный обзор посвящен анализу современных методов применения технического зрения для автоматизации процессов анализа и сортировки семян, включая зерновые культуры. Рассмотрены различные подходы от простых методов обработки изображений до комплексных систем, интегрирующих машинное обучение, спектроскопию и передовые оптические решения. Особое внимание уделено оценке зрелости и качества семян, повышению точности и производительности сортировочных систем, а также применению современных алгоритмов обнаружения объектов, таких как YOLOv5n. Проанализированы ключевые факторы, влияющие на эффективность сортировки, включая методы анализа изображений, алгоритмы машинного обучения, аппаратную реализацию и создание баз данных. Результаты обзора могут служить основой для разработки и совершенствования сепараторов с техническим зрением для сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: сепаратор, техническое зрение, очистка зерна.

S.S. Yampilov, Dr. Sc. Engineering, Prof.

N.A. Nekhurov, PG student

V.B. Baldanov, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

G.Zh. Khandakova, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

A.O. Zhigzhitov, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude

TECHNICAL VISION IN GRAIN SORTING AND ANALYSIS

The review analyzes current methods of applying technical vision to automate seed analysis and sorting processes, including grain crops. Various approaches are considered, ranging from simple image processing methods to complex systems that integrate machine learning, spectroscopy and advanced optical solutions. Special attention is given to assessing seed maturity and quality, improving the accuracy and efficiency of sorting systems, and utilizing modern object detection algorithms, such as YOLOv5n. Key factors influencing sorting efficiency are analyzed, including image analysis methods, machine learning algorithms, hardware implementations, and database creation. The results of this review can serve as a foundation for developing and improving technical vision-based separators for agricultural production.

Key words: separator, technical vision, grain purification

Введение

Автоматизация процессов очистки и сортировки зерна играет ключевую роль в современном сельском хозяйстве и пищевой промышленности, поскольку качество семенного материала напрямую определяет урожайность и качество конечной продукции. Традиционные методы сортировки (воздушная сепарация, решетные станы, триеры) часто оказываются недостаточно эффективными при необходимости высокой точности, производительности и отделения трудноотделимых примесей, таких как татарская гречишка, присутствующая в зерне в Республике Бурятия [1, 2]. Применение технологий технического зрения (машинного зрения) для автоматизации анализа и сортировки зерна становится все более актуальным, обеспечивая

объективный и неразрушающий анализ на основе обработки изображений. Техническое зрение позволяет определять широкий спектр характеристик, включая размер, форму, цвет, текстуру, наличие дефектов и другие качественные показатели.

Цель работы – анализ современных методов, применяемых в технических средствах для очистки и сортировки зерна с использованием технического зрения.

Материалы и методы исследования

Данный обзор посвящен анализу современных методов, применяемых в системах технического зрения для анализа и сортировки семян, включая зерновые культуры. Рассмотренные работы используют разнообразные подходы, основанные на комбинации методов обработки изображений, машинного обучения, спектроскопии и управления.

Общие методы:

- **Обработка изображений:** включает в себя широкий спектр техник, таких как предварительная обработка (улучшение контраста, удаление шума, фильтрация, сегментация, выделение контуров), извлечение признаков (анализ формы, текстуры, цвета) и морфологический анализ. Для анализа цвета используются различные цветовые пространства, например RGB, HSV, Lab. Для текстурного анализа могут применяться статистические методы, такие как матрицы GLCM (Gray-Level Co-occurrence Matrix), и спектральные методы.

- **Машинное обучение:** используются как классические алгоритмы (SVM, KNN, Random Forest и др.), так и методы глубокого обучения, включая сверточные нейронные сети (CNN), рекуррентные нейронные сети (RNN) и другие современные архитектуры. Для задач обнаружения объектов в реальном времени применяются алгоритмы, такие как YOLOv5n, RetinaNet и Faster R-CNN.

- **Спектроскопия:** основана на анализе взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. В контексте анализа семян применяется для определения химического состава, зрелости и других внутренних характеристик. Часто используются флуоресцентная спектроскопия (анализ излучения после возбуждения светом определенной длины волны) и мультиспектральный анализ (получение изображений в нескольких диапазонах спектра).

- **Методы управления:** включают в себя различные стратегии управления исполнительными механизмами сортировочных систем, такие как управление воздушным потоком, механическими манипуляторами и др. Важным аспектом является использование систем с обратной связью для повышения точности, например с использованием прогнозного контроллера модели (MPC).

Применение методов в рассмотренных работах:

- Фавахерджи и др. [3] изучали применение мультиспектральных изображений для сегментации.

- Мерзуги и др. [4] использовали анализ цвета, текстуры и формы с применением SVM, KNN и Random Forest.

- Виет и др. [5] исследовали повышение точности с помощью замкнутого контура рециркуляции материала и управления с обратной связью на основе MPC. Для моделирования использовались CFD и DEM.

- Чжан и др. [6] использовали высокоскоростную съемку линейными камерами, анализ флуоресценции хлорофилла (возбуждение на 670 нм) и CNN с механизмами остаточного обучения и внимания. Для сортировки применялся управляемый воздушный поток.

- Фэн и др. [7] разработали сортировщик на основе машинного зрения и YOLOv5n.

- Ислам и др. [8] исследовали RetinaNet и Faster R-CNN для обнаружения и классификации семян.

- Велесака и др. [9] представили обзор методов классификации семян с использованием компьютерного зрения.

- Для отделения трудноотделимых примесей ведутся исследования на фотосепараторах [10 - 13].
- Во ВСГУТУ [14 - 17] разработан сепаратор для очистки зерна с использованием технического зрения.
- С целью увеличения урожайности и подготовки кондиционных семян проводятся исследования с использованием фотосепараторов (Мяснянкин К.В., Лебедев Д.В. [18, 19]).

Результаты и обсуждение

Оценка качества зерна

Помимо сортировки по физическим параметрам, важной задачей является оценка качества зерна.

Качество зерна – один из ключевых параметров, влияющих на эффективность его использования. В работе [4] предложен метод автоматического анализа качества зерна твердой пшеницы, в котором используется сочетание анализа цвета, текстуры и формы. Для реализации этого подхода применялись алгоритмы машинного обучения, включая метод опорных векторов (SVM), метод k ближайших соседей (KNN) и алгоритм случайного леса (Random Forest).

Этот подход позволяет проводить объективную и автоматизированную оценку качества, определения сорта и повышения производительности сельскохозяйственных процессов. Благодаря возможности адаптировать алгоритмы к различным сортам зерна и параметрам качества система становится универсальным инструментом для контроля качества.

По сравнению с традиционными методами, которые включают ручной осмотр или химический анализ, предложенный подход отличается большей скоростью, экономичностью и объективностью.

Повышение точности сортировки

Точность сортировки напрямую влияет на эффективность и экономическую целесообразность использования оптических сортировщиков. Однопроходные системы подвержены ошибкам из-за неоднородности потока материала и вариаций освещения.

Для повышения точности сортировки в работе [5] был предложен подход, основанный на замкнутом контуре рециркуляции материала и управлении с обратной связью на основе MPC (Model Predictive Control – прогнозное управление моделью). Рециркуляция позволяет повторно анализировать и сортировать материал, что минимизирует количество ошибок. MPC, учитывая динамику системы, оптимизирует управление на основе прогноза, адаптируясь к изменениям в потоке материала.

Этот подход, хотя и не был применен непосредственно к сортировке зерна в данной работе, имеет большой потенциал для повышения точности сортировочных систем в сельском хозяйстве. Рециркуляция и управление с обратной связью могут быть особенно полезны для отделения трудноотделимых примесей или для сортировки семян по нескольким критериям. Моделирование DEM-CFD, использованное авторами, позволяет детально изучить поведение частиц материала и оптимизировать параметры системы.

В отличие от методов, фокусирующихся на улучшении алгоритмов классификации, подход направлен на оптимизацию самого процесса сортировки. Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию этого подхода к конкретным задачам сортировки зерна и на сравнение его эффективности с другими методами повышения точности.

Оценка зрелости семян

Оценка зрелости семян является критически важным фактором для определения посевных качеств и, следовательно, для повышения урожайности. Традиционные методы, основанные на визуальном осмотре, субъективны и трудоемки. Автоматизация этого процесса с использованием технического зрения позволяет получить объективные и воспроизводимые результаты.

Для оценки зрелости семян в работе [6] был предложен комплексный подход, сочетающий высокоскоростную съемку линейными камерами с анализом флуоресценции хлорофилла. Ключевым преимуществом данного метода является использование флуоресценции, предоставляющей информацию о внутренних биохимических изменениях в семени, коррелирующих со степенью зрелости. В отличие от методов, основанных только на анализе внешних признаков, таких как цвет или размер, анализ флуоресценции хлорофилла дает более объективную и надежную оценку, поскольку менее подвержен влиянию внешних факторов.

Высокоскоростная съемка линейными камерами обеспечивает необходимую пропускную способность для сортировки в реальном времени. Применение CNN с механизмами остаточного обучения и внимания позволило достичь высокой точности классификации (96 %) при скорости сортировки свыше 50 частиц в секунду. Эта высокая производительность и точность имеют прямое практическое значение для сельского хозяйства, позволяя автоматизировать отбор наиболее зрелых и жизнеспособных семян для посева, что способствует повышению урожайности и снижению потерь. Однородность зрелости посевного материала обеспечивает равномерные всходы и развитие растений.

Данный метод демонстрирует высокую эффективность, но требует использования специального оборудования для анализа флуоресценции. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию параметров съемки и обработки данных для снижения стоимости и сложности системы, а также на изучение влияния различных факторов на характеристики флуоресценции для создания более универсальных моделей.

Быстрая сортировка и обнаружение объектов

Для промышленного применения сортировочных систем критически важна высокая скорость обработки.

В работе [7] был разработан сортировщик на основе машинного зрения, использующий алгоритм YOLOv5n. Благодаря своей архитектуре YOLOv5n обеспечивает высокую скорость обработки изображений, что необходимо для сортировки в реальном времени.

Применение YOLOv5n для сортировки семян позволяет достичь высокой пропускной способности системы, что особенно важно для обработки больших объемов зерна. Выбор между YOLOv5n и другими алгоритмами обнаружения объектов (например, RetinaNet и Faster R-CNN, исследованными Bello) зависит от компромисса между скоростью и точностью. YOLOv5n обеспечивает более высокую скорость, но может уступать в точности более сложным моделям, таким как Faster R-CNN.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию YOLOv5n для конкретных задач сортировки зерна, а также на сравнение его с другими алгоритмами обнаружения объектов с учетом таких факторов, как скорость, точность, вычислительные ресурсы и устойчивость к различным условиям освещения.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку более сложных моделей машинного обучения, способных учитывать широкий спектр параметров качества и методы выявления скрытых дефектов зерна, которые невозможно обнаружить визуально.

Заключение

Хотелось бы выделить несколько перспективных направлений для дальнейших исследований:

- оптимизация алгоритмов глубокого обучения: дальнейшее развитие и адаптация алгоритмов глубокого обучения, таких как CNN и YOLO, для задач сортировки зерна, включая оптимизацию для работы на маломощных устройствах (например, мобильных платформах или встроенных системах), позволит создавать более доступные и эффективные системы. Исследования в области облегченных архитектур и методов квантования моделей могут быть особенно перспективными;

- создание специализированных баз данных: создание больших и размеченных баз данных изображений и спектральных данных различных сортов зерновых культур, содержащих информацию о различных дефектах и характеристиках качества, необходимо для обучения и тестирования алгоритмов машинного обучения. Необходимо разработать стандартизованные протоколы сбора данных и разметки, чтобы обеспечить сопоставимость результатов разных исследований;
- разработка методов выявления скрытых дефектов: исследования, направленные на разработку методов выявления скрытых дефектов зерна (например, внутренние повреждения, заражения), невидимых в видимом диапазоне, с использованием мультиспектрального анализа, гиперспектральной визуализации, методов томографии или других передовых методов, представляют большой интерес;
- разработка интеллектуальных систем управления: исследования, направленные на разработку интеллектуальных систем управления сортировочным процессом, учитывающих динамику потока материала, характеристики сортируемых семян, внешние условия и другие факторы, позволят создать полностью автоматизированные и высокоэффективные сортировочные комплексы. Применение методов машинного обучения для оптимизации параметров управления в реальном времени может значительно повысить производительность и точность сортировки.

Библиография

1. Стукалова А.В., Ямпилев С.С. Анализ поступающего зерна за 2021–2022 гг. в Республике Бурятия // Материалы нац. науч.-практ. конф. «Образование и наука», посвящ. празднованию 50-летия начала строительства Байкало-Амурской магистрали. Серия: Технологии и технические средства в АПК. Биомедицинская техника. – Улан-Удэ, 2024. – Вып. 18. – С. 63–70.
2. Ямпилев С.С., Нехуров Н.А., Балданов В.Б. и др. Производство зерновых культур в Республике Бурятия: анализ динамики за 2012–2023 годы // Научный альманах. – 2024. – № 9–3. – С. 54–58.
3. Fawakherji M., Potena C., Pretto A. et al. Hyperspectral image segmentation using deep learning techniques for precision agriculture // Robotics and Autonomous Systems. – 2021. – Vol. 146. – Art. 103861. – DOI: 10.1016/j.robot.2021.103861.
4. Merzougui G., Boulelouah N., Mokhtari A. et al. Improving the Approval Process for Durum Wheat Grain Quality in Algeria Using Computer Vision and Machine Learning // Ingénierie des systèmes d'information. – 2024. – Vol. 29, N 1. – P. 279–291. – DOI: 10.18280/isi.290128.
5. Vieth J., Reith-Braun M., Bauer A. et al. Improving Accuracy of Optical Sorters Using Closed-Loop Control of Material Recirculation // 2023 American Control Conference (ACC), San Francisco, CA, USA, May 31 – June 2, 2023. – DOI: 10.23919/ACC55779.2023.10156014.
6. Zhang Y., Yu L., Zhang S. A rapid detection and sorting system for seed maturity // Journal of Physics: Conference Series: Proceedings of the 4th International Conference on Artificial Intelligence Technologies and Applications (ICAITA 2022), Changchun, China, August 18–21, 2022. – 2022. – Vol. 2400. – Art. 012001. – DOI: 10.1088/1742-6596/2400/1/012001.
7. Feng Y., Zhao X., Tian R. et al. Research on an Intelligent Seed-Sorting Method and Sorter Based on Machine Vision and Lightweight YOLOv5n // Agronomy. – 2024. – Vol. 14, N 9. – Art. 1953. – DOI: 10.3390/agronomy14091953.
8. Islam T., Sarker T.T., Ahmed K.R. et al. Detection and Classification of Cannabis Seeds Using RetinaNet and Faster R-CNN // Seeds. – 2024. – Vol. 3, N 3. – P. 456–478. – DOI: 10.3390/seeds3030031.
9. Velesaca H.O., Suárez P.L., Mira R. et al. Computer vision based food grain classification: A comprehensive survey // Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – Vol. 187. – Art. 106287. – DOI: 10.1016/j.compag.2021.106287.
10. Иванов А.М., Шаронова Т.В., Иванов Д.В. Фотосепараторы для зерна // Студенческая наука – первый шаг в академическую науку: материалы всерос. студ. науч.-практ. конф. с участием школьников 10–11 классов, Чебоксары, 14–15 марта 2018 г. Ч. 2. – Чебоксары: Изд-во Чувашской гос. с.-х. академии, 2018. – С. 78–81.

11. *Мекишун Ю.Н., Овчинников Д.Н., Новикова В.А. и др.* Применение фотосепаратора при выделении трудноотделимых примесей // Приоритетные направления развития энергетики в АПК: материалы I Всерос. науч.-практ. конф., Лесниково, 28 сентября 2017 г. – Лесниково: Изд-во Курганской гос. с.-х. академии им. Т.С. Мальцева, 2017. – С. 79–82.
12. *Лерке В.В., Надвоцкая В.В.* Анализ технических характеристик фотосепараторов для технического переоснащения технологической линии. Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем // Материалы всерос. молодеж. науч.-практ. конф., г. Барнаул, 22 ноября 2019 г. / под ред. А.Г. Якунина. – Барнаул: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2019. – С. 17–20.
13. *Тищенко А.И.* Повышение качества сыпучих зерновых продуктов на основе разработки и применения многокритериальных фотоэлектронных сепараторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А.И. Тищенко. – Барнаул, 2000. – 304 с.
14. Патент RU №2468872. В07С 5/342 Устройство для сортировки зерна / Ямпиров С.С. Цыдыпов Ц.Ц., Жигжитов А.О. // Патентообладатели: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». – Заявка № 2011144345, заявл. 1. 11. 2011, опубл. 10.12.2012.
15. *Ямпиров С.С., Батуева С.В., Хандакова Г.Ж. и др.* Разработка программного обеспечения сепаратора для очистки зерна // Вестник ИрГСХА. – 2017. – Вып. 81. – С. 171–178.
16. *Ямпиров С.С., Нехуров Н.А., Цыбенков Ж.Б. и др.* Математическая модель движения частиц зернового материала по лотку сепаратора с использованием технического зрения // Вестник ВСГУТУ. – 2024. – № 4. – С. 69–74.
17. *Ямпиров С.С., Цыбенков Ж.Б., Жигжитов А.О. и др.* Теоретическое описание процесса разделения частиц зернового материала // Вестник ВСГУТУ. – 2022. – Вып. 4. – С. 40–44.
18. *Мяснянкин К.В.* Совершенствование технологического процесса подготовки семян гречихи с применением фотосепаратора: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Воронеж, 2020. – С. 20.
19. *Лебедев Д.В.* Параметры процесса распознавания семян люцерны в семенном материале высочайшим оптико-электронным способом: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Краснодар, 2006. – С. 21.

Bibliography

1. *Stukalova A.V., Yampilov S.S.* Analysis of incoming grain for 2021–2022 in the Republic of Buryatia Proceedings of the National Scientific and Practical Conference «Education and Science» commemorating the 50th anniversary of the Baikal-Amur Mainline construction. Series: Technologies and technical means in AIC. Biomedical engineering. – Iss. 18. –P. 63–70.
2. *Yampilov S.S., Nekhurov N.A., Baldanov V.B. et al.* Production of grain crops in the Republic of Buryatia: dynamics analysis for 2012–2023 // Science Almanac. – 2024. – N 9–3. – P. 54–58.
3. *Fawakherji M., Potena C., Preto A. et al.* Hyperspectral image segmentation using deep learning techniques for precision agriculture // Robotics and Autonomous Systems, 2021. – Vol. 146. – Art. 103861. – DOI: 10.1016/j.robot.2021.103861.
4. *Merzougui G., Boulelouah N., Mokhtari A. et al.* Improving the Approval Process for Durum Wheat Grain Quality in Algeria Using Computer Vision and Machine Learning // Ingénierie des systèmes d'information. – 2024. – Vol. 29, N 1. – P. 279–291. – DOI: 10.18280/isi.290128.
5. *Vieth J., Reith-Braun M., Bauer A. et al.* Improving Accuracy of Optical Sorters Using Closed-Loop Control of Material Recirculation // 2023 American Control Conference (ACC), San Francisco, CA, USA, May 31 – June 2, 2023. – DOI: 10.23919/ACC55779.2023.10156014.
6. *Zhang Y., Yu L., Zhang S.* A rapid detection and sorting system for seed maturity // Journal of Physics: Conference Series: Proceedings of the 4th International Conference on Artificial Intelligence Technologies and Applications (ICAITA 2022), Changchun, China, August 18–21, 2022. – Vol. 2400. – Art. 012001. – DOI: 10.1088/1742-6596/2400/1/012001.
7. *Feng Y., Zhao X., Tian R. et al.* Research on an Intelligent Seed-Sorting Method and Sorter Based on Machine Vision and Lightweight YOLOv5n // Agronomy, 2024. – Vol. 14, N 9. – Art. 1953. – DOI: 10.3390/agronomy14091953.
8. *Islam T., Sarker T.T., Ahmed K.R. et al.* Detection and Classification of Cannabis Seeds Using RetinaNet and Faster R-CNN // Seeds. – 2024. – Vol. 3, N 3. – P. 456–478. – DOI: 10.3390/seeds3030031.

9. *Velesaca H.O., Suárez P.L., Mira R. et al.* Computer vision based food grain classification: A comprehensive survey // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2021. – Vol. 187. – Art. 106287. – DOI: 10.1016/j.compag.2021.106287.
10. *Ivanov A.M., Sharonova T.V., Ivanov D.V.* Photoseparators for grain // *Student science as the first step into academic science: Proceedings of the All-Russian student scientific and practical conference with participation of schoolchildren of grades 10–11, Cheboksary, March 14–15, 2018. Part 2.* – Cheboksary: Chuvash State Agricultural Academy, 2018. – P. 78–81.
11. *Mekshun Yu.N., Ovchinnikov D.N., Novikova V.A. et al.* Use of a photoseparator in separation of hard-separable impurities // *Priority areas of energy development in AIC: Proceedings of the 1st All-Russian scientific and practical conference, Lesnikovo, September 28, 2017.* – Lesnikovo: Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev, 2017. – P. 79–82.
12. *Lerke V.V., Nadvotskaya V.V.* Analysis of technical characteristics of photoseparators for technical re-equipment of a technological line. Software and hardware support for automated systems: *Proceedings of the All-Russian youth scientific and practical conference, Barnaul, November 22, 2019 / Edited by A.G. Yakunin.* – Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 2019. – P. 17–20.
13. *Tishchenko A.I.* Improving the quality of bulk grain products based on the development and use of multi-criteria photoelectronic separators: diss. ... Cand. Sc. Engineering (05.20.02). – Barnaul, 2000. – 304 p.
14. Patent RU №2468872. B07C 5/342 Grain sorting device./*Yampilov S.S., Tsydyrov Ts.Ts., Zhigzhitov A.O.* // Patent holders: Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «East Siberian State University of Technology and Management». – Application N 2011144345, appl. 1.11.2011, publ. 10.12.2012.
15. *Yampilov S.S. Batueva S.V., Khandakova G.Zh. et al.* Development of software for a grain cleaning separator // *Vestnik IrGSHA.* – 2017. – Iss. 81. – P. 171–178.
16. *Yampilov S.S. Nekhurov N.A., Tsybenov Zh.B. et al.* Mathematical model of grain material particles movement along separator tray using machine vision // *ESSUTM Bulletin.* – 2024. – N 4. – P. 69–74.
17. *Yampilov S.S., Tsybenov Zh.B., Zhigzhitov A.O. et al.* Theoretical description of separation process of grain material particles // *ESSUTM Bulletin.* – 2022. – N 4. – P. 40–44.
18. *Myasnyankin K.V.* Improving technological process of preparing buckwheat seeds using a photoseparator: abstracts for diss. ... Cand. Sc Engineering. – Voronezh, 2020. – 20 p.
19. *Lebedev D.V.* Parameters of alfalfa seeds recognizing process in seed material using high-altitude optical-electronic method: abstracts for diss. ... Cand Sc Engineering. – Krasnodar, 2006. – 21 p.

2.1.5 – СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

DOI 10.53980/24131997_2025_1_81

Н.П. Лукутцова¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: natluk58@mail.ru

Е.Г. Карпиков¹, ст. преподаватель, e-mail: johnjk@mail.ru

Н.К. Романов², обучающийся, e-mail: niknikromanoff@yandex.ru

¹ Брянский государственный инженерно-технологический университет

² Детский технопарк «Кванториум»

г. Брянск

УДК 661.728.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ
ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО МОДИФИКАТОРА
НА ОСНОВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ**

Методами вискозиметрического определения изменения кинематической вязкости медно-аммиачного раствора и йодометрического титрования установлена степень полимеризации целлюлозного сырья, фабричной микрокристаллической целлюлозы и высокодисперсной целлюлозы, полученной в лабораторных условиях при помощи окислительной деструкции, воздействие которой основано на кратковременном образовании в реакционной смеси гидроксильных радикалов ($\bullet\text{OH}$), и заключающейся в обработке на протяжении 60 мин измельченной фильтровальной бумаги ледяной уксусной кислотой в присутствии раствора пероксида водорода и сульфата меди (II) при температуре 115 °С. Выявлены приоритетные направления применения указанных методов с точки зрения влияния показателя на результаты анализа, а также эффективности протекания гетерогенной реакции окисления альдегидных групп в условиях высокой дисперсности. Отмечена их референтность для области строительного материаловедения в контексте доступности воспроизведения и простоты анализа при достаточной надежности и точности измерений, что подтверждается данными относительного расхождения, не превышающими 5 %. В результате исследований показано, что степень полимеризации микрокристаллической целлюлозы и гидрозоля высокодисперсной целлюлозы относительно наименее растворимого хлопкового сырья ниже в 7 и 40 раз соответственно, что показывает эффективность выбранного решения и может служить показателем интенсивности физической и химической деструкции волокон в процессе производства микро- и наноцеллюлозы.

Ключевые слова: высокодисперсная целлюлоза, степень полимеризации, строительные композиты, вискозиметрия, йодометрия.

N.P. Lukutsova¹, Dr. Sc. Engineering, Prof.

E.G. Karpikov¹, Senior Lecturer

N.K. Romanov², student

¹ Bryansk State Technological University of Engineering

² Children's Technopark "Kvantorium"

Bryansk

**INVESTIGATION OF POLYMERIZATION DEGREE OF HIGHLY DISPERSED
CELLULOSE-BASED MODIFIER FOR CONSTRUCTION COMPOSITES**

The present article established the degree of cellulose raw material polymerization, factory microcrystalline cellulose and highly dispersed cellulose obtained under laboratory conditions by oxidative degradation, employing methods of viscometric determination of changes in the kinematic viscosity of a copper-ammonia solution and iodometric titration. The effect of oxidative degradation is based on short-term formation of hydroxyl radicals ($\bullet\text{OH}$) in reaction mixture, and consists of processing of crushed filter paper with glacial acetic acid for 60 minutes in the presence of hydrogen peroxide solution and copper (II) sulfate at

temperature of 115 ° C. The application priority areas of these methods have been identified in terms of indicator effect on analysis results, as well as the heterogeneous oxidation reaction effectiveness of aldehyde groups under conditions of high dispersion. Their reference value for construction materials science is focused in the context of reproduction availability and ease of analysis alongside with sufficient reliability and accuracy of measurements, which is confirmed by the data of a relative discrepancy not exceeding 5%. The research showed that polymerization degree of microcrystalline cellulose and hydrosol of highly dispersed cellulose being relative to the least soluble cotton raw materials is 7 and 40 times lower, respectively. It demonstrates the effectiveness of the chosen solution and can serve as intensity indicator of physical and chemical destruction of fibers during micro- and nanocellulose production.

Key words: *highly dispersed cellulose, polymerization degree, construction composites, viscometry, iodometry.*

Введение

Процесс развития современного материаловедения обуславливает необходимость разработки, изучения и внедрения в производство новейших материалов с заданными характеристиками, предназначенных для различных отраслей строительства [1–3]. В последние годы перспективным направлением в этой области становится модификация структуры и свойств строительных композитов при помощи микро- и наноцеллюлозы, яркой особенностью которой является ее псевдопластичность – способность находиться в вязком состоянии в обычных условиях, проявлять свойства жидкости при механическом воздействии и демонстрировать высокую прочность в твердом виде, что применимо при получении различных полифункциональных материалов, реологических модификаторов цементных растворов, биоразлагаемых полимеров, загустителей, стабилизаторов красок, эмульсий и т. д. [4–6].

Наноцеллюлоза – высокодисперсный материал, изготавливаемый из целлюлозосодержащего сырья природного происхождения. Она обладает рядом ценных свойств, из которых наиболее важными считаются прочность и гигроскопичность, при этом является экологичным и биологически безопасным веществом [7, 8]. Для получения микро- и наночастиц целлюлозы требуется использование высококачественного сырья, вместе с тем среди наиболее важных параметров выделяется средняя степень полимеризации (СП) [9]. От степени полимеризации высокомолекулярного соединения зависят его агрегатное состояние, температура плавления, плотность, растворимость, твердость либо вязкость и др. СП оказывает влияние на размерные показатели частиц [10], а также их прочностные характеристики [11], имеющие ключевое значение для обеспечения широких перспектив применения материала и решения различных промышленных и исследовательских задач [12].

В последнее десятилетие значительный интерес привлекают перспективы наноструктурной модификации вяжущих и конструкционных строительных материалов высокодисперсной целлюлозой (ВДЦ) [13], в том числе благодаря широким возможностям химической модификации поверхности наноцеллюлозы с получением продуктов различной степени гидрофильности [14, 15]. Результаты внедрения ВДЦ различной структуры в строительные материалы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты модификации строительных материалов высокодисперсной целлюлозой

Материал	Модификатор	Эффект модификации
Сверхпрочный бетон (UHPC)	Нанокристаллическая целлюлоза (CNC) [16]	Значительное снижение усадки Ускорение гидратации, в том числе в горячей и соленой воде
Портландцемент	Нанофибриллированная целлюлоза (CNF) [17]	Повышение прочности на изгиб на 20 % Увеличение степени гидратации
	Нанокристаллическая целлюлоза [18]	Повышение прочности на сжатие Снижение термической усадки
	Бактериальная наноцеллюлоза (BNC) [19]	Самовосстановление цемента – до 15 % объема трещин

Как известно, целлюлоза относится к группе линейных гомополимеров, обладающих одинаковыми звеньями и связями, поэтому размер ее молекулы находится в прямой зависимости от величины СП [20], которая, в свою очередь, с большой степенью точности описывает уровень деструкции вследствие воздействия на стадии ее получения процессов химической, физической или биологической природы [21]. Изучение степени полимеризации исходного сырья, пригодного для изготовления высокодисперсной целлюлозы, является актуальной задачей в области снижения затрат на ее промышленное производство [22, 23] посредством оптимизации расхода энергетических ресурсов в результате измельчения целлюлозосодержащего сырья. Изменение СП целлюлозы в ходе технологической обработки также может служить показателем физико-химической эффективности отдельного метода получения микро- и наноцеллюлозы [24–26].

К настоящему времени известно ограниченное число доступных для реализации в стандартных лабораторных условиях, без применения сложного оборудования и дорогостоящих реактивов, методов, позволяющих определить среднюю степень полимеризации целлюлозы. В то же время различные подходы в измерении СП при сравнении зачастую демонстрируют достаточно высокую погрешность [3], в связи с чем могут рассматриваться как относительные.

Целью работы является исследование методами вискозиметрического и йодометрического определения степени полимеризации целлюлозного сырья, фабричной микрокристаллической целлюлозы и высокодисперсной целлюлозы, полученной в лабораторных условиях, а также оценка относительного расхождения между результатами анализа для обеспечения формирования методологической основы в области разработки высокодисперсных целлюлозосодержащих модификаторов строительных композитов.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья для изготовления высокодисперсной целлюлозы [11] использовали «Бумагу фильтровальную Ф» (БФ) для общелaborаторных работ и фильтров «Белая лента» ГОСТ 12026 (г. Москва, Российская Федерация), а также вату медицинскую гигроскопическую хлопковую (далее – ВМГХ) ГОСТ 5556 (г. Спас-Клепики, Клепиковский район, Рязанская область, Российская Федерация).

Золь ВДЦ получали методом окислительной деструкции, заключающимся в обработке на протяжении 60 мин измельченной БФ в среде ледяной уксусной кислоты ($\text{CH}_3\text{COOH}_{\text{конц}}$) в присутствии раствора пероксида водорода (H_2O_2) и сульфата меди (II) (CuSO_4) при температуре 115 °С, воздействие которой на целлюлозосодержащее сырье основано на кратковременном образовании в реакционной смеси гидроксильных радикалов ($\bullet\text{OH}$) [27].

Для уточнения результатов анализа использовалась фабричная микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ) «Анكير-Б» (г. Бийск, Алтайский край, Российская Федерация).

В настоящее время известно несколько методов определения степени полимеризации целлюлозы. К ним относятся вискозиметрический, основанный на измерении динамической вязкости растворов целлюлозы в медноаммиачном комплексном соединении ($[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4(\text{H}_2\text{O})_2](\text{OH})_2$) [28], этилендиаминмеди ($[\text{Cu}(\text{en})_2(\text{H}_2\text{O})_2](\text{OH})_2$) [11], кадмиевом комплексном соединении кадоксене ($[\text{Cd}(\text{en})_3](\text{OH})_2$) [29], эксклюзионно-хроматографический (SEC) [22], а также методы, базирующиеся на определении содержания восстанавливающих концевых альдегидных групп целлюлозы, например спектрофотометрический с использованием бицинониновой кислоты (BCA) [30], йодометрический [25, 31]. При этом среди наиболее референтных для области разработки высокодисперсных целлюлозосодержащих модификаторов строительных материалов можно выделить вискозиметрический и йодометрический по причине доступности их применения в стандартных лабораторных условиях и простоте анализа при достаточной надежности и точности измерений [29, 31].

Вискозиметрическое определение средней степени полимеризации целлюлозы заключается в оценке изменения кинематической вязкости медно-аммиачного раствора (МАР) при

растворении в нем целлюлозосодержащего сырья в соответствии с ГОСТ 9105. Для этого готовили медно-аммиачный раствор с концентрацией аммиака 200 г/дм³, меди – 13 г/дм³ и сахарозы – 2 г/дм³. Стандартизация медно-аммиачного раствора выполнена в соответствии с пунктом 4 ГОСТ 14363.2. Влажность образцов устанавливали методом термогравиметрической сушки при температуре 105 °С [32].

В качестве сравнительного метода исследования среднечисловой молекулярной массы и СП применяли йодометрическое титрование [25], основанное на изменении йодного числа целлюлозосодержащего образца, т. е. эквивалентного количества элементарного йода, доступного для восстановления альдегидными группами, присутствующими на концах макромолекул целлюлозы.

Результаты исследования и их обсуждение

Для реализации вискозиметрического метода был приготовлен исходный медно-аммиачный раствор на основе коллоидного раствора свежесажженного гидроксида меди (Cu(OH)₂) в аммиаке (NH₃·H₂O). Гидроксид меди (II) был получен ионообменной реакцией пентагидрата сульфата меди (II) с избытком гидроксида натрия (NaOH) и очищен многократным промыванием дистиллированной водой и центрифугированием с целью удаления водорастворимых примесей-электролитов, препятствующих растворению целлюлозы [33].

Стандартизация медно-аммиачного раствора относительно содержания меди (II) производилась йодометрическим способом, обладающим подтвержденной высокой точностью и надежностью [34]. В качестве восстановителя был использован раствор тиосульфата натрия (Na₂S₂O₃), концентрация которого составляла 76,151±0,690 ммоль/дм³ согласно результатам стандартизации по раствору дихромата калия (K₂Cr₂O₇) концентрацией 27,642±0,041 ммоль/дм³. Окислителем выступал 0,1 н раствор йода (I₂) с концентрацией 100,00±0,25 ммоль/дм³ в избытке йодида калия (KI). Посредством окислительно-восстановительного титрования было определено содержание меди, равное 13,13±0,10 г/дм³. Методом кислотно-основного титрования 0,1 М раствором серной кислоты (H₂SO₄) в присутствии метиленового оранжевого, выполненного с учетом концентрации ионов меди (Cu²⁺) в растворе, установлена концентрация аммиака 13,13±0,10 г/дм³. Таким образом, изготовленный МАР соответствует требованиям ГОСТ 9105.

Капиллярный вискозиметр (ВПЖ-2 0,34) заполняли стандартизированным медно-аммиачным раствором и измеряли время его свободного истечения. При двух параллельных анализах искомое время t₀ составляло 340,1±0,9 с. Затем в МАР объемом 50 см³ помещали навески БФ массой G_б = 0,0534 г и ВМГХ G_в = 0,0216 г, добавляли 15 г металлической меди при температуре 20,2 °С. Массовую концентрацию целлюлозы в растворе C, г/дм³ вычисляли согласно уравнению (1) с учетом влажности образцов 6,29 % для бумаги и 6,23 % – для ваты, найденной методом термогравиметрии.

$$C = \frac{G \cdot (1 - \omega)}{V}, \quad (1)$$

где G – масса навески целлюлозы, г; ω – влажность образца, д. ед.; V – объем раствора, дм³.

Растворы с навесками перемешивали в течение 30 мин на магнитной мешалке, при этом бумага растворялась полностью, в то время как вата лишь частично, предположительно, из-за присутствия в ней нерастворимых примесей. Нерастворенную часть ваты извлекали из реактива, промывали дистиллированной водой и сушили при температуре 100 °С до постоянной массы, которая составляла 0,0127 г. В результате было выявлено, что истинная масса G_в = 0,0089 г, что ниже необходимой для получения наименьшей концентрации 0,75 г/дм³, указанной в п. 3.3 ГОСТ 9105, однако стоит отметить, что данный параметр носит рекомендательный характер. Таким образом, массовые концентрации целлюлозы в исследуемых растворах установлены как 0,7500 г/дм³ – для БФ и 0,1669 г/дм³ – для ВМГХ.

Растворы образцов исходного сырья с известной концентрацией также помещали в вискозиметр и измеряли время их истечения, соответствующее $486,2 \pm 1,3$ с – БФ и $417,2 \pm 2,8$ с – ВМГХ, в двух параллельных испытаниях.

В качестве образцов высокодисперсной целлюлозы использовали гидрозоль ВДЦ массой $0,5008$ г, изготовленный методом окислительной деструкции, с массовой долей целлюлозы $8,31$ % и фабричную микрокристаллическую целлюлозу «Анкир-Б» массой $0,0583$ с влажностью $13,79$ %, которые аналогичным образом растворяли в МАР. В результате были получены следующие данные о длительности свободного истечения растворов через капилляр вискозиметра: $423,1 \pm 3,5$ с – МКЦ и $349,8 \pm 0,5$ с – золь ВДЦ.

Среднюю степень полимеризации рассчитывали по общей формуле, выраженной из уравнений (1–3) п. 5 ГОСТ 9105.

$$СП = \frac{t_1/t_0 - 1}{K_m \cdot C \cdot \left(1 + K' \cdot \left(t_1/t_0 - 1\right)\right)}, \quad (2)$$

где t_1 – время истечения раствора между верхней и нижней метками вискозиметра, с; t_0 – время истечения растворителя, с; K_m – вязкостно-молекулярная константа медно-аммиачных растворов целлюлозы, $5 \cdot 10^{-4}$; C – концентрация целлюлозы в растворе, г/дм³; K' – константа, равная для медно-аммиачных растворов целлюлозы $0,29$.

Результаты вискозиметрии исходного целлюлозосодержащего сырья, а также образцов высокодисперсной целлюлозы, полученных в лабораторных и промышленных условиях, представлены в таблице 2.

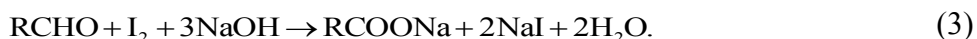
Таблица 2

Результаты определения степени полимеризации целлюлозосодержащих образцов методом вискозиметрии

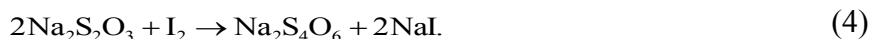
Наименование	Средняя степень полимеризации СП			Относительное расхождение результатов параллельных измерений г, %
	серия 1	серия 2	среднее значение (округлено по ГОСТ 9105)	
ВМГХ	2462,9	2634,7	2640	3,37
БФ	1010,6	1026,2	1020	0,77
МКЦ	435,5	470,7	450	3,88
Гидрозоль ВДЦ	64,2	70,6	70	4,75

Расхождение показателей параллельных определений удовлетворяло требованиям п. 5 ГОСТ 9105 и составляло не более 4 %, при этом необходимо отметить, что определение СП лабораторного золь ВДЦ было сопряжено с большей погрешностью, так как искомая величина была значительно ниже рекомендованного стандартом минимального значения в размере 450 .

Для сопоставления результатов в работе было выполнено исследование степени полимеризации целлюлозы методом йодометрического титрования. Общая схема реакции для молекулы альдегидной группы описывается следующим уравнением:



В процессе анализа избыток йода титровали стандартизированным раствором тиосульфата натрия



Метод был реализован следующим образом: две навески образца известной влажности вносились в конические колбы для титрования, к ним прибавлялось 5 см^3 $0,1$ н раствора йода,

10 см³ 4 н раствора гидроксида натрия и дистиллированная вода, после чего образцы перемешивали и отстаивали в течение 4 ч при комнатных условиях без доступа света. Растворами сравнения выступали смеси, содержащие 10,0 см³ NaOH и 5,00 см³ йода. По окончании отстаивания добавляли 10 см³ 25 % раствора серной кислоты и выполняли титрование стандартизованным Na₂S₂O₃ концентрацией 91,7355±0,0839 ммоль/дм³ в присутствии 0,5 % коллоидного раствора крахмала. СП целлюлозы устанавливалась по формуле (5):

$$СП = \frac{2m(1 - \omega)}{MCC_0(V_0 - V)}, \quad (5)$$

где 2 – переводной коэффициент, основанный на стехиометрии реакций (3), (4); m – масса навески (золя), г; ω – влажность образца, д. ед.; M – молярная масса элементарного звена целлюлозы, 162,1424 г/моль; C – концентрация тиосульфата натрия, моль/дм³; V – объем раствора тиосульфата натрия, пошедшего на титрование образца, дм³; V₀ – объем раствора тиосульфата натрия, пошедшего на титрование холостой пробы, дм³; C₀ – эквивалентная концентрация раствора йода, 0,1 н.

Результаты определения СП целлюлозосодержащих образцов методом йодометрии приведены в таблице 3.

Согласно полученным данным, относительное расхождение между результатами параллельных измерений не превышало 4 % для целлюлозосодержащего сырья и МКЦ и незначительно превышало 5 % для гидрозоля наноцеллюлозы.

Таблица 3

Результаты определения степени полимеризации целлюлозосодержащих образцов методом йодометрии

Наименование	Средняя степень полимеризации СП			Относительное расхождение результатов параллельных измерений γ, %
	серия 1	серия 2	среднее значение	
ВМГХ	2627,1	2804,0	2715,6	3,26
БФ	1025,2	1091,6	1058,4	3,14
МКЦ	399,2	423,4	411,3	2,94
Гидрозоль ВДЦ	67,3	74,5	70,9	5,08

Таким образом, установлено, что вискозиметрический и йодометрический методы показывают схожие результаты при оценке как макроскопических целлюлозосодержащих образцов, так и высокодисперсной целлюлозы, при этом расхождение между ними составляет порядка 3 %. Сравнительный анализ результатов работы приведен в таблице 4.

Таблица 4

Сравнительный анализ результатов

Наименование	Средняя степень полимеризации СП		Относительное расхождение между методами δ, %
	йодометрический метод	вискозиметрический метод	
ВМГХ	2715,6±88,5	2548,8±85,9	3,17
БФ	1058,4±33,2	1018,4±7,8	1,93
МКЦ	411,4±11,2	453,1±17,6	4,82
Гидрозоль ВДЦ	70,9±3,6	67,4±3,2	2,53

Необходимо отметить, что с практической точки зрения применение вискозиметрического метода предпочтительно для определения степени полимеризации целлюлозосодержащего сырья, так как обеспечивает при наиболее полном его растворении в медно-аммиачном растворе значительный уровень влияния показателя СП на получаемые результаты. С другой

стороны, для измерения степени полимеризации ВДЦ более приоритетным является метод йодометрии, так как в условиях высокой дисперсности гетерогенная реакция окисления альдегидных групп протекает наиболее эффективно.

Заключение

В результате исследований установлено, что средняя степень полимеризации целлюлозы, содержащейся в сырье растительного происхождения и в образцах ВДЦ убывает в ряду ВМГХ – БФ – МКЦ – Гидрозоль ВДЦ. При этом СП микрокристаллической целлюлозы меньше относительно ВМГХ в 6–7 раз, а гидрозоль ВДЦ – в 40 раз, что показывает значительное понижение анализируемой величины при физической и химической обработке целлюлозы, а также может служить показателем интенсивности деструкции ее волокон в процессе производства микро- и наноцеллюлозы, предназначенной, в частности, для модификации строительных композитов. Рассмотренные методики позволяют получать близкие по значениям результаты, а общее относительное расхождение между ними не превышает 5 %.

Библиография

1. Бадмаев Б.Б., Дамдинов Б.Б., Лайдабон Ч.С. Вязкоупругие свойства пропиточных растворов для пропитки строительных материалов // Вестник ВСГУТУ. – 2012. – № 1 (36). – С. 5–7.
2. Ильина О.В., Хахинов В.В., Урханова Л.А. Строительные полимерные материалы на основе полибензимидазолов // Вестник ВСГУТУ. – 2012. – № 1 (36). – С. 38–41.
3. Угляница А.В., Дуваров В.Б. О возможности модификации цементных бетонов отработанным катализатором производства анилина // Вестник ВСГУТУ. – 2019. – № 2 (73). – С. 43–51.
4. Картиков Е.Г., Романов Н.К., Лукутцова Н.П. Получение наночастиц целлюлозы и анализ их средних размеров методом спектрофотометрии // Актуальные вопросы техники, науки, технологии: материалы конф. – Брянск: Изд-во БГИТУ, 2023. – С. 640–643.
5. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Хирхасова В.И. Целлюлоза в бетоне: новое направление развития строительной нанотехнологии // Строительные материалы. – 2020. – № 9 (7). – С. 39–44.
6. Хирхасова В.И. Влияние наноцеллюлозы на процесс гидратации цемента и свойства бетона // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 5 (82). – С. 155–160.
7. Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Кулезнев А.С. и др. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор // Лесной вестник. – 2019. – Т. 23, № 5. – С. 116–125.
8. Трухин Г.О. Применения наноцеллюлозы в различных сферах, которые обеспечат экологическую безопасность // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2019. – № 6. – С. 40–43.
9. Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Валишина З.Т. и др. Получение, структура, свойства микрокристаллической и наноцеллюлозы из хлопка // Химическая промышленность сегодня. – 2019. – № 6. – С. 58–63.
10. Shinoda R. Relationship between length and degree of polymerization of TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils // Biomacromolecules. – 2012. – Vol. 13, N 3. – P. 842–849.
11. Fang Z. Critical role of degree of polymerization of cellulose in super-strong nanocellulose films // Matter. – 2020. – Vol. 2, No 4. – P. 1000–1014.
12. Moon R.J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites // Chemical Society Reviews. – 2011. – Vol. 40, N 7. – P. 3941–3994.
13. Szafraniec M. [et al.]. A critical review on modification methods of cement composites with nanocellulose and reaction conditions during nanocellulose production // Materials. – 2022. – Vol. 15, N 21. – P. 7706.
14. Tonoli G. H. D. [et al.]. Cellulose modified fibres in cement-based composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2009. – Vol. 40, N 12. – P. 2046–2053.
15. Ghasemlou M. [et al.]. Surface modifications of nanocellulose: From synthesis to high-performance nanocomposites // Progress in Polymer Science. – 2021. – Vol. 119. – P. 101418.
16. Cuenca E. [et al.]. Effects of alumina nanofibers and cellulose nanocrystals on durability and self-healing capacity of ultrahigh-performance fiber-reinforced concretes // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 34, N 8. – P. 04022154.

17. *Jiao L. [et al.]*. Natural cellulose nanofibers as sustainable enhancers in construction cement // *PLoS One*. – 2016. – Vol. 11, N 12. – P. 168422.
18. *Lee H. J. [et al.]*. A study on the drying shrinkage and mechanical properties of fiber reinforced cement composites using cellulose nanocrystals // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2019. – Vol. 13. – P. 1–11.
19. *Singh H., Gupta R.* Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – Vol. 28. – P. 101090.
20. *Быстрова Е.С.* Лабораторная методика определения молекулярной массы и степени полимеризации целлюлозы методом капиллярной вискозиметрии // *Лабораторные методики и технологические инструкции по практической консервации документов: сб. статей*. – СПб.: Российская национальная библиотека, 2019. – С. 225–234.
21. *Голубев Д.С., Гисматулина Ю.А., Гладышева Е.К. и др.* Степень полимеризации целлюлозы различного происхождения // *Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы конф.* – Барнаул: Изд-во АГУ, 2020. – С. 306–308.
22. *Зуйков А.А., Горячев Н.Л., Константинова С.А. и др.* Перспективы производства наноцеллюлозы в России и проблемы оценки ее качества // *Лесной комплекс в цифровой экономике: сб. тезисов*. – М.: Научные технологии, 2019. – С. 80–81.
23. *Петров А.В., Аверьянова Н.В., Гибадуллин М.Р. и др.* Композиционный материал на основе наноцеллюлозы // *Вестник Технологического университета*. – 2019. – Т. 22, № 5. – С. 72–75.
24. *Валишина З.Т., Шипина О.Т., Косточко А.В.* Моделирование процесса гидролиза целлюлозы // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – № 11. – С. 132–136.
25. *Гаврилова А.С., Манаенков О.В., Филатова А.Е.* Исследование влияния ультразвукового воздействия на микрокристаллическую целлюлозу // *Вестник ТвГТУ*. – 2015. – Т. 112, № 27, № 1. – С. 60–66.
26. *Фролова С.В., Демин В.А.* Деструкция древесной целлюлозы кислотами Льюиса с целью получения порошковой целлюлозы // *Журнал прикладной химии*. – 2008. – Т. 81, № 1. – С. 152–156.
27. Патент RU 2705957 C08B 15/00, B82B 3/00 Способ получения нанокристаллической целлюлозы с использованием Cu(II) катализатора / Торлопов М.А., Удоратина Е.В., Володин А.А. Патентообладатели: ФГБОУ науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук». – Заявка № 2019118607, заявл. 15.06.2019, опубл. 12.11.2019.
28. *Neale S.M., Waite R.* The viscosity of cellulose and its nitrate in dilute solution // *Transactions of the Faraday Society*. – 1941. – Vol. 37. – P. 261–271.
29. *Dupont A.L., Mortha G.* Comparative evaluation of size-exclusion chromatography and viscometry for the characterisation of cellulose // *Journal of Chromatography A*. – 2004. – Vol. 1026, N 1–2. – P. 129–141.
30. *Kongruang S.* Quantitative analysis of cellulose-reducing ends // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2004. – Vol. 113. – P. 213–231.
31. *Зайцева Л.А., Волкова А.В., Миневич И.Э.* Получение целлюлозного продукта из конопляной лузги // *Ползуновский вестник*. – 2023. – № 2. – С. 174–183.
32. *Ramiah M.V.* Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin // *Journal of applied polymer science*. – 1970. – Vol. 14, N 5. – P. 1323–1337.
33. *Роговин З.А.* Основы химии и технологии химических волокон. Т. 2. Производство искусственных волокон. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1974. – 344 с.
34. *Meites L.* Idometric Determination of Copper // *Analytical Chemistry*. – 1952. – Vol. 24, N 10. – P. 1618–1620.

Bibliography

1. *Badmaev B.B., Damdinov B.B., Laidabon Ch.S.* Viscoelastic properties of impregnating solutions for impregnation of building materials // *ESSUTM Bulletin*. – 2012. – N 1(36). – P. 5–7.
2. *Ирина О.В., Khakhinov V.V., Urkhanova L.A.* Building of polymer materials based on polybenzimidazoles // *ESSUTM Bulletin*. – 2012. – N 1 (36). – P. 38–41.
3. *Ugilyanitsa A.V., Duvarov V.B.* On the possibility of modifying cement concrete by spent catalyst for aniline production // *ESSUTM Bulletin*. – 2019. – N 2 (73). – P. 43–51.
4. *Karpikov E.G., Romanov N.K., Lukutsova N.P.* Preparation of cellulose nanoparticles and analysis of their average sizes by spectrophotometry // *Actual issues of technology, science, technology: conference materials*. – Bryansk: BSTUE, 2023. – P. 640–643.

5. Pukharensko Yu.V., Aubakirova I.U., Khirkhasova V.I. Cellulose in concrete: a new direction of construction nanotechnology development // Construction materials. – 2020. – N 9 (7). – P. 39–44.
6. Khirkhasova V.I. Influence of nanocellulose on the hydration process of portland cement and concrete properties // Bulletin of Civil Engineers. – 2020. – N 5 (82). – P. 155–160.
7. Zarubina A.N., Ivankin A.N., Kuleznev A.S. et al. Cellulose and nano cellulose. Review // Forestry Bulletin. – 2019. – Vol. 23, N 5. – P. 116–125.
8. Trukhin G.O. Applications of nanocellulose in various areas ensuring environmental safety // Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences. – 2019. – N 6. – P. 40–43.
9. Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Valishina Z.T. et al. Preparation, structure, properties of microcrystalline and nanocellulose from cotton // Chemical Industry Developments. – 2019. – N 6. – P. 58–63.
10. Shinoda R. Relationship between length and degree of polymerization of TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils // Biomacromolecules. – 2012. – Vol. 13, N 3. – P. 842–849.
11. Fang Z. Critical role of degree of polymerization of cellulose in super-strong nanocellulose films // Matter. – 2020. – Vol. 2, N 4. – P. 1000–1014.
12. Moon R.J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites // Chemical Society Reviews. – 2011. – Vol. 40, N 7. – P. 3941–3994.
13. Szafraniec M. [et al.]. A critical review on modification methods of cement composites with nanocellulose and reaction conditions during nanocellulose production // Materials. – 2022. – Vol. 15, N 21. – P. 7706.
14. Tonoli G. H. D. [et al.]. Cellulose modified fibers in cement based composites // Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2009. – Vol. 40, N 12. – P. 2046–2053.
15. Ghasemlou M. [et al.]. Surface modifications of nanocellulose: From synthesis to high-performance nanocomposites // Progress in Polymer Science. – 2021. – Vol. 119. – P. 101418.
16. Cuenca E. [et al.]. Effects of alumina nanofibers and cellulose nanocrystals on durability and self-healing capacity of ultrahigh-performance fiber-reinforced concretes // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 34, N 8. – P. 04022154.
17. Jiao L. [et al.]. Natural cellulose nanofibers as sustainable enhancers in construction cement // PLoS One, 2016. – Vol. 11, N 12. – P. 168422.
18. Lee H. J. [et al.]. A study on the drying shrinkage and mechanical properties of fiber reinforced cement composites using cellulose nanocrystals // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2019. – Vol. 13. – P. 1–11.
19. Singh H., Gupta R. Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 28. – P. 101090.
20. Bystrova E.S. Laboratory technique for determining the molecular weight and degree of polymerization of cellulose by capillary viscometry // Laboratory techniques and technological instructions for practical preservation of documents: collection of articles. – St. Petersburg: Russian National Library, 2019. – P. 225–234.
21. Golubev D.S., Gismatulina Yu.A., Gladysheva E.K. et al. Degree of polymerization of cellulose of various origins // New achievements in chemistry and chemical technology of vegetable raw materials: conference materials. – Barnaul: ASU, 2020. – P. 306–308.
22. Zuikov A.A., Goryachev N.L., Konstantinova S.A. et al. Prospects for the production of nanocellulose in Russia and problems of assessing its quality // Forestry complex in the digital economy: collection of abstracts.. – M.: Scientific technologies, 2019. – P. 80–81.
23. Petrov A.V., Averyanova N.V., Gibadullin M.R., et al. A nanocellulose-based composite // Bulletin of the Technological University. – 2019. – Vol. 22, N 5. – P. 72–75.
24. Valishina Z.T., Shipina O.T., Kostochko A.V. Modeling of the cellulose hydrolysis process // Bulletin of the Kazan Technological University. – 2010. – N 11. – P. 132–136.
25. Gavrilova A.S., Manaenkov O.V., Filatova A.E. Research of microcrystalline cellulose ultrasonic treatment // Bulletin of TvSTU. – 2015. – Vol. 112, N 27, N 1. – P. 60–66.
26. Frolova S.V., Demin V.A. Degradation of wood cellulose with Lewis acids with the aim to prepare powder cellulose // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2008. – Vol. 81, N 1. – P. 152–156.
27. Patent RU 2705957 C08B15/00, B82B 3/00. A method for producing nanocrystalline cellulose using a Cu(II) catalyst / Torlopov M.A., Udoratina E.V., Volodin A.A. Patent holders: Federal State Budgetary Educational Institution of Science Federal Research Center "Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences". – Application N 2019118607, appl. 06.15.2019, publ. 11.12.2019.

28. *Neale S.M., Waite R.* The viscosity of cellulose and its nitrate in dilute solution // Transactions of the Faraday Society. – 1941. – Vol. 37. – P. 261–271.
29. *Dupont A.L., Mortha G.* Comparative evaluation of size-exclusion chromatography and viscometry for the characterization of cellulose // Journal of Chromatography A. – 2004. – Vol. 1026, N 1–2. – P. 129–141.
30. *Kongruang S.* Quantitative analysis of cellulose-reducing ends // Applied Biochemistry and Biotechnology, 2004. – Vol. 113. – P. 213–231.
31. *Zaitseva L.A., Volkova A.V., Minevich I.E.* Extraction of cellulose fibers from hemp husk // Polzunovskiy VESTNIK. – 2023. – N 2. – P. 174–183.
32. *Ramiah M.V.* Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin // Journal of Applied Polymer Science. – 1970. – Vol. 14, N 5. – P. 1323–1337.
33. *Rogovin Z.A.* Fundamentals of chemistry and technology of chemical fibers. Vol. 2. Production of artificial fibers. – 4th edition, repr. and add. – M.: Chemistry Publishing House, 1974. – 344 p.
34. *Meites L.* Idometric Determination of Copper // Analytical Chemistry. – 1952. – Vol. 24, N 10. – P. 1618–1620.

DOI 10.53980/24131997_2025_1_91

Л.А. Урханова¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: urkhanova@mail.ru

Д.В. Добрынин², аспирант, e-mail: dobrynin8888@mail.ru

С.А. Лхасаранов², канд. техн. наук, доц., e-mail: solbon230187@mail.ru

П.В. Березовский³, инженер, e-mail: baykal.teh@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

³ ООО «Буржелезобетон»

г. Улан-Удэ

УДК 691.32

УЛУЧШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНА МИКРОДОБАВКАМИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ

В статье представлены результаты исследований по модифицированию цементного камня микродобавками неорганических солей, таких как CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaSO_4 и CuSO_4 . Соли вводились в состав цемента в виде 2%-ного раствора в количестве от 0,2 до 1 %, при этом расход сухой соли составлял от 0,004 до 0,02 % от массы цемента.

Все добавки при микродозировках от массы цемента являются ускорителями твердения цемента и модификаторами, повышающими его прочность. Доказано, что прирост прочности цементного камня с микродобавками неорганических солей происходит в ранние сроки твердения.

Максимальные значения прочности показали образцы цементного камня в возрасте 28 сут твердения с добавлением солей CaSO_4 и $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Прочность при сжатии цемента превышала прочность бездобавочного цемента в среднем в 1,5–2,5 раза.

Установлен предположительный механизм действия добавок при микродозировках на процессы гидратации и твердения цементного камня, изменение его фазового состава и микроструктуры. При использовании добавок наблюдается уплотнение структуры гидратного камня за счет образования высокодисперсных продуктов гидролиза неорганических солей.

Исследуемые ультрадисперсные добавки могут быть использованы для увеличения прочности бетона в ранние сроки твердения или для получения равнопрочных бетонов с уменьшенным расходом цемента.

Ключевые слова: *портландцемент, неорганические добавки, ускорители твердения, процессы гидролиза, коллоидные частицы, прочность при сжатии, повышение прочности, ускорение твердения бетона.*

L.A. Urkhanova¹, Dr. Sc. Engineering, Prof.

D.V. Dobrynin², PG student

S.A. Lkhasaranov², Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

P.V. Berezovskiy³, Engineer

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

² East Siberia State University of Technology and Management

³ ООО «BURZHELEZOBETON»

Ulan-Ude

IMPROVEMENT OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH MICROADDITIONS OF INORGANIC SALT

The article presents the results of studies on the modification of cement stone with microadditives of inorganic salts, such as CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaSO_4 and CuSO_4 . Salts were introduced into the cement composition in the form of a 2 % solution in the amount of 0,2 to 1 %, while the consumption of dry salt ranged from 0,004 to 0,02 % by weight of the cement.

All additives in microdosages based on the mass of cement are accelerators of cement hardening and modifiers that increase its strength. It has been proven that the increase in strength of cement stone with microadditives of inorganic salts occurs on early stages of hardening.

The maximum strength values were shown by cement stone samples aged 28 days of hardening with the addition of CaSO_4 and $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ salts. The compressive strength of cement exceeded the strength of non-additive cement by 1,5–2,5 times in average.

The present study establishes hypothetical mechanism of microdosage additives influence on the processes of hydration and hardening of cement stone, changes in its phase composition and microstructure. When using additives, compaction of the hydrate stone structure is observed due to the formation of highly dispersed hydrolysis products of inorganic salts.

The ultrafine additives under study can be used to increase concrete strength on early stages of hardening or to obtain equal-strength concrete with reduced cement consumption.

Key words: *Portland cement, inorganic additives, hardening accelerators, hydrolysis processes, colloidal particles, compressive strength, strength increase, accelerating concrete hardening*

Введение

Исследования, связанные с производством и применением цементного бетона, активно развиваются в последние годы. Основной задачей, которую решают исследователи, является создание прочных, долговечных, бездефектных композитов, полученных путем управления свойствами и структурой материалов на различных масштабных уровнях за счет использования модифицирующих добавок [1–3]. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных ускорению процессов гидратации и твердения цементных композитов, вопросы регулирования этих процессов остаются актуальными. Успешное решение этих вопросов будет способствовать снижению материалоемкости производства, себестоимости конечных продуктов, повышению качества изделий и конструкций. Интенсификацию процессов гидратации и твердения цемента можно осуществлять путем изменения минералогического состава портландцементного клинкера, дисперсности цемента, использованием тепловлажностной обработки и физических методов ускорения твердения (электромагнитная, электрохимическая, сверхвысокочастотная обработка и др.) и введением химических добавок различного состава и функционального назначения. К числу таких добавок относятся вещества, которые ускоряют процессы гидратации и твердения цемента, а также кристаллические затравки (кренты).

Традиционно в технологии цементных бетонов неорганические соли регулируют процессы гидратации и твердения цемента [4, 5]. Из множества неорганических добавок наиболее распространены добавки-электролиты. Такие добавки приводят к повышению растворимости минералов клинкера и гидратных новообразований и, кроме того, при химическом взаимодействии способствуют образованию гидратных фаз различного состава [6, 7].

Ускорителями твердения цемента являются такие соли, как NaCl , Na_2SO_4 , CaCl_2 и другие. В зависимости от показателя основного эффекта действия дозировка добавок варьируется от десятых долей процента до целых процентов. Однако необходимо помнить о побочном эффекте этих добавок, которые могут влиять на арматуру, закладные детали и бетон [4].

Кроме добавок – ускорителей твердения растворов и бетонов перспективно использование кристаллизационных компонентов, или добавок – крентов, состав и структура которых идентична составу и структуре продуктов гидратации цемента. Кренты ускоряют процессы кристаллизации гидратных новообразований, выступая в качестве кристаллических затравок [8, 9]. Было установлено, что кренты значительно ускоряют образование гидросульфалоумината кальция (эттрингита) и гидросиликатов кальция, что интенсифицирует процессы гидратации и увеличивает прочность цемента. Авторами работы [9] установлено ускорение гидратации портландцемента при комплексном использовании гидросульфалоумината и гидросиликатов кальция. Синтез микродисперсной добавки кристаллогидратов – затравки разного состава осуществлялся с помощью процессов тонкого измельчения исходного сырья в присутствии воды в роторно-пульсационном аппарате.

Исследователи продолжают поиск, синтез и изучение свойств новых неорганических добавок. Научные исследования в этой области развиваются, поскольку такие добавки востребованы в технологии бетона. Сотрудники ВСГУТУ ранее доказали эффективность применения ряда неорганических солей, таких как CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaSO_4 и CuSO_4 [10]. Дозировка 2%-ного раствора солей менялась в диапазоне от 0,2 до 1 %, при этом количество сухой соли составляло от 0,004 до 0,02 % от массы цемента. Анализ данных показал, что все изученные добавки способствуют более быстрому затвердеванию цемента и увеличивают его прочность.

Цель научно-исследовательской работы – определение фазового состава и микроструктуры цементного камня с микродозировками неорганических солей и физико-механических свойств цементного бетона, доказывающие эффективность их применения для модификации цементных композитов.

Материалы и методы исследований

Для улучшения физико-механических свойств цементного бетона использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ГОСТ 31108-2020 производства ООО «Гимлюйцемент» ХК «Сибирский цемент» (Республика Бурятия), химико-минералогический состав клинкера которого следующий: оксид магния MgO – 1,68 %, оксид кальция CaO – 62,85, оксид кремния SiO_2 – 20,53, оксид алюминия Al_2O_3 – 5,07, оксид железа Fe_2O_3 – 4,03, трехкальциевый силикат C_3S – 66,4, двухкальциевый силикат C_2S – 12,6, трехкальциевый алюминат C_3A – 6,4, четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF – 12,3 %.

В качестве мелкого заполнителя использовали кварц-полевошпатовый песок с истинной плотностью 2650 кг/м^3 с $\text{Mk} = 3,1$, отвечающий требованиям ГОСТ 8736-2014 для песка I класса, в качестве крупного заполнителя – гранитный щебень со средней плотностью до 2600 кг/м^3 карьера АО «Горняк» фр. 5–10, 10–20 мм в соответствии с ГОСТ 8267-93.

Как указывалось выше, в работе исследовали 4 вида добавок, таких как CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaSO_4 и CuSO_4 . Концентрация 2 % раствора соли изменяли в диапазоне от 0,2 до 1 %, при этом количество сухой соли составляло от 0,004 до 0,02 % от массы цемента в зависимости от водоцементного отношения. Из цемента с добавками изготавливали образцы пластичного формования размером $2 \times 2 \times 2 \text{ см}$ при водоцементном соотношении $\text{В/Ц} = 0,25$ и $\text{В/Ц} = 0,30$. Из бетонной смеси с маркой по удобоукладываемости ПЗ формовали образцы кубы $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$. Далее образцы хранили в стандартных условиях: температура $t = 18 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, влажность $W = 95\text{--}100 \text{ \%}$. Затем проводили испытания на прочность при сжатии в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 сут твердения. Прочность бетонных образцов оценивали согласно ГОСТ 10180-2012.

Для исследования структуры и фазового состава цементного камня были использованы растровый электронный микроскоп JSM-6510LV JEOL с системой микроанализа INCA и настольной установкой JFC-1600 (JEOL Ltd., Япония) (ЦКП «Прогресс» ВСГУТУ) и дифрактометр D8 Advance Bruker (ИФМ СО РАН).

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что все добавки в микродозировке влияли на сроки схватывания цемента при одинаковой пластичности цементного теста (табл. 1). Сроки схватывания портландцемента с добавками сокращались в среднем на 15–30 % по сравнению с контрольным составом. Добавки по степени влияния на сроки схватывания были расположены в следующем порядке: CaSO_4 , CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Следует отметить, что добавка соли CuSO_4 практически не оказывала влияние на изменение сроков схватывания цемента.

Все исследованные добавки не только способствовали ускорению кинетики твердения цемента, но и увеличивали прочность цементного камня, особенно в ранние сроки твердения – после 1–7 сут твердения.

Таблица 1

Влияние микродобавок неорганических солей на изменение сроков схватывания цемента

Вид добавки	Количество добавки, % от массы цемента		Водоцементное отношение	Сроки схватывания, мин	
	считая на 2 % раствор соли	считая на сухую соль		начало схватывания	конец схватывания
цемент без добавки	–	–	0,25	140	200
CaSO ₄	0,6	0,012	0,25	100	150
Ca(NO ₃) ₂	1,0	0,02	0,25	120	180
CaCl ₂	0,6	0,012	0,25	110	160
CuSO ₄	0,8	0,016	0,25	150	220

Это указывало на эффективность применения добавок, которую определяли путем сравнения прочности при сжатии цементного камня с добавкой и без нее (рис. 1). Во все сроки твердения предел прочности при сжатии цементного камня с добавками неорганических солей оказывался выше, чем у контрольных образцов. Оптимальная дозировка добавок зависела от вида соли и типа ее аниона: для CaSO₄ она составила 0,4–0,8 %, для CaCl₂ – 0,2–0,6 %, для Ca(NO₃)₂ – 0,6–1 %, а для CuSO₄ – 0,4–1%.

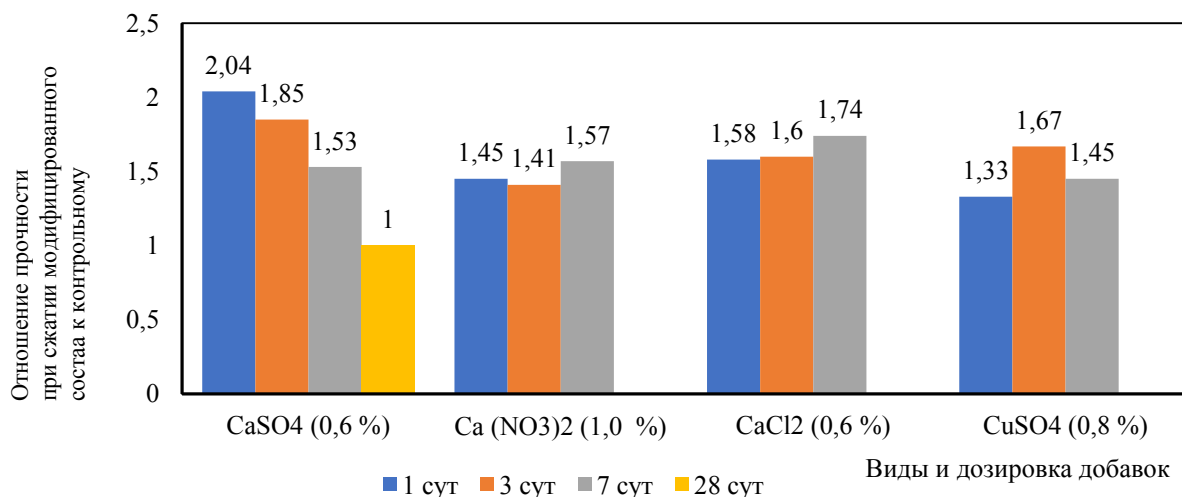
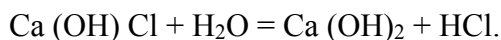


Рисунок 1 – Эффективность действия используемых добавок при оптимальной концентрации в зависимости от времени твердения гидратного камня

При добавлении соли CaSO₄ в оптимальных дозировках прочность цементного камня увеличивалась: в 3 сут – в 1,71–2,64 раза, в 28 сут – в 1,5–1,57 раза. Для добавки Ca(NO₃)₂ увеличение прочности составило в 1,41–1,45 и 1,52–1,57 раза в возрасте 3 и 28 сут соответственно. Особенно эффективно было добавление в состав цемента соли CaCl₂ при микродозировке. Это приводило к увеличению прочности при сжатии цементного камня: в возрасте одних суток твердения – на 33 %, в три дня – на 58–67 %, в 28 дней – на 68–74 %. При добавлении CuSO₄ прирост прочности составил: в одни сутки твердения – 50 %, в три дня – 33–43 %, в 28 дней – 38–45 %.

Как указывали ранее [10, 11], увеличение скорости набора прочности цемента в присутствии неорганических солей – хлоридов, сульфатов, нитратов кальция можно объяснить ускорением реакции гидратации основного минерала портландцемента – трехкальциевого силиката C₃S [12, 13]. Ускорение реакции гидратации было обусловлено интенсификацией процесса образования зародышей кристаллов новых гидратных фаз [5].

В соответствии с известными законами химии в результате многоступенчатого процесса гидролиза соли образуются гидроксоли соответствующих металлов. Это происходило на промежуточной стадии. На примере хлористого кальция CaCl_2 гидролиз протекал согласно следующим химическим реакциям [10]:



Хлорид кальция – соль основания средней силы и сильной кислоты, поэтому его гидролиз осуществлялся по катиону. В ходе дисперсионного анализа добавок, на примере 2%-ного раствора соли CaCl_2 , выполненного на лазерном анализаторе Anton Paar Litesizer 100/500 (лаборатория кафедры строительного производства ИрННТУ, г. Иркутск), было установлено, что гранулометрический состав коллоидных частиц гидроксида кальция характеризовался полимодальным распределением и их дисперсность лежала в диапазоне от 8 до 18 мкм (рис. 2). При этом средний размер частиц исходного 2%-ного раствора соли CaCl_2 – 13,8 мкм. При введении добавки в воду затворения цемента происходило разбавление 2%-ного раствора от 30 до 150 раз. При этом размер частиц добавки уменьшался почти в 10 раз при ее оптимальной концентрации, составляющей 0,6 % от массы цемента (рис. 2, кривая 2). Размеры частиц находились в диапазоне 1,68–1,97 мкм, что доказывало высокую степень дисперсности продуктов гидролиза солей и их взаимодействия с минералами цемента. Образующие высокодисперсные частицы заполняли микропоры цементного камня, создавая более плотную систему.

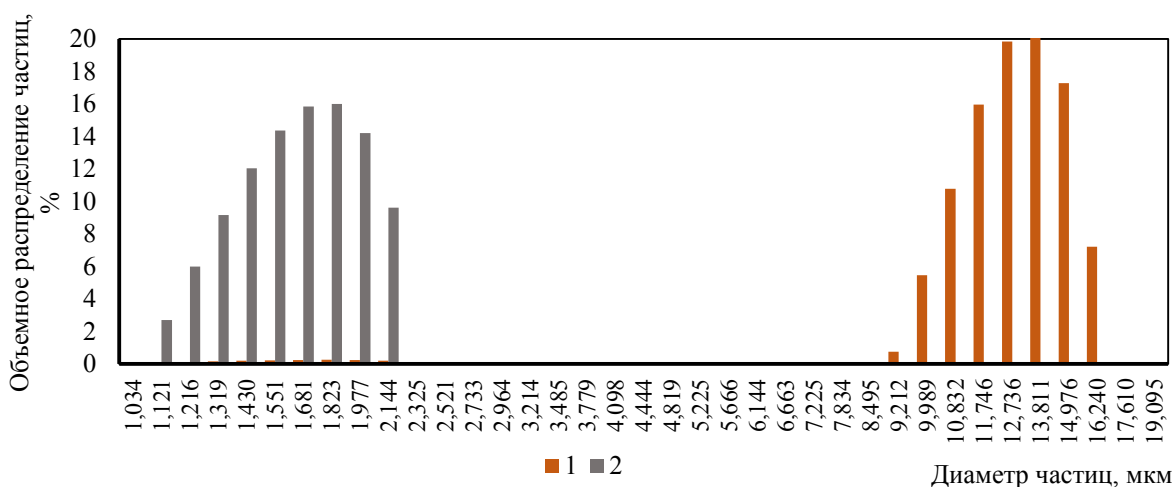


Рисунок 2 – Дисперсионный анализ: 1 – 2%-ный раствор соли CaCl_2 ; 2 – разбавленный водой затворения добавки в количестве 0,6 % от массы цемента

Важным преимуществом использования добавок, полученных гидролизом солей, является то, что гидроксиды поливалентных металлов находятся в коллоидном состоянии и водные оболочки мицелл препятствуют агрегации частиц. При разбавлении 2%-ных растворов неорганических солей могут быть получены устойчивые гидроксиды многовалентных металлов с ультрадисперсными коллоидными частицами. Известно, чтобы обеспечить получение материалов с высокими физико-механическими свойствами, необходимо предварительно изучить условия приготовления, состав, структуру и свойства гидроокисных систем [14].

На рисунке 3 представлена микроструктура цементного камня контрольного состава и цементного камня, модифицированного добавкой CaCl_2 в количестве 0,6 % от массы цемента.

Для контрольного состава цементного камня характерна крупнокристаллическая структура с хаотичным расположением крупнокристаллических сростков.

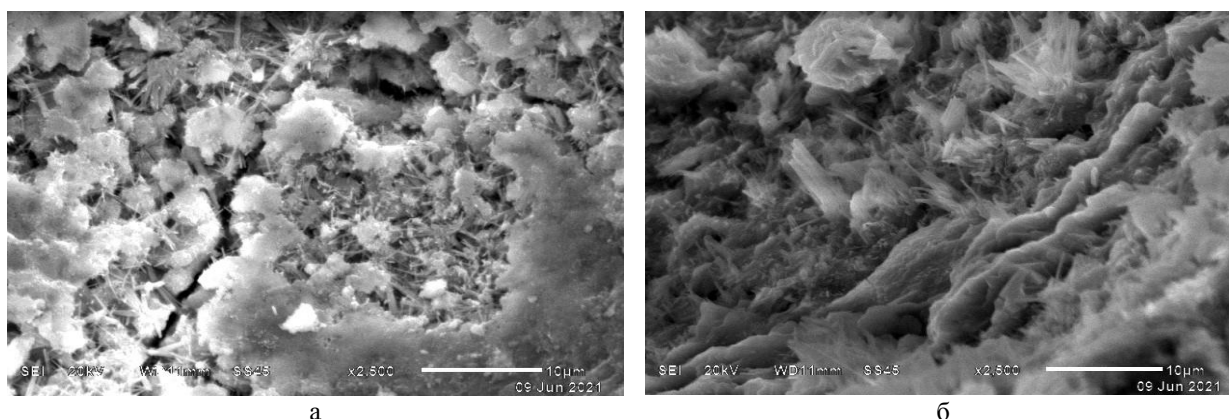


Рисунок 3 – Микроструктура образцов (28 сут): а – контрольный образец – портландцемент; б – образец портландцемента, модифицированного добавкой CaCl_2

На рисунке 3 можно видеть формирование кристаллов этtringита, потландита и цементный гель (низкоосновные гидросиликаты кальция типа CSH (I) со слабой степенью кристаллизации). Поверхность образца цементного камня с использованием добавки CaCl_2 отличалась от контрольного состава. Изменение морфологии и количества образующихся гидратных новообразований, уплотнение структуры материала свидетельствовало об активном взаимодействии продуктов гидролиза хлорида кальция с частицами портландцемента [5, 15].

С целью оценки фазового состава цементных композитов был проведен рентгенофазовый анализ, показывающий изменения при модифицировании добавкой CaCl_2 . При сравнении рентгенограмм контрольного и модифицированного состава наблюдаются дифракционные максимумы гидросиликатов кальция C-S-H (II) ($d = 2,00; 1,56 \text{ \AA}$); портландита ($d = 2,63; 1,93; 1,79 \text{ \AA}$), этtringита ($d = 3,89; 2,43 \text{ \AA}$). Дифракционные максимумы алита ($d = 3,03; 2,77; 2,60 \text{ \AA}$) в контрольном и модифицированном составе значительно изменились (до 80 %) в сторону снижения для состава с добавкой CaCl_2 . Это свидетельствует о том, что ультрадисперсная добавка в виде раствора хлорида кальция ускоряет процессы гидратации и структурообразования цементного камня.

Низкоосновные гидросиликаты кальция повышают прочность цементного камня [4–8]. Вероятная причина этого – степень конденсации кремнийкислородных анионов. Чем больше в единице объема цементного камня анионов с высокой степенью конденсации, тем больше в системе силоксановых групп, соединенных прочными ковалентными связями. Это способствует формированию высокой прочности материала [16, 17]. Некоторые химические добавки могут влиять на скорость и степень конденсации и на конфигурацию кремнийкислородных анионов. Например, хлорид кальция (CaCl_2) и другие добавки положительно влияют на процесс, так как воздействуют на степень конденсации анионов при взаимодействии силикатов C_3S и C_2S с водой [16].

Ускорение твердения цементного камня при введении модификатора происходило, на наш взгляд, по механизму, отличающемуся от традиционного. Коллоидные растворы гидроксидов многовалентных металлов иммобилизуют часть воды в гидратную оболочку [10, 14], что приводило к снижению водоцементного отношения при сохранении реологических характеристик цементного теста и образованию более плотной структуры цементного камня.

При исследовании влияния добавок солей на свойства тяжелого бетона были определены показатели прочности при сжатии в возрасте 1, 3, 7 и 28 сут. Для исследования был подобран состав тяжелый бетона класса по прочности В20 (цемент – 395 кг/м^3 ; песок – 770 кг/м^3 ;

щебень – 940 кг/м³; вода – 215 л/м³). Для оценки эффективности добавок было проведено сравнение изменения прочности при сжатии различных составов бетона в возрасте 1 сут твердения согласно ГОСТ 30459-2008. Дозировка добавок составляла от 0,1 до 0,2 % от массы цемента в пересчете на сухую соль (табл. 2).

Из таблицы 2 следует, что добавки CaSO₄, CaCl₂ отвечали требованию, которое предъявляется к ускорителям твердения. Наиболее эффективным ускорителем в первые сутки являлся CaSO₄. При его использовании прочность бетона в первые сутки становилась выше на 38 % по сравнению с бездобавочным составом. При последующем твердении темп прироста снижался, в 7 сут твердения – до 26 % и в проектном возрасте (28 сут) составил 23 %.

Добавка CaCl₂ имела немного меньшую эффективность по сравнению с CaSO₄. Прирост прочности в 1-е сут твердения составил 32 %, что соответствует требованиям для ускорителей твердения. В возрасте 3, 7 и 28 сут прирост прочности по сравнению с контрольным составом немного снизился и составил 21, 22 и 18 % соответственно.

Добавка Ca(NO₃)₂ повысила прочность бетона на 5–12 % по сравнению с контрольным составом в исследуемые сроки твердения, поэтому ее нельзя отнести к категории добавок-ускорителей твердения.

Таблица 2

Влияние добавок на физико-механические свойства бетона

№	Количество вводимой добавки в пересчете на сухую соль, мас. %			В/Ц-отношение	Прочность при сжатии бетона, МПа, в возрасте, сут			
	CaSO ₄	CaCl ₂	Ca(NO ₃) ₂		1	3	7	28
1	–	–	–	0,54	3,8/100	15,4/100	21,2/100	25,6/100
2	0,1	–	–	0,54	4,4/115	16,2/105	22,7/107	26,9/105
3	0,2	–	–	0,54	5,2/138	19,1/124	26,7/126	31,6/123
4	–	0,1	–	0,54	4,1/108	15,8/102	21,9/103	25,9/101
5	–	0,2	–	0,54	5,0/132	18,6/121	25,8/122	30,2/118
6	–	–	0,1	0,54	3,6/95	14,6/95	19,9/94	23,4/91
7	–	–	0,2	0,54	4,0/105	17,2/112	23,4/110	27,5/107

Примечание. Перед чертой приведено среднее значение показателя; за чертой – относительное значение показателя, в процентах от контрольного.

Заключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Подтверждена эффективность использования солей многовалентных металлов для изменения структуры и свойств портландцемента.

2. Добавки CaCl₂ и CaSO₄ эффективно повысили раннюю прочность бетона и соответствовали критериям, предъявляемым для добавок ускорителей твердения.

3. Был установлен прирост прочности портландцемента и бетона при микродозировках добавок, что связано с изменением пористости гидратного камня, его фазового состава и микроструктуры.

4. Разработанный состав бетонной смеси с микродобавками неорганических солей может найти применение при монолитном бетонировании, когда необходим ускоренный рост прочности бетона для сокращения сроков его выдержки с последующим ускорением строительного процесса.

Необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение деформативных характеристик и показателей долговечности цементного бетона с разработанными добавками.

Библиография

1. *Строкова В.В., Нелюбова В.В., Кузьмин Е.О. и др.* Технологии золь-гель синтеза нанокремнезема как модификатора материалов на основе цемента. Форсайт анализ // *Строительные материалы*. – 2023. – № 3. – С. 43–72.
2. *Лукутцова Н.П., Горностаева Е.Ю., Пыкин А.А. и др.* Свойства арболита с наномодифицирующей добавкой на основе микрокремнезема // *Вестник ВСГУТУ*. – 2023. – № 2 (89). – С. 97–104.
3. *Ощепков Н.Д., Калашников А.Д., Стивенс А.Э. и др.* Дисперсное армирование газобетонов неавтоклавного твердения // *Вестник ВСГУТУ*. – 2023. – № 1 (88). – С. 73–83.
4. *Баженов Ю.М.* Технология бетона. – М.: АСВ, 2002. – 500 с.
5. *Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В.* Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1980. – 476 с.
6. *Ратинов В.Б., Розенберг Т.И.* Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
7. *Изотов В.С., Ибрагимов Р.А.* Влияние добавок-ускорителей твердения на свойства тяжелого бетона // *Строительные материалы*. – 2010. – № 3. – С. 35–37.
8. *Дмитриева А.М., Кузнецова Т.В., Юдович Б.Э. и др.* Гидратационное легирование цементов крентами // Тез. докл. на 6 Всесоюз. науч.-техн. совещ. по химии и технологии цемента. – М.: ВНТТ-ЭСМ, 1982. – С. 94–98.
9. *Еленова А.А.* Разработка комплексной добавки для ускоренного твердения цементного камня: дис. ... канд. техн. наук / *А.А. Еленова*. – М., 2017. – 164 с.
10. *Урханова Л.А., Березовский П.В., Архинчеева Н.В.* Модифицирование цементного камня микродобавками неорганических солей // *Строительные материалы*. – 2021. – № 1–2. – С. 21–29.
11. Патент № 2781727 РФ, МПК С С04В; С04В 22/08. № 2021124539 Модификатор структуры и свойств цементного камня / *Урханова Л.А., Березовский П.В.* – Заявл. 19.08.2021; опубл. 17.10.2021. – Бюл. № 29.
12. *Mohammed Al-Ansari, Ala G.Abu-Taqa, Marwa M.Hassan et al.* Performance of modified self-healing concrete with calcium nitrate microencapsulation // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 149. – P. 525–534. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.152
13. *Skripkiunas G., Kicaite A., Macijauskas M.* The influence of calcium nitrate on the plasticizing effect of cement paste // *Journal of civil engineering and management*. – 2016. – Vol. 22 (3). – P. 434–441. – DOI: 10.3846/13923730.2015.1120771.
14. *Чальый В.П.* Гидроокиси металлов (закономерности образования, состав, структура и свойства). – Киев: Наукова Думка, 1972. – 163 с.
15. *Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Коллепарди М. и др.* Добавки в бетон: справочное пособие: пер. с англ. / под ред. С.С. Рамачандрана. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
16. *Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С.* Минеральные вяжущие вещества: учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.
17. *Тихомирова И.Н.* Влияние состава и анионной структуры гидросиликатов кальция на прочность силикатного камня гидротермального твердения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / *Хим.-технолог. ун-т им. Д.И. Менделеева*. – М., 1994. – 17 с.

Bibliography

1. *Strokova V.V., Nelyubova V.V., Kuzmin E.O. et al.* Sol-gel synthesis technologies of nanosilica as a modifier for cement-based materials. Foresight analysis // *Construction Materials*. – 2023. – N 3. – P. 43–72.
2. *Lukuttsova N.P., Gornostaeva E.Yu., Pykin A.A. et al.* Properties of arbolite with nanomodifying additive based on microsilica // *ESSUTM Bulletin*. – 2023. – N 2 (89). – P. 97–104.
3. *Oshchepkov N.D., Kalashnikov A.D., Stevens A.E. et al.* Refractory reinforcement of gas-based non-autoclave concrete // *ESSUTM Bulletin*. – 2023. – N 1 (88). – P. 73–83.
4. *Bazhenov Yu.M.* Concrete technology. – M.: ASV Publishing House, 2002. – 500 p.
5. *Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V.* Chemical technology of binding materials. – M.: High School Publishing House, 1980. – 476 p.
6. *Ratinov V.B., Rosenberg T.I.* Additives to concrete. – M.: Stroyizdat Publishing House, 1989. – 188 p.

7. *Izotov V.S., Ibragimov R.A.* The influence of hardening accelerator additives on the properties of heavy concrete // *Construction materials*. – 2010. – N 3. – P. 35–37.
8. *Dmitrieva A.M., Kuznetsova T.V. Yudovich B.E. et al.* Hydration alloying of cements with krents // *Abstracts of reports at the 6th All-Union Scientific and Technical Meeting on chemistry and technology of cement*. – M.: VNTTESM, 1982. – P. 94–98.
9. *Elenova A.A.* Development of a complex additive for accelerated hardening of cement stone: diss. ... Cand. Sc. Engineering. – M., 2017. – 164 p.
10. *Urghanova L.A., Berezovskiy P.V., Arkhincheeva N.V.* Modification of cement stone with micro-additives of inorganic salts // *Construction materials*. – 2021. – N 1–2. – P. 21–29.
11. Patent N 2781727 Modifier of the structure and properties of cement stone / *Urghanova L.A., Berezovskiy P.V.* – Appl. 08.19.2021, publ. 10.17.2021. – Bulletin. N 29.
12. *Mohammed Al-Ansari, Ala G. Abu-Taqa, Marwa M. Hassan et al.* Performance of modified self-healing concrete with calcium nitrate microencapsulation // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 149. – P. 525–534. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.152
13. *Skripkiunas G., Kicaite A., Macijauskas M.* The influence of calcium nitrate on the plasticizing effect of cement paste // *Journal of civil engineering and management*. – 2016. – Vol. 2 2(3). – P. 434–441. – DOI: 10.3846/13923730.2015.1120771.
14. *Chaliy V.P.* Metal hydroxides (patterns of formation, composition, structure and properties). – Kiev: Naukova Dumka Publishing House, 1972. – 163 p.
15. *Ramachandran V.S., Feldman R.F., Collepardi M. et al.* Additives to concrete: a reference manual edited by S.S. Ramachandran: translated from English. – M.: Stroyizdat Publishing House, 1988. – 575 p.
16. *Volzhenskiy A.V., Burov Yu.S., Kolokolnikov V.S.* Mineral binders: a textbook for universities. – M.: Stroyizdat Publishing House, 1979. – 476 p.
17. *Tikhomirova I.N.* The influence of the composition and anionic structure of calcium hydrosilicates on the strength of silicate stone of hydrothermal hardening: abstracts for diss. ... Cand. Sc. Engineering (05.17.11). – M.: D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 1994. – 17 p.

1.3.14 – ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

DOI 10.53980/24131997_2025_1_100

В.А. Крылов¹, аспирант, e-mail: vakrylov@itmo.ru
С.М. Волков², канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: volkovsm@vniig.org
И.В. Баранов¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: ivbaranov@itmo.ru
Е.В. Тамбулатова¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: evtambulatoва@itmo.ru
А.В. Федоров^{1,2}, д-р техн. наук, доц., e-mail: afedorov@itmo.ru

¹ Университет ИТМО

² ВНИИЖиров

г. Санкт-Петербург

УДК 536.1/.62/.63; 665.1/.3

**ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ
НЕРАФИНИРОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ
ОТ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ**

Получение надежных расчетных соотношений для определения удельной теплоемкости необходимо при создании оборудования и технологических процессов. В ходе проведенных исследований получены экспериментальные данные температурных зависимостей удельной теплоемкости нерафинированных пищевых растительных масел в диапазоне температур от 40 до 140 °С. Сформированы расчетные соотношения для определения температурной зависимости удельной теплоемкости различных групп растительных масел. Приведенные результаты могут быть использованы не только в масложировом производстве, но и для решения других научно-технических задач.

Ключевые слова: нерафинированные пищевые растительные масла, жирнокислотный состав, удельная теплоемкость.

V.A. Krylov¹, PG student
S.M. Volkov², Cand. Sc. Chemistry, Senior Research Scientist
I.V. Baranov¹ Dr. Sc. Engineering, Prof.
E.V. Tambulatova¹, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.
A.V. Fedorov^{1,2} Dr. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

¹ ITMO University

² All-Russian Scientific Research Institute of Fats

Saint Petersburg

**STUDY OF CHANGES IN SPECIFIC HEAT CAPACITY OF UNREFINED VEGETABLE
OILS DEPENDING ON FATTY ACID COMPOSITION AND TEMPERATURE**

Obtaining reliable calculation ratios for determining specific heat capacity is necessary when creating equipment and in technological processes. The study obtained experimental data on the temperature dependences of the specific heat capacity of unrefined edible vegetable oils in the temperature range from 40 °C to 140 °C. Calculation ratios were formed to determine the temperature dependence of the specific heat capacity of various groups of vegetable oils. The presented results can be used not only in oil and fat production, but also for solving other scientific and technical problems.

Key words: unrefined edible vegetable oils, fatty acid composition (CFA), specific heat capacity.

Введение

Вопросы энергоэффективности оборудования и интенсификации технологических процессов в масложировом производстве решаются путем комплексных междисциплинарных исследований, в котором важнейшим сегментом является изучение теплофизических свойств взаимодействующих сред. Знание величины теплоемкости в диапазоне режимных параметров определяет точность вычисления энергетических балансов и построения математических мо-

делей тепломассопереноса. Исследование теплоемкости растительных масел не только пополняет общую научную информацию, но и открывает возможность модернизации технологий производства и переработки растительных масел. Авторами проводятся исследования в этой области [1], а результаты уже использованы на практике при конструировании перспективной техники в маслоэкстракционном производстве [2].

Исследованием удельной теплоемкости растительных масел успешно занимаются в ряде научных центров в РФ и за рубежом. В работах [3–8] установлены основные закономерности изменения зависимости удельной теплоемкости от составов растительных масел в различных температурных интервалах. Многочисленные экспериментальные теплофизические данные и их подробный анализ приведен в диссертационной работе [9]. Исследователями в работе [10] установлено, что увеличение удельной теплоемкости масла авокадо и оливкового масла связано с повышенным содержанием в них мононенасыщенных жирных кислот (МНЖК). А в льняном масле ими было обнаружено снижение удельной теплоемкости за счет повышенного содержания ди- и триненасыщенных жирных кислот (ДНЖК, ТНЖК).

В некоторых случаях исследования теплоемкости инициируются использованием растительных масел в технических целях. Отсутствие надежных данных по теплоемкости ряда масел, по мнению авторов публикации [11], значительно тормозит расчет термодинамических систем, участвующих в процессе получения биодизельного топлива в сверхкритических флюидных условиях при высоких давлениях. Поэтому ими проведены исследования широкого спектра теплофизических свойств. Аналогичные данные представлены в работе [12]. В отдельных случаях перспективным представляется использование растительных масел в качестве аккумуляторов теплоты. В работе [13] показано, что при небольших объемах хранения растительные масла – это относительно дешевые и легкодоступные теплоаккумулирующие материалы. Авторами [13, 14] экспериментально определена удельная теплоемкость подсолнечного масла, которая увеличивается с повышением температуры, и это необходимо учитывать при проектировании теплоаккумулирующих систем.

Использование метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для определения удельной теплоемкости растительных масел позволило значительно продвигаться в получении новой экспериментальной информации. В работе [15] авторы, применяя метод ДСК, представили зависимости, которые показали, что жирнокислотный состав однозначно определяет характер изменения удельной теплоемкости. И это позволило авторам сделать вывод, что метод ДСК открывает возможности для идентификации масел при экспресс-анализах. В публикации [16] также рассматривается изучение теплоемкости масел методом ДСК. Авторами было подтверждено, что удельная теплоемкость рассматриваемых растительных масел увеличивалась в зависимости от наличия насыщенности жирных кислот.

При разработке смазывающих охлаждающих жидкостей (СОЖ) на основе растительных масел одним из важнейших свойств является теплоемкость получаемых композиций. При производстве СОЖ с использованием ультразвуковой обработки в работе [17] показано влияние на плотность, удельную теплоемкость и кинематическую вязкость составляющих амплитуды и продолжительности воздействия ультразвуковых колебаний. Интересные результаты в этой области исследования представлены в [18, 19], причем в них прослеживается четкая позиция авторов, считающих, что структура масел определяет характер изменения удельной теплоемкости.

Авторы [20] опубликовали результаты исследований, подтверждающие важность знания удельной теплоемкости в зависимости от жирнокислотного состава масел при их обработке сверхвысокочастотным волновым излучением (СВЧ). В этой работе доказано, что глицириновый компонент в растительном масле способствует микроволновому нагреву, в то время как его отсутствие в минеральном масле объясняет ограниченные возможности микроволнового нагрева.

В работе [21] был определен характер ее зависимостей от исходных параметров, в том числе и от содержания мононенасыщенных и полиненасыщенных жирных кислот. Информа-

ционные исследования показали недостаточность данных для нерафинированных растительных масел, и поэтому мы продолжили исследования в этом направлении, считая их актуальными. В совокупности с предыдущими эти исследования расширяют и углубляют представления о влиянии структуры растительных масел на их физические свойства.

Цель работы – установить основные закономерности изменения удельной теплоемкости от состава и температуры для нерафинированных растительных масел.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования:

- высокоолеиновые и среднеолеиновые растительные масла: авокадо, рапсовое, рисовое, горчичное и подсолнечное;
- линолевые: подсолнечное и соевое масла;
- линоленовые масла: чиа, рыжиковое и льняное.

Результаты исследований жирнокислотного состава растительных масел с общепринятыми условными обозначениями жирных кислот представлены в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1

Жирнокислотный состав нерафинированных масел высоко- и среднеолеиновых групп

№	Условное обозначение жирной кислоты	Авокадо	Рапсовое № 1	Рапсовое № 2	Горчичное	Рисовое	Подсолнечное среднеолеиновое
1	C8:0	0,2	–	–	–	–	–
2	C10:0	0,2	–	–	–	–	–
3	C12:0	0,2	0,1	–	–	–	–
4	C14:0	–	0,1	0,1	0,1	0,3	–
5	C16:0	7,2	3,9	3,3	3,5	18,1	5,7
6	C16:1	1,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0,8
7	C17:0	–	0,1	0,1	0,1	0,2	–
8	C18:0	1,8	1,8	1,7	2,1	2,4	3,3
9	C18:1	71,5	61,1	60,8	46,3	42,7	40,9
10	C18:2	16,3	18,9	19,1	29,7	31,3	46,2
11	C18:3	0,2	10,4	10,5	12,8	2,0	0,4
12	C20:0	0,3	0,6	0,8	0,5	1,1	0,5
13	C20:1	0,5	1,8	2,0	2,4	0,8	0,3
14	C20:2	–	0,1	0,1	0,2	–	–
15	C22:0	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	1,1
16	C22:1	–	0,3	0,4	1,4	–	0,1
18	C24:0	–	0,2	0,4	0,1	0,5	0,5
19	C24:1	–	–	–	0,3	–	0,2

Таблица 2

Жирнокислотный состав нерафинированных масел линолевого типа

№	Условное обозначение жирной кислоты	Подсолнечное № 1	Подсолнечное № 2	Соевое
1	C14:0	0,1	0,1	0,1
2	C16:0	6,4	6,0	9,2
3	C16:1	0,2	0,1	0,1
4	C17:0	–	–	0,2
5	C18:0	3,3	4,1	5,1
6	C18:1	19,4	21,8	24,7
7	C18:2	68,9	66,4	52,1
8	C18:3	0,1	0,1	6,8
9	C20:0	0,2	0,3	0,6
10	C20:1	0,2	0,2	0,3
11	C20:2	–	–	0,1
12	C22:0	1,0	0,7	–
13	C22:1	–	–	0,5
14	C22:2	–	–	–
15	C24:0	0,2	0,2	0,1
16	C24:1	–	–	0,1

Таблица 3

Жирнокислотный состав нерафинированных масел линоленового типа

№	Условное обозначение жирной кислоты	Чиа	Льняное № 1	Льняное № 2	Рыжиковое
1	C14:0	–	–	–	–
2	C16:0	6,8	5,8	5,3	5,4
3	C16:1	0,3	0,1	0,2	0,2
4	C17:0	0,1	0,1	0,1	0,1
5	C18:0	3,1	4,3	4,6	2,3
6	C18:1	6,7	18,5	18,1	19,2
7	C18:2	18,8	18,5	19,1	19,7
8	C18:3	63,4	51,7	51,2	32,7
9	C20:0	0,3	0,2	0,3	1,3
10	C20:1	0,1	0,1	0,3	12,4
11	C20:2	0,1	–	–	1,5
12	C22:0	–	0,4	0,4	0,4
13	C22:1	–	0,2	0,4	2,5
14	C22:2	0,3	–	–	0,4

Жирнокислотный состав объектов исследования определялся на хроматографе «Bruker Scion 436 GC», оборудованном капиллярной колонкой с полиэтиленгликолевой активной фазой $L=30$ м, $d=0,25$ мм по действующим государственным стандартам, как и в работах [1, 21].

Результаты анализов количественного содержания фосфолипидов в маслах по ГОСТ 31753-2012 в дополнение к данным, опубликованным ранее, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Содержание фосфолипидов в нерафинированных маслах

№	Наименование масла	Фосфор, мг/кг	В пересчете на	
			пятиокись фосфора, %	стеароолеолецитин, %
1	Подсолнечное масло линоленового типа № 2	14,0	0,0032	0,035
2	Соевое масло	95,2	0,0218	0,240
3	Горчичное масло	60,7	0,0139	0,155

Измерение удельной теплоемкости объектов исследования проводилось на приборе DSC 204 F1 при в диапазоне температур 40–140 °С по методике, детально описанной в работах [1, 21].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерения удельной теплоемкости масел представлены на рисунках 1 и 2.

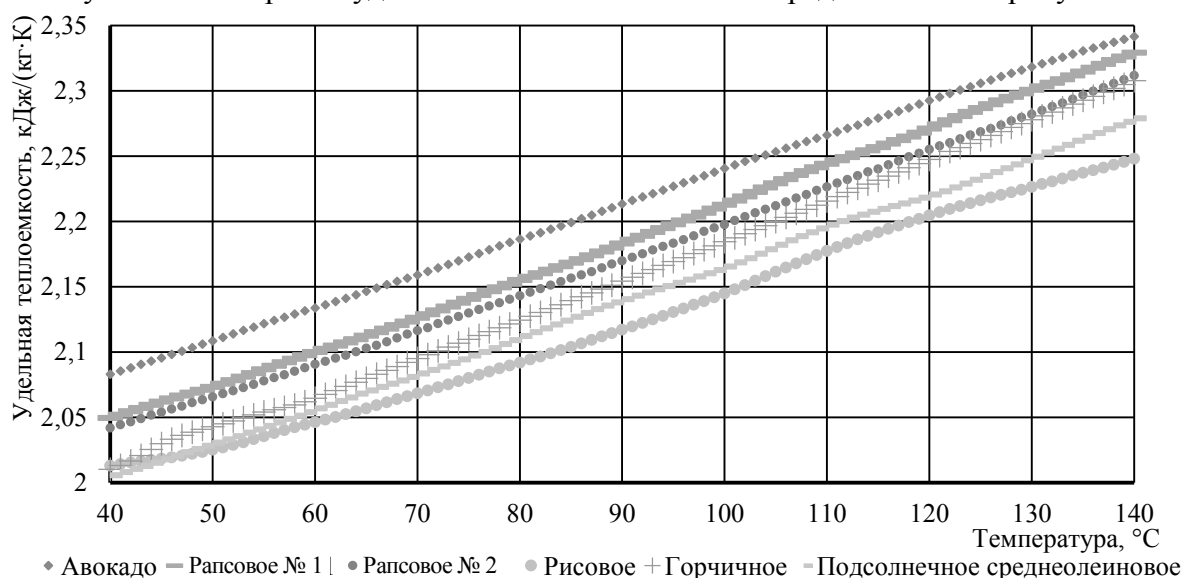


Рисунок 1 – Температурные зависимости удельных теплоемкостей высокоолеиновых и среднеолеиновых групп масел

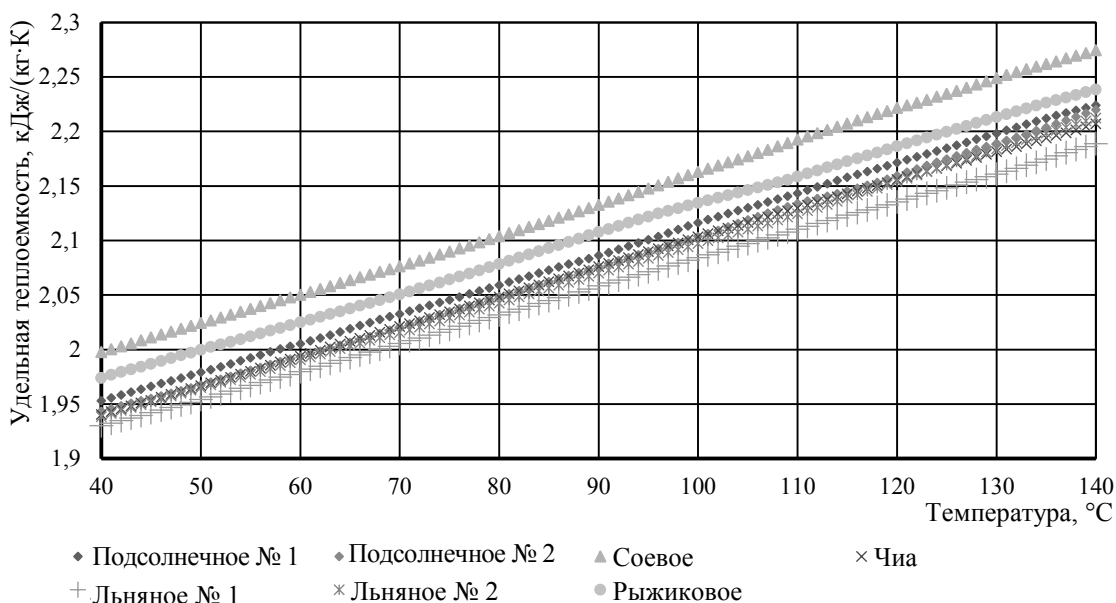


Рисунок 2 – Температурные зависимости удельных теплоемкостей линолевых и линоленовых групп масел

Данные таблиц 1, 2 были использованы для определения характера влияния суммарного содержания МНЖК и ДНЖК на температурные зависимости удельной теплоемкости. Для этого были выбраны растительные масла, в жирнокислотном составе которых содержалось менее 10 % ТНЖК: авокадо, подсолнечное среднеолеиновое, рисовое, соевое, подсолнечное № 1 и подсолнечное № 2. Для каждого из этих растительных масел было определено суммарное содержание МНЖК в их жирнокислотном составе, состоящих из жирных кислот С16:1, С18:1, С20:1, С22:1, С24:1, а также ДНЖК, состоящих из С18:2, С20:2, С22:2.

Данные таблиц 1–3 были использованы для определения характера влияния суммарного содержания ТНЖК на температурные зависимости удельной теплоемкости. Для этого были выбраны растительные масла, в жирнокислотном составе которых содержалось более 10 % ТНЖК: рапсовое, горчичное, рыжиковое, льняное № 1, льняное № 2 и чиа. Для каждого из этих растительных масел было определено суммарное содержание в их жирнокислотном составе ТНЖК, состоящих из жирных кислот С18:3. Для температур 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 °С были построены зависимости удельной теплоемкости от суммарного содержания ненасыщенных жирных кислот, часть которых представлена на рисунках 3, 4.

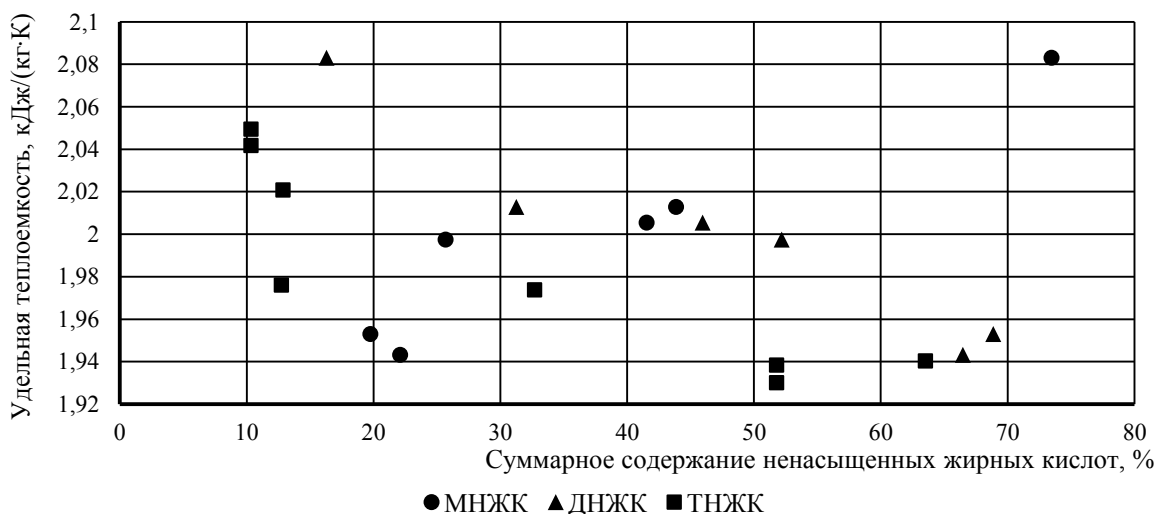


Рисунок 3 – Удельная теплоемкость растительных масел в зависимости от суммарного содержания МНЖК, ДНЖК, ТНЖК для температуры 40 °С

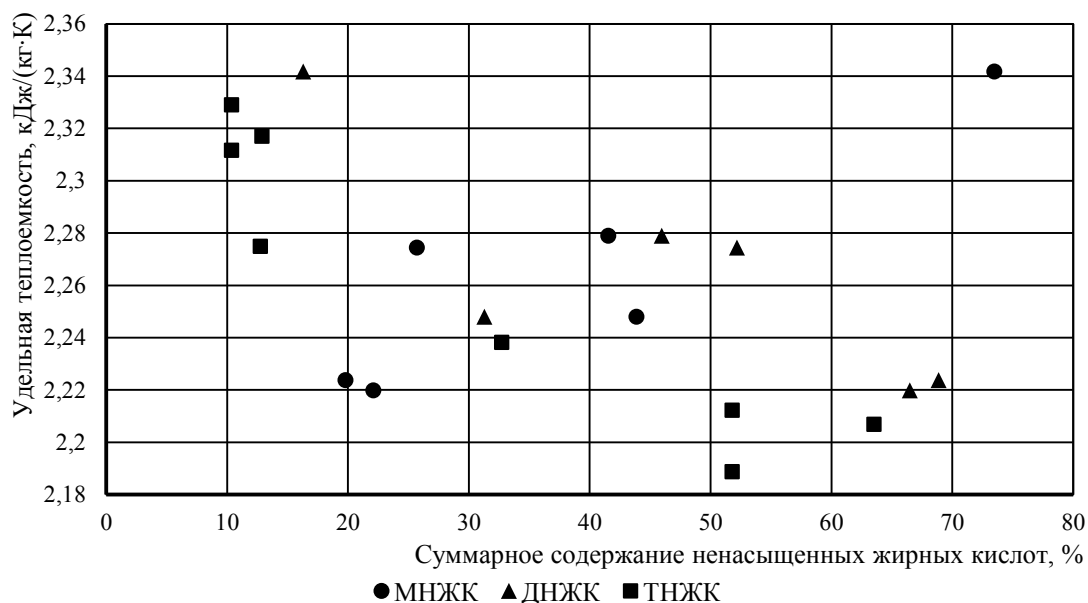


Рисунок 4 – Удельная теплоемкость растительных масел в зависимости от суммарного содержания МНЖК, ДНЖК, ТНЖК для температуры 140 °С

Результаты аппроксимации представленных на рисунках 3, 4 данных, выражаются функциями:

при температуре 40 °С

$$c_p^{\text{МНЖК}} = 2,37 \cdot 10^{-3} c + 1,91, \quad (1)$$

где c – суммарная концентрация МНЖК;

$$c_p^{\text{ДНЖК}} = -2,36 \cdot 10^{-3} c + 2,11, \quad (2)$$

где c – суммарная концентрация ДНЖК;

$$c_p^{\text{ТНЖК}} = 4,20 \cdot 10^{-5} c^2 - 4,80 \cdot 10^{-3} c + 2,07, \quad (3)$$

где c – суммарная концентрация ТНЖК;

при температуре 140 °С

$$c_p^{\text{МНЖК}} = 1,97 \cdot 10^{-3} c + 2,19, \quad (4)$$

где c – суммарная концентрация МНЖК;

$$c_p^{\text{ДНЖК}} = -2,32 \cdot 10^{-3} c + 2,38, \quad (5)$$

где c – суммарная концентрация ДНЖК;

$$c_p^{\text{ТНЖК}} = 5,29 \cdot 10^{-5} c^2 - 5,98 \cdot 10^{-3} c + 2,37, \quad (6)$$

где c – суммарная концентрация ТНЖК.

В формулах (1), (2), (5), (6) обеспечивалась достоверность аппроксимации от 0,912 до 0,928, в (3) – 0,831, в (4) – 0,777. Результаты расчетов представлены на рисунках 5, 6.

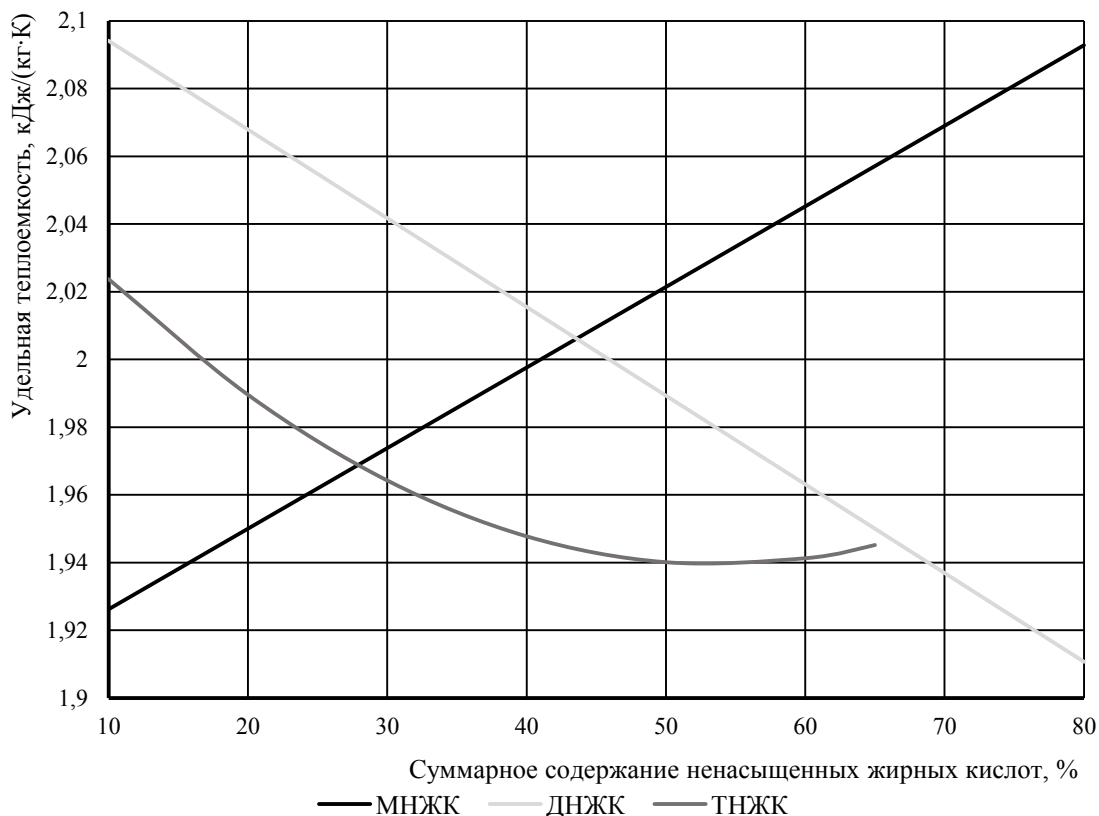


Рисунок 5 – Расчетные зависимости удельной теплоемкости от суммарного содержания МНЖК, ДНЖК, ТНЖК по формулам (1–3) для температуры 40 °С

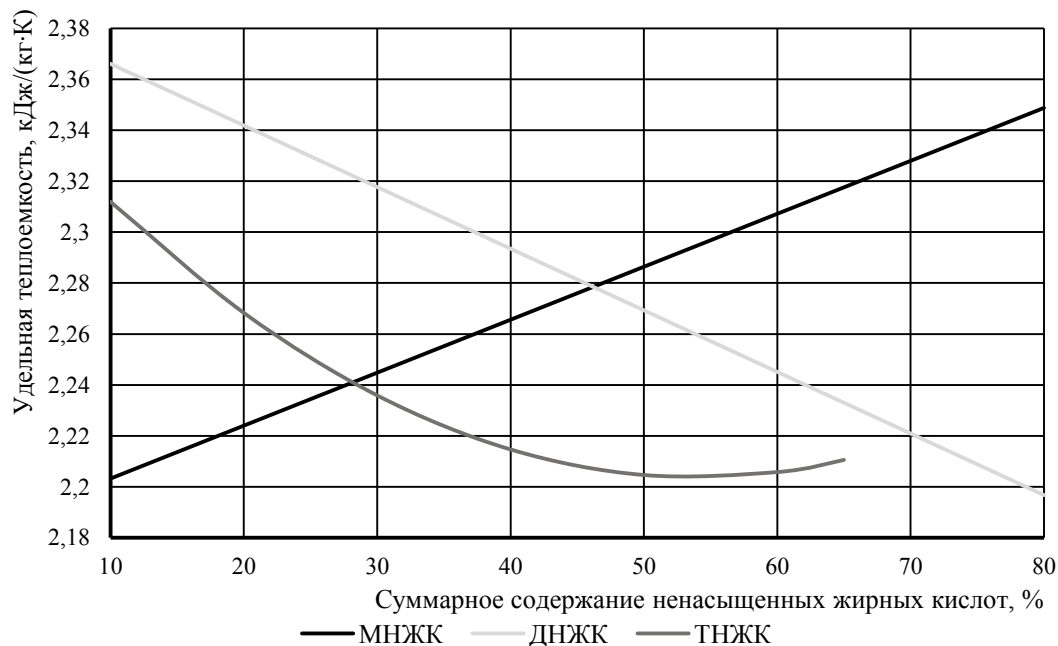


Рисунок 6 – Расчетные зависимости удельной теплоемкости от суммарного содержания МНЖК, ДНЖК, ТНЖК по формулам (4–6) для температуры 140 °С

Модельные функции, представленные на рисунках 5 и 6 в исследованном интервале температур, имеют аналогичный характер и могут быть выражены уравнениями общего вида:

$$c_p^{\text{МНЖК}} = k_1 c + n_1; \quad (7)$$

$$c_p^{\text{ДНЖК}} = -k_2 c + n_2; \quad (8)$$

$$c_p^{\text{ТНЖК}} = k_3 c^2 + m_3 c + n_3. \quad (9)$$

Анализ уравнения (7) зависимости удельной теплоемкости от суммарного содержания МНЖК для образцов растительных масел в исследованном интервале температур показывает, что численные значения удельной теплоемкости при увеличении суммарного содержания МНЖК увеличиваются. А согласно уравнению (8), наоборот, увеличение суммарного содержания ДНЖК вызывает уменьшение удельной теплоемкости масел. Изменение удельной теплоемкости растительных масел от суммарного содержания триеновых жирных кислот – ТНЖК, описываемое уравнением (9), происходит таким же образом. То есть при увеличении суммарного содержания ТНЖК в жирнокислотном составе растительных масел происходит снижение численных значений их удельной теплоемкости.

Как следует из уравнений (1), (2), (4) и (5) зависимости удельной теплоемкости от суммарного содержания МНЖК и ДНЖК – линейные. Аналогичные зависимости для ТНЖК в соответствии с уравнениями (3) и (6) – нелинейные. Эти зависимости существенно отличаются от результатов для рафинированных масел, представленных в [21].

Это может быть связано с различными концентрациями фосфолипидов в составе масел, приведенными в таблице 4 и ранее опубликованных данных, что также подтверждается результатами исследований, приведенными в работе [22].

С помощью расчетных зависимостей $c_p^{\text{МНЖК}}$, $c_p^{\text{ДНЖК}}$ и $c_p^{\text{ТНЖК}}$ установлены аппроксимирующие функции для коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 , n_1 , n_2 , n_3 , m_3 , которые использованы соответственно в уравнениях (7–9). В результате чего получены уравнения:

$$c_p^{\text{МНЖК}} = (3,40 \cdot 10^{-6} t + 2,5 \cdot 10^{-3}) c + (2,83 \cdot 10^{-3} t + 1,79); \quad (10)$$

$$c_p^{\text{ДНЖК}} = (-2,42 \cdot 10^{-6} t + 2,7 \cdot 10^{-3}) c + (2,69 \cdot 10^{-3} t + 2,01); \quad (11)$$

$$c_p^{\text{ТНЖК}} = (1,29 \cdot 10^{-10} t^2 + 9,67 \cdot 10^{-8} t + 3,75 \cdot 10^{-5}) c^2 + (5,17 \cdot 10^{-8} t^2 + 4,06 \cdot 10^{-6} t + 4,47 \cdot 10^{-3}) c + 3 \cdot 10^{-3} t + 1,95, \quad (12)$$

где c – суммарные концентрации МНЖК в уравнении (10), ДНЖК в уравнении (11) и ТНЖК в уравнении (12).

Было проведен сравнительный анализ эффективности математических моделей, полученных авторами [9, 23], а также функций (10), (11) и (12), результаты которого представлены в таблицах 5, 6.

Таблица 5

Данные сравнения математических моделей

Наименование растительного масла	Относительное отклонение по уравнению для мононенасыщенных жирных кислот (10), %	Относительное отклонение по уравнению для диненасыщенных жирных кислот (11), %	Относительное отклонение по модели [9], %	Относительное отклонение по модели [23], %
Рисовое	0,99	1,08	0,45	1,00
Авокадо	0,34	0,24	2,01	3,21
Подсолнечное № 1	0,13	0,41	2,88	1,22
Подсолнечное № 1	0,74	0,64	1,34	1,63
Подсолнечное № 2	0,29	0,17	2,38	0,65
Соевое	1,69	0,58	2,93	0,81
Среднее относит. отклонение, %	0,70	0,52	2,00	1,42

Данные сравнения математических моделей

Наименование растительного масла	Относительное отклонение по уравнению для триненасыщенных жирных кислот (12), %	Относительное отклонение по модели [9], %	Относительное отклонение по модели [23], %
Льняное № 1	0,74	2,58	0,92
Рапсовое № 1	1,01	2,64	2,65
Горчичное	0,31	3,39	2,04
Льняное № 2	0,32	3,08	0,31
Чиа	0,37	3,05	0,64
Рыжиковое	0,43	2,80	0,10
Конопляное № 2	1,99	3,88	0,80
Рапсовое № 2	0,59	2,34	2,07
Среднее относит. отклонение %	0,72	2,97	1,19

Данные таблиц 5, 6 показывают, что для всех исследованных масел относительное отклонение расчетных значений удельной теплоемкости от экспериментальных, полученных по уравнениям (10)–(12), было существенно ниже аналогичных данных, рассчитанных по моделям из [9, 23]. То же самое относится к средним значениям относительного отклонения. А именно величина среднего относительного отклонения, полученного по уравнению (10), была в 2,9 раза меньше, чем для модели [9], и в 2,0 раза меньше, чем для модели [23]. Величина среднего относительного отклонения, полученного по уравнению (11), была в 3,9 раза меньше, чем для модели [9] и в 2,7 раза меньше, чем для модели [23]. Величина среднего относительного отклонения, полученного по уравнению (12), была в 4,0 раза меньше, чем для модели [9], и в 1,7 раза меньше, чем для модели [23]. Существенное снижение величины относительного отклонения расчетных значений от экспериментальных данных позволяет утверждать о большей эффективности математической модели, предлагаемой авторами для прогнозирования изменений удельной теплоемкости растительных масел.

Возможной траекторией исследований может также стать изучение влияния на удельную теплоемкость таких компонентов в составе растительных масел, как, например, влага и полисахариды, и формирование суперпозиции двухпараметрических уравнений.

Заключение

В диапазоне температур от 40 до 140 °С для нерафинированных растительных масел при увеличении суммарного содержания МНЖК в жирнокислотном составе происходит линейное увеличение удельной теплоемкости. При возрастании суммарного содержания ДНЖК в жирнокислотном составе удельная теплоемкость линейно снижается. Рост суммарного содержания ТНЖК в жирнокислотном составе приводит к нелинейному снижению численных значений удельной теплоемкости.

Определены функции, аппроксимирующие экспериментальные данные удельной теплоемкости от суммарного содержания ДНЖК и ТНЖК в жирнокислотном составе при различных температурах. Рассчитанные по аппроксимирующим функциям средние относительные отклонения от 1,7 до 4,0 раза ниже аналогичных данных, вычисленных с использованием математических моделей, ранее описанных в научной литературе.

Приведенные результаты могут быть использованы не только в масложировом производстве, но и для решения других научно-технических задач.

Библиография

1. Федоров А.В., Баранов И.В., Тамбулатова Е.В. и др. Исследование температурных зависимостей удельной теплоемкости рафинированных подсолнечных масел от их состава методом дифференциальной сканирующей калориметрии // Вестник Международной академии холода. – 2019. – № 1 (70). – С. 52–63. – DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-52-63.
2. Патент RU 2809805 С1 МПК С11В 1/10 Колонный аппарат для дистилляции масляных мисцелл: / Лисицын А.Н. и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт жиров». № 2021120453. – Заявл. 12.07.2021; опубл. 19.12.2023. – EDN PAAAQG.
3. Остриков А.Н., Клейменова Н.Л., Болгова И.Н. и др. Исследование теплофизических и реологических свойств пищевых растительных масел // Ползуновский вестник. – 2021. – № 2. – С. 36–43. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.005.
4. Шукрихудоёв Х.Д., Маджидов Х. Теплофизические свойства растительных масел и их растворов // Вестник педагогического университета (Естественных наук). – 2019. – №. 1–2. – С. 108–110. – EDN IODDWI.
5. Федоров А.В., Волков С.М., Прохорова Л.Т. и др. Исследование характера температурной зависимости удельной теплоемкости смесей рафинированного подсолнечного масла с токоферолами // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. – 2023. – № 1–2. – С. 30–33. – DOI: 10.25812/VNIIG.2023.16.12.005.
6. Остриков А.Н., Горбатова А.В., Копылов М.В. и др. Анализ теплофизических характеристик рапсового масла // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2017. – № 5 (19). – С. 107–112. – EDN YSFAYZ.
7. Габитов И.Р., Накипов Ш.А. [и др.]. Теплофизические свойства бинарной смеси этиловый спирт – рапсовое масло // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, №. 6. – С. 113–116. – EDN SBNGNX.
8. Мыслик М.И., Свистула А.Е. Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1–2. – С. 37–43.
9. Юсупов Ш.Т. Теплофизические и термодинамические свойства растительных масел и некоторых их растворов в широком интервале температур и давлений: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14 / Юсупов Шабони Тагоевич. – Казань, 2012. – 264 с. – EDN QFODND.
10. Contreras-Gallegos E. [et al.]. Specific heat of vegetable oils as a function of temperature obtained by adiabatic scanning calorimetry // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Т. 128. – P. 523–531. – DOI: 10.1007/s10973-016-5864-1.
11. Мазанов С.В., Зарипов З.И., Гумеров Ф.М. и др. Биодизельное топливо. Ч. II. Теплофизические свойства систем, участвующих в процессе получения биодизельного топлива с использованием рабочих сред в сверхкритическом флюидном состоянии // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2022. – № 5. – С. 35–60. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-5-35-60. – EDN SEYJZP.
12. Samanta A., Roy P.C. Pragmatic Analysis on Performance and Emission and a Single-Zone Engine Model Development with Inedible Neem and Waste Vegetable Oil Biodiesel Blend (B10) // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2021. – Vol. 22, № 1. – P. 53–89. – DOI: 10.1615/InterJEner-CleanEnv.2020035349.
13. Abedigamba O.P. [et al.]. Thermo-physical properties and thermal energy storage performance of two vegetable oils // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 61. – P. 106774. – DOI:10.1016/j.est.2023.106774.
14. Hoffmann J.F. [et al.]. Temperature dependence of thermophysical and rheological properties of seven vegetable oils in view of their use as heat transfer fluids in concentrated solar plants // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2018. – Vol. 178. – P. 129–138. – DOI: 10.1016/j.solmat.2017.12.037
15. Саранов И.А., Рудаков О.Б., Полянский К.К. и др. Дифференциальная сканирующая калориметрия жидких растительных масел // Химия растительного сырья. – 2020. – № 4. – С. 157–164. – DOI: 10.14258/jcprpm.2020047603 – EDN MNKKMM.
16. Santos J.C.O. [et al.]. Comparative study of specific heat capacities of some vegetable oils obtained by DSC and microwave oven // Journal of thermal analysis and calorimetry. – 2005. – Vol. 79. – P. 283–287.

17. *Акопян Х.Н.* Экспериментальные исследования получения СОЖ ультразвуковым эмульгированием растительных масел в воде и оценка эффективности их применения // Наука, техника и образование. – 2019. – № 4 (57). – С. 67–71. – EDN PUBSZQ.
18. *Singh H., Sharma V.S., Dogra M.* Exploration of graphene assisted vegetables oil based minimum quantity lubrication for surface grinding of TI-6AL-4V-ELI // Tribology International. – 2020. – Vol. 144. – P. 106113. – DOI:10.1016/j.triboint.2019.106113
19. *Zhang X. [et al.]*. Vegetable oil-based nanolubricants in machining: from physicochemical properties to application // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 36, N 1. – P. 76. – DOI:10.1186/s10033-023-00895-5.
20. *Zhou X. [et al.]*. Understanding microwave heating of oils // Journal of Food Engineering. – 2024. – Vol. 375. – P. 112039. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112039>
21. *Крылов В.А., Волков С.М., Баранов И.В. и др.* Исследование температурной зависимости удельной теплоемкости рафинированных растительных масел от содержания ненасыщенных жирных кислот триацилглицеринов // Вестник Международной академии холода. – 2024. – № 2 (91). – С. 43–49. – DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-43-49.
22. *Fedorov A., Volkov S., Novoselov A. et al.* Influence of Phosphatide Content in the Unrefined Sunflower Oil on Its Thermal and Rheological Properties // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 852. – P. 012032. – DOI: 10.1088/1755-1315/852/1/012032.
23. *Zhu X. [et al.]*. Prediction of liquid specific heat capacity of food lipids // Journal of food science. – 2018. – Vol. 83, N 4. – P. 992–997.

Bibliography

1. *Fedorov A.V., Baranov I.V., Tambulatova E.V. et al.* Investigating temperature dependence of refined sunflower oil specific heat capacity on its composition by the method of differential scanning calorimetry // Journal of International Academy of Refrigeration. – 2019. – N 1 (70). – P. 52–63. – DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-52-63.
2. Patent RU 2809805 C1 MPK C11B 1/10. Column apparatus for distillation of oil miscelles / Lisitsyn A.N. et al. Applicant: Federal State Budgetary Research Institution «All-Russian Scientific Research Institute of Fats». – Application N 2021120453: appl. 12.07.2021, publ. 19.12.2023 – EDN PAAAQG.
3. *Ostrikov A.N., Kleimenova N.L., Bolgova I.N. et al.* The research of thermophysical and rheological properties of edible vegetable oils // Polzunovskiy vestnik. – 2021. – N 2. – P. 36–43. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.005.
4. *Shukrikhudoev Kh.D., Madzhidov Kh.* Thermophysical properties of vegetable oils and their solutions // Herald of the Pedagogical University. – 2019. – N 1–2. – P. 108–110. – EDN IODDWI.
5. *Fedorov A.V., Volkov S.M., Prokhorov L.T. et al.* Investigation of the nature of the temperature dependence of the specific heat capacity of mixtures of refined sunflower oil with tocopherols // Vestnik of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats. – 2023. – N 1–2. – P. 30–33. – DOI: 10.25812/VNIIG.2023.16.12.005.
6. *Ostrikov A.N., Gorbatova A.V., Kopylov M.V. et al.* Analysis of thermophysical characteristics of rapeseed oil // Technologies for the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food. – 2017. – N 5 (19). – P. 107–112. – EDN YSFAYZ.
7. *Gabitov I.R., Nakipov S.F. [et al.]*. Thermal physical properties of binary mixture ethyl alcohol - rape oil // Herald of Technological University. – 2014. – Vol. 17, N 6. – P. 113–116. – EDN SBNGNX.
8. *Mysnik M.I., Svistula A.E.* Analysis of thermophysical properties of alternative fuels for internal combustion engines // Polzunovskiy vestnik. – 2009. – N 1–2. – P. 37–43.
9. *Yusupov Sh.T.* Thermophysical and thermodynamic properties of vegetable oils and some of their solutions in a wide range of temperatures and pressures: diss. ... Dr. Sc. Engineering (01.04.14.). – Kazan, 2012. – 264 p. – EDN QFODND.
10. *Contreras-Gallegos E. [et al.]*. Specific heat of vegetable oils as a function of temperature obtained by adiabatic scanning calorimetry // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Vol. 128. – P. 523–531. – DOI:10.1007/s10973-016-5864-1.

11. *Mazanov S.V., Zaripov Z.I., Gumerov F.M. et al.* Biodiesel fuel. Part II. Thermophysical properties of systems participated in the process of obtaining biodiesel fuel using working media in the supercritical fluid state // *Power engineering: research, equipment, technology.* – 2022. – N 5. – P. 35–60. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-5-35-60. – EDN SEYJZP.
12. *Samanta A., Roy P.C.* Pragmatic analysis on performance and emission and a single-zone engine model development with inedible neem and waste vegetable oil biodiesel blend (B10) // *International Journal of Energy for a Clean Environment.* – 2021. – Vol. 22, N 1. – P. 53–89. – DOI: 10.1615/InterJEner-CleanEnv.2020035349
13. *Abedigamba O.P. [et al.].* Thermo-physical properties and thermal energy storage performance of two vegetable oils // *Journal of Energy Storage.* – 2023. – Vol. 61. – P. 106774. – DOI: 10.1016/j.est.2023.106774.
14. *Hoffmann J.F. [et al.].* Temperature dependence of thermophysical and rheological properties of seven vegetable oils in view of their use as heat transfer fluids in concentrated solar plants // *Solar Energy Materials and Solar Cells.* – 2018. – Vol. 178. – P. 129–138. – DOI: 10.1016/j.solmat.2017.12.037
15. *Saranov I.A., Rudakov O.B., Polyanskiy K.K. et al.* Differential scanning calorimetry of liquid vegetable oils // *Chemistry of plant raw material.* – 2020. – N 4. – P. 157–164. – DOI: 10.14258/jcprm.2020047603. – EDN MNKKMM.
16. *Santos J.C.O. [et al.].* Comparative study of specific heat capacities of some vegetable oils obtained by DSC and microwave oven // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* – 2005. – Vol. 79. – P. 283–287.
17. *Akopyan Kh.N.* Experimental studies of the production of cutting coolant by ultrasonic emulsion of vegetable oils in water and evaluation of their application efficiency // *Science, technology and education.* – 2019. – N 4 (57). – P. 67–71. – EDN PUBSZQ.
18. *Singh H., Sharma V.S., Dogra M.* Exploration of graphene assisted vegetables oil based minimum quantity lubrication for surface grinding of TI-6AL-4V-ELI // *Tribology International.* – 2020. – Vol. 144. – P. 106113. – DOI:10.1016/j.triboint.2019.106113
19. *Zhang X. [et al.].* Vegetable oil-based nanolubricants in machining: from physicochemical properties to application // *Chinese Journal of Mechanical Engineering.* – 2023. – Vol. 36, N 1. – P. 76. – DOI:10.1186/s10033-023-00895-5.
20. *Zhou X. [et al.].* Understanding microwave heating of oils // *Journal of Food Engineering.* – 2024. – Vol. 375. – P. 112039. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112039>
21. *Krylov V.A., Volkov S.M., Baranov I.V. et al.* Research of the temperature dependence of the specific heat capacity of refined vegetable oils on the content of unsaturated fatty acids // *Journal of International Academy of Refrigeration.* – 2024. – N 2 (91). – P. 43–49. – DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-43-49. – EDN: PPTWGN.
22. *Fedorov A., Volkov S., Novoselov A. et al.* Influence of phosphatide content in the unrefined sunflower oil on its thermal and rheological properties // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2021. – Vol. 852. – P. 012032. – DOI: 10.1088/1755-1315/852/1/012032.
23. *Zhu X. [et al.].* Prediction of liquid specific heat capacity of food lipids // *Journal of Food Science.* – 2018. – Vol. 83, N 4. – P. 992–997.

DOI 10.53980/24131997_2025_1_112

Е.В. Ковтунец, канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, e-mail: kovtunets@binm.ru
Т.С. Спиридонова, канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: spiridonova@binm.ru
Ю.Л. Тушинова, канд. хим. наук, науч. сотрудник, доц., e-mail: tushinova@binm.ru
Ц.Т. Базарова, канд. хим. наук, вед. инженер, e-mail: basst@list.ru
А.В. Логвинова, инженер, e-mail: logvinova_alexandra@bk.ru
Б.Г. Базаров, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, доц., e-mail: bazbg@rambler.ru
Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ

УДК 544.2: 546.776

$K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$: ТЕРМИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ И ИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

По керамической технологии получено соединение состава $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$. Обнаружено, что соединение плавится incongruently при температуре 651 °С. Его кристаллическая структура уточнена методом Ритвельда. Показано, что проводимость $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ при 500 °С достигает значений $5,11 \cdot 10^{-4}$ См/см, что превышает проводимость аналогичных калиевых ранее исследованных тройных молибдатов. Термические деформации исследованы методом высокотемпературной порошковой рентгенографии в интервале температур 30–500 °С. Тройной молибдат $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ относится к материалам с высоким анизотропным тепловым расширением ($\alpha_V \sim 47 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Ключевые слова: калий, кальций, гафний, тройной молибдат, синтез, структура, термическое расширение, ионная проводимость.

E.V. Kovtunets, Cand. Sc. Physics and Mathematics, Research Scientist
T.S. Spiridonova, Cand. Sc. Chemistry, Senior Research Scientist
Yu.L. Tushinova, Cand. Sc. Chemistry, Research Scientist, Assoc. Prof.
Ts.T. Bazarova, Cand. Sc. Chemistry, Lead Engineer
A.V. Logvinova, Engineer
B.G. Bazarov, Dr. Sc. Physics and Mathematics, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.
Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude

$K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$: THERMAL DEFORMATIONS AND IONIC CONDUCTIVITY

Compound $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ was obtained using ceramic technology. The present study found that the compound melts incongruently at temperature of 651 °C. Its crystal structure was specified by the Rietveld method. It showed that the conductivity of $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ at 500 °C reached values of $5,11 \cdot 10^{-4}$ S/cm, which exceeds the conductivity of similar potassium ternary molybdates studied previously. Thermal deformations were studied by high-temperature powder X-ray diffraction in the temperature range of 30–500 °C. Ternary molybdate $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ belongs to materials with high anisotropic thermal expansion ($\alpha_V \sim 47 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Key words: potassium, calcium, hafnium, triple molybdate, synthesis, structure, thermal expansion, ionic conductivity.

Введение

Варьирование катионным составом, структурное многообразие, присущее молибдатам и вольфраматам, в сочетании с востребованными функциональными свойствами [1–4] открывают широкие возможности и делают их перспективными объектами современного материаловедения.

Так, взаимосвязь состав – структура – свойство для сложных молибдатов и вольфраматов раскрывается на примере представителей широко известных структурных типов, например, таких, как шеелит [5], NASICON [6], лионсит [7], аллюодит [8], глазерит [9], цеолитоподобные [10] и другие [11], которые проявляют ценные свойства: ионопроводящие [12], магнитные и антиферромагнитные [13–14], отрицательное термическое расширение [15], люминесцентные [16] и другие [17].

Несмотря на обилие исследований, касающихся ценных функциональных свойств двойных молибдатов, все еще ощущается недостаток информации о термическом расширении, электропроводности и характере ионной подвижности в тройных молибдатах.

Целью работы является изучение условий синтеза, уточнение кристаллической структуры, исследование электрических свойств и термических деформаций тройного молибдата $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных компонентов для синтеза использованы коммерчески доступные MoO_3 (х. ч.), HfO_2 (ос. ч.), $CaCO_3$ (ч. д. а.), K_2MoO_4 (х. ч.). $CaMoO_4$ получен взаимодействием $CaCO_3$ и MoO_3 по реакции $CaCO_3 + MoO_3 = CaMoO_4 + CO_2$. Молибдат гафния получен по реакции: $HfO_2 + 2 MoO_3 = Hf(MoO_4)_2$. Режим синтеза молибдатов: 450–750 °С, время прокаливания 50–60 ч. В процессе синтеза образцы неоднократно перетирали в среде этилового спирта. Фазовая чистота полученных образцов была подтверждена методом порошковой рентгеновской дифракции (PXRD). Рентгенограммы K_2MoO_4 , $CaMoO_4$ и $Hf(MoO_4)_2$ соответствовали литературным данным [18].

Тройной молибдат $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ получен методом твердофазной реакции ступенчатым отжигом в интервале температур 350–550 °С в течение 100 ч. В качестве исходных компонентов использованы K_2MoO_4 , $Hf(MoO_4)_2$ и $CaMoO_4$. Смеси простых молибдатов были взяты в мольных соотношениях 5:1:3. Отжиг чередовали с диспергированием на каждом этапе.

Процессы твердофазного синтеза и фазового равновесия контролировали по дифрактограммам, снятым на дифрактометре D8 ADVANCE Bruker (детектор VANTEC, $CuK\alpha$ -излучение, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, геометрия отражения, вторичный монохроматор). Данные РФА собирали при 296 К в диапазоне $2\theta = 7\text{--}100^\circ$ с шагом $0,02076^\circ$.

Уточнение Ритвельда проводили с помощью программы TOPAS 4.2 [19].

Дополнительно методом порошковой рентгеновской дифракции исследовано высокотемпературное поведение тройных молибдатов $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$. Измерения проводили методом высокотемпературной порошковой рентгеновской дифракции (HT-PXRD) на дифрактометре Bruker AXS D8 ADVANCE ($CuK\alpha$ -излучение, геометрия Брэгга – Brentano, детектор Vantec-1 PSD) с использованием высокотемпературной камеры Anton Paar HTK16 в диапазоне 30–550 °С с шагом 50 °С. Каждый мелкоизмельченный образец наносился на платиновый держатель образцов из этанольной суспензии. Перед измерениями для контроля 2θ -поправки использовался внешний Si-стандарт. Параметры элементарной ячейки рассчитывались с помощью пакета программ Topas 4.2 [19], а визуализация и расчет тензора параметров теплового расширения выполнялись с использованием пакета программ TTT [20]. Температурная зависимость параметров элементарной ячейки аппроксимировалась полиномами первой и второй степени. По полученным данным были рассчитаны главные значения тензора теплового расширения и построены сечения фигуры коэффициентов теплового расширения.

Термоанализатор STA 449 F1 Jupiter (NETZSCH) применялся для термической характеристики целевых соединений с точки зрения термогравиметрических (ТГА) и дифференциально-сканирующих калориметрических (ДСК) исследований. Термический анализ проводился в интервале температур 30–800 °С в токе аргона со скоростью 10 °С/мин. Применение термопары Pt–PtRh позволило добиться точности измерения температуры $\pm 1^\circ$. При измерениях использовались платиновые тигли. Поправку на дрейф применяли на основе данных пустого тигля.

Для изучения ионопроводящих свойств $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ применяли керамические образцы в виде таблеток диаметром 9 мм и высотой 1,9 мм, на плоские поверхности которых наносили платиновые электроды. Электропроводность измеряли в температурном интервале 100–500 °С двухконтактным методом импедансной спектроскопии при нагревании и охлаждении со скоростью 2 град/мин в диапазоне частот 1–10⁶ Гц (импедансметр «Z-1500J»).

Результаты исследования и их обсуждение

Уточнение структуры $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$. Все пики, в соединении $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$, были проиндексированы в тригональной ячейке (пр. гр. $R\bar{3}c$) с параметрами, близкими к $Rb_5Co_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ [21], чьи параметры элементарной ячейки и положения атомов использовали в качестве стартовой модели для уточнения структуры методом Ритвельда. Для описания формы пиков использовали функцию Пирсона VII. Уточнение проводили путем постепенного добавления уточняемых параметров с одновременным графическим моделированием фона. С целью сокращения количества уточняемых параметров параметры изотропного смещения (B_{iso}) для атомов Mo, K, уточняли независимо, для атомов Hf/Ca и O принимали эквивалентными.

Уточнение было стабильным и давало низкие R-факторы. Результаты уточнения, полученные для $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ представлены в таблице 1, основные межатомные расстояния в таблице 2, координаты атомов и параметры изотропного смещения в таблице 3, а расчетная и экспериментальная рентгенограммы с разностной кривой показаны на рисунке 1.

Кристаллографические данные $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ депонированы в Кембриджском центре кристаллографических данных (номер депонирования CSD 2395500). Данные доступны для загрузки на веб-сайте (www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

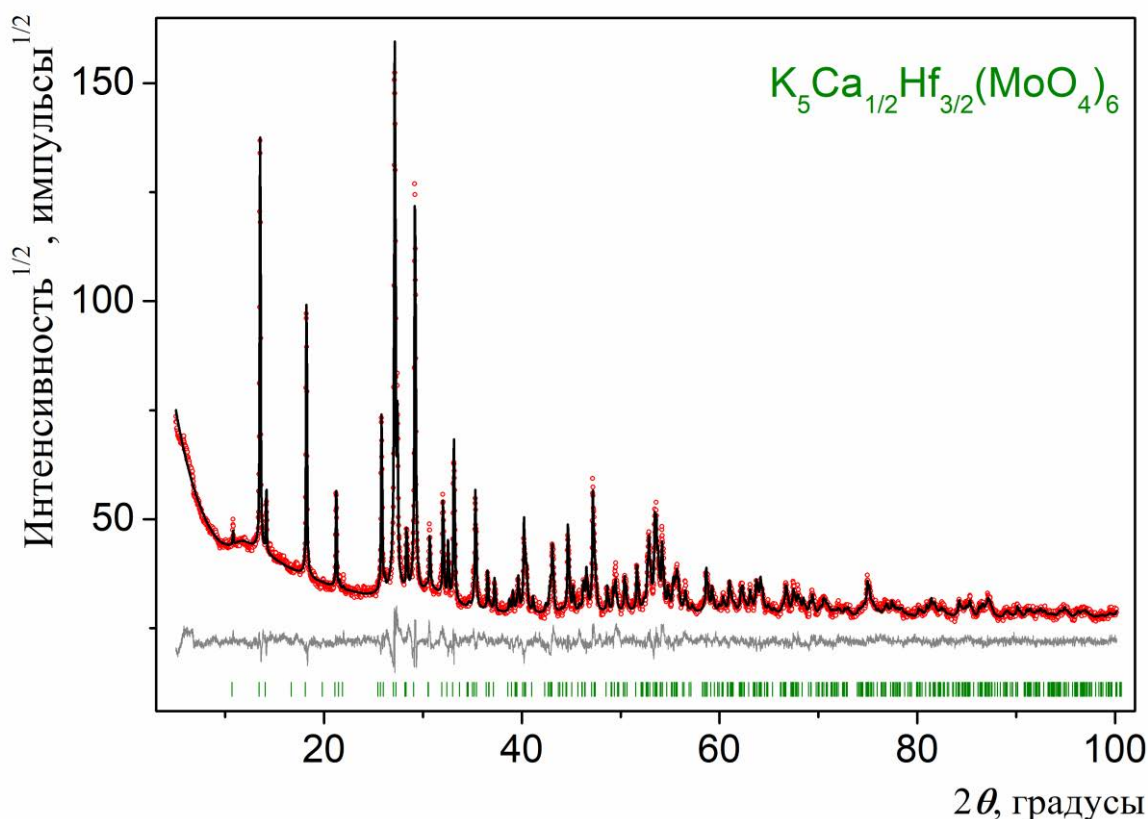


Рисунок 1 – Экспериментальная (кружки), вычисленная (линия), разностная и штрихрентгенограммы $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Таблица 1
Кристаллографические характеристики и параметры уточнения структуры $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Показатель	$K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$
Пр. гр.	Тригональная, $R\bar{3}c$
$a, \text{Å}$	10,63717 (15)
$c, \text{Å}$	37,8406 (8)
$V, \text{Å}^3$	3708,01 (13)
Z	6
2θ -интервал, °	10–100
$R_{wp}, \%$	5,512
$R_p, \%$	4,171
$R_{exp}, \%$	2,825
χ^2	1,951
$R_B, \%$	2,258

Таблица 2
Основные межатомные расстояния (Å) в кристаллической структуре $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Межатомные расстояния	Длина связи, Å	Межатомные расстояния	Длина связи, Å
Тетраэдр MoO_4		Полиэдр $K1O_9$	
Mo–O1	1,749(27)	K1–O2	3,251(19) × 3
Mo–O2	1,892(17)	K1–O3	2,663(19) × 3
Mo–O3	1,811(26)	K1–O4	2,885(13) × 3
Mo–O4	1,711(16)	Полиэдр $K2O_{12}$	
$\langle Mo(1)–O \rangle$	1,791	K2–O1	3,186(18) × 2
Октаэдр $(Ca1/Hf1)O_6$		K2–O1'	3,554(21) × 2
		K2–O2	2,957(25) × 2
(Ca1/Hf1)–O1	2,266(17) × 6	K2–O3	3,037(25) × 2
Октаэдр $(Ca2/Hf2)O_6$		K2–O3'	3,364(18) × 2
(Ca2/Hf2)–O2	2,038(18) × 6	K2–O4	2,823(16) × 2

Таблица 3
Относительные координаты и параметры атомного смещения (Å²) $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Атом	x	y	z	B_{iso}	Заселенность
Ca1/Hf1	0	0	0	0,42 (8)	$Ca_{0,15}Hf_{0,85}$
Ca2/Hf2	0	0	1/4	0,42 (8)	$Ca_{0,35}Hf_{0,65}$
Mo	0,3534 (4)	0,0574 (3)	0,03323 (8)	1,62 (7)	
K1	0	0	0,3540 (3)	2,9 (4)	
K2	0,3792 (10)	0	1/4	2,6 (3)	
O1	0,185 (2)	0,047 (2)	0,0374 (5)	3,0 (3)	
O2	0,484 (2)	0,241 (2)	0,0528 (4)	3,0 (3)	
O3	0,347 (3)	0,897 (2)	0,0519 (5)	3,0 (3)	
O4	0,398 (2)	0,065 (2)	0,9895 (4)	3,0 (3)	

Термический анализ. Термическое поведение $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ исследовали совместными методами ТГА и ДСК. Как показано на рисунке 2, кривая ДСК демонстрирует два эндотермических эффекта с максимумами при 540 °С и интенсивный 651 °С, который соответствует плавлению. На кривой ТГ потеря веса не наблюдается. По данным рентгенофазового анализа ДСК-образец $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ (подвергнутый плавлению) состоял из фаз $CaMoO_4$, HfO_2 , $K_2Mo_4O_{13}$. Таким образом, методами ДТА и РФА установлено, что полученный тройной молибдат $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ плавился с разложением. Для определения природы эндотермического эффекта, наблюдаемого при 540 °С, образец был снят в режиме «нагрев – охлаждение»

в диапазоне температур 450–600 °С (без плавления). При охлаждении $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ появился экзотермический эффект при 523 °С. Полученный температурный гистерезис составил 17 °С. Таким образом, было обнаружено существование обратимого фазового перехода (тип I) в диапазоне 518–554 °С.

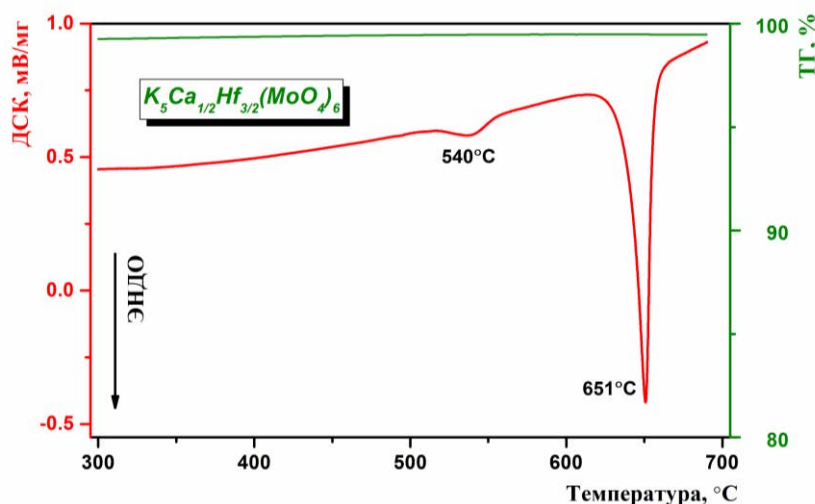


Рисунок 2 – ТГ и ДСК-кривая $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Электропроводность. На рисунке 3 представлена температурная зависимость проводимости (нагревание – охлаждение) для $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$. Видно, что в исследуемом температурном интервале (100–500 °С) его проводимость монотонно возрастала без отчетливых изломов и явного гистерезиса, что согласуется с данными дифференциальной сканирующей калориметрии и высокотемпературной рентгенографией. Значения проводимости изменялись от порядка 10^{-7} ($E_a = 0,6$ эВ) до 10^{-4} ($E_a = 0,8$ эВ). Годографы импеданса при различных температурах имели вид, типичный для ионных проводников с блокирующими электродами (рис. 4) [22, 23]. В таблице 4 для сравнения показаны значения проводимости для изоструктурного тройного молибдата $K_5Mg_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ [22]. Ионные радиусы магния и кальция ($KЧ = 6$) были равны соответственно 0,72 и 1,0 Å [24]. Большой ионный радиус кальция, по-видимому, приводил к увеличению размеров полостей трехмерного каркаса, что способствовало улучшению транспорта ионов-носителей и увеличению проводимости.

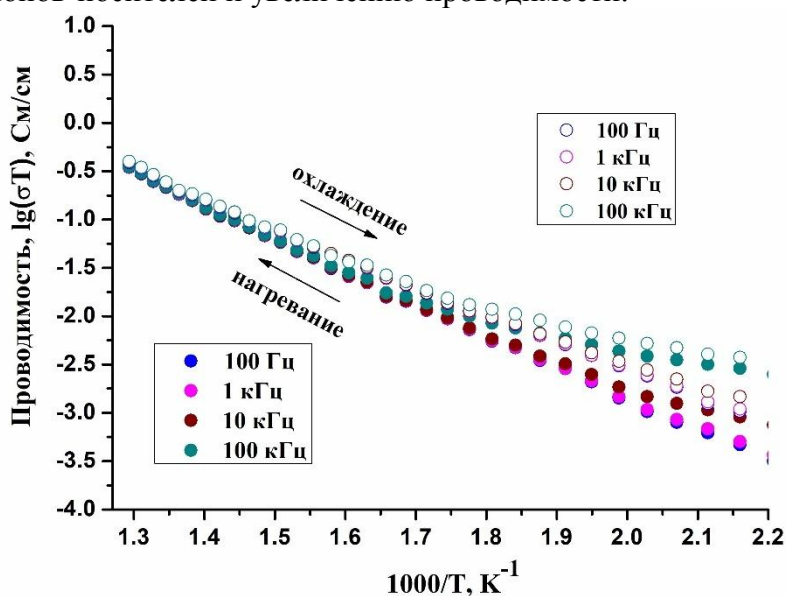


Рисунок 3 – Температурная зависимость проводимости $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Таблица 4

Проводимость тройных молибдатов $K_5A_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Соединение	Проводимость, См/см (300 °С)	Проводимость, См/см (400 °С)	Проводимость, См/см (500 °С)
$K_5Mg_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ [21]	$3,81 \cdot 10^{-5}$	$4,12 \cdot 10^{-5}$	$4,22 \cdot 10^{-5}$
$K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ *	$1,76 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$5,11 \cdot 10^{-4}$

* – данные, полученные в настоящей работе

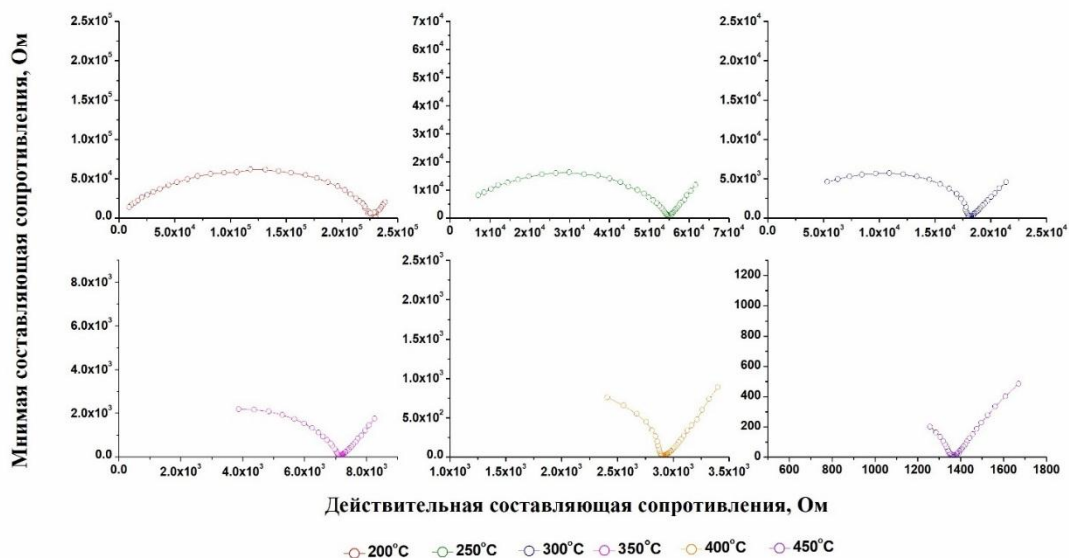


Рисунок 4 – Годографы импеданса $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

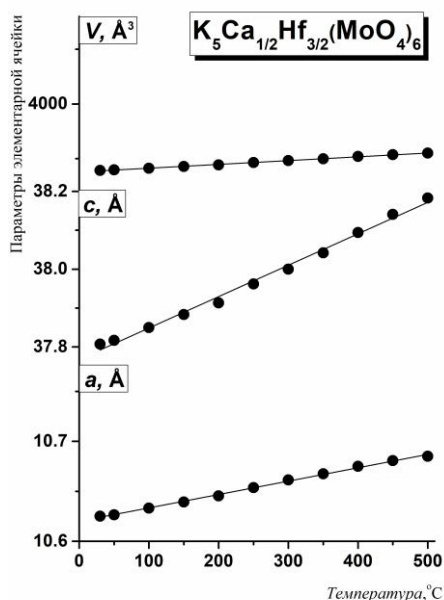


Рисунок 5 – Зависимости от температуры параметров элементарной ячейки $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Термическое расширение $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$. Методом высокотемпературной рентгенографии изучены термические деформации $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$. Показано, что элементарная ячейка расширяется анизотропно и характеризуется наибольшим расширением структуры вдоль кристаллографической оси c (рис. 5, табл. 5).

Таблица 5

Параметры элементарной ячейки $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Температура, °С	Параметр элементарной ячейки $a, \text{Å}$	Параметр элементарной ячейки $c, \text{Å}$	Объем элементарной ячейки $V, \text{Å}^3$
30	10,625(1)	37,807(5)	3696,2(1)
50	10,6265(7)	37,817(4)	3698,3(6)
100	10,6331(6)	37,850(4)	3706,1(6)
150	10,6392(6)	37,883(4)	3713,6(5)
200	10,6455(6)	37,913(3)	3720,9(5)
250	10,6536(6)	37,962(4)	3731,4(6)
300	10,6614(6)	38,000(4)	3740,6(5)
350	10,6675(6)	38,042(3)	3749,0(5)
400	10,6749(6)	38,094(3)	3759,4(5)
450	10,6807(6)	38,141(4)	3768,1(6)
500	10,6851(7)	38,183(4)	3775,4(6)

Коэффициенты термического расширения (КТР) при разной температуре (табл. 7) вычислялись с использованием уравнений аппроксимации кривых зависимостей параметров и объема элементарной ячейки от температуры (табл. 6). Фигура тензора теплового расширения была сопоставлена с элементарной ячейкой структуры $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$ на рисунке 6.

Таблица 6

Температурные зависимости параметров элементарной ячейки аппроксимировались полиномом первой степени $a_0 + a_1 \times 10^{-3}t$ в температурном диапазоне 30–500 °С

Параметры элементарной ячейки	Коэффициент полинома, a_0	Коэффициент полинома, a_1	Фактор достоверности, R^2
a	10,6197(7)	0,135(2)	1,00000
c	37,764(7)	0,82(2)	1,00000
V	3688,1(8)	175(3)	1,00000

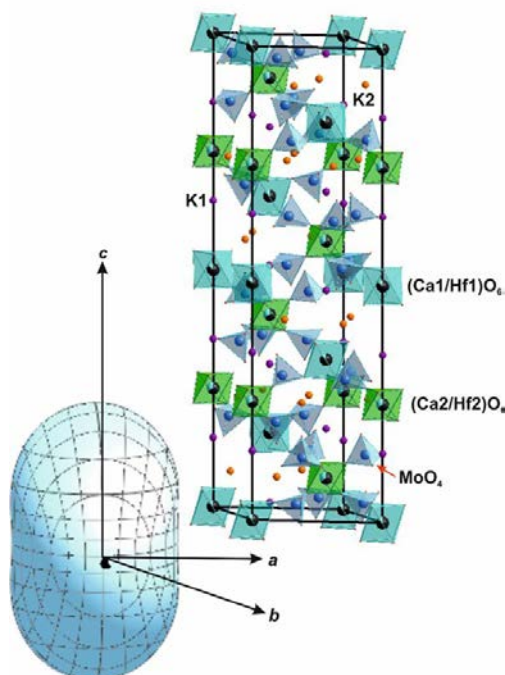


Рисунок 6 – Фигура тензора теплового расширения, сопоставленная с элементарной ячейкой $K_5Ca_{0,5}Hf_{1,5}(MoO_4)_6$

Значения КТР во всем исследуемом температурном диапазоне практически не менялись и составили $\alpha_a \sim 13 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_c \sim 22 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $\alpha_v \sim 47 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Полученные результаты позволили отнести исследованный тройной молибдат к сильно расширяющимся соединениям [25]. Анизотропия термического расширения у $\text{K}_5\text{Ca}_{0,5}\text{Hf}_{1,5}(\text{MoO}_4)_6$ была проявлена слабо, соотношение $\alpha_{\text{max}}/\alpha_{\text{min}} \sim 1,7$ и сохранялось во всем температурном диапазоне (см. табл. 7).

Каркасную структуру $\text{K}_5\text{Ca}_{0,5}\text{Hf}_{1,5}(\text{MoO}_4)_6$ можно было описать как псевдослоистую. В этом случае двумерный квазислой формировался из $(\text{Ca1}/\text{Hf1})\text{O}_6$ -октаэдров соединяющихся посредством общих кислородных вершин с молибденовыми тетраэдрами, пустоты в котором были заняты атомами К1 и располагались перпендикулярно оси *c*. Межслоевое пространство было заполнено октаэдрами $(\text{Ca}_2/\text{Hf}_2)\text{O}_6$ и атомами К2 (рис. 6). Используя концепцию «жестких структурных элементов» (RUM) [26], можно объяснить анизотропию наличием вдвое большего количества относительно «мягких» CaO_6 -октаэдров и отсутствием «жестких» MoO_4 -тетраэдров в межслоевом пространстве.

Таблица 7

Коэффициенты термического расширения ($\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

Температура, $^\circ\text{C}$	КТЛР, α_a	КТЛР, α_c	Степень анизотропии, $\alpha_{\text{max}}/\alpha_{\text{min}}$	Объемный КТЛР, α_v
30	12,7(2)	21,6(6)	1,7	47,0(8)
50	12,7(2)	21,6(6)	1,7	47,0(8)
100	12,7(2)	21,6(6)	1,7	47,0(8)
150	12,7(2)	21,5(6)	1,7	46,9(8)
200	12,7(2)	21,5(6)	1,7	46,9(8)
250	12,7(2)	21,5(6)	1,7	46,9(8)
300	12,7(2)	21,5(6)	1,7	46,8(8)
350	12,7(2)	21,5(6)	1,7	46,8(8)
400	12,7(2)	21,4(6)	1,7	46,7(8)
450	12,7(2)	21,4(6)	1,7	46,7(8)
500	12,6(2)	21,4(6)	1,7	46,7(8)

Заключение

Тройной молибдат $\text{K}_5\text{Ca}_{0,5}\text{Hf}_{1,5}(\text{MoO}_4)_6$ был получен твердофазной реакцией, его структура уточнена методом Ритвелда с использованием в качестве стартовых параметров кристаллографических данных $\text{Rb}_5\text{Co}_{0,5}\text{Hf}_{1,5}(\text{MoO}_4)_6$ [21]. Полученное соединение кристаллизуется в пр. гр. $R\bar{3}c$ и с изоформульными аналогами $M^I_5M^{II}_{0,5}M^{IV}_{1,5}(\text{MoO}_4)_6$ ($M^I = \text{K, Rb, Tl}$; $M^{II} = \text{Ni, Mg, Cu, Zn, Co, Mn, Cd, Sr, Ca, Pb}$; $M^{IV} = \text{Zr, Hf}$) относится к цеолитоподобным тройным молибдатам [21], многие из которых обладают заметной ионной проводимостью при повышенных температурах. В настоящей работе изучены ионопроводящие свойства $\text{K}_5\text{Ca}_{0,5}\text{Hf}_{1,5}(\text{MoO}_4)_6$ и показано, что при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ значения проводимости достигают $5,11 \cdot 10^{-4} \text{ См/см}$ при $E_a = 0,8 \text{ эВ}$.

Термическое поведение $\text{K}_5\text{Ca}_{0,5}\text{Hf}_{1,5}(\text{MoO}_4)_6$ было изучено методами ДСК, ТГ и высокотемпературной рентгенографией. Установлено, что тройной молибдат плавится с разложением при $651 \text{ }^\circ\text{C}$. Наблюдаемый на кривой ДСК эндотермический эффект при $540 \text{ }^\circ\text{C}$ может быть отнесен к фазовым переходам первого рода. Наблюдаемая анизотропия термического расширения может быть обусловлена наличием вдвое большего количества относительно «мягких» CaO_6 -октаэдров и отсутствием «жестких» MoO_4 -тетраэдров в межслоевом пространстве. Полученное значение объемного коэффициента термического расширения α_v ($\text{K}_5\text{Ca}_{0,5}\text{Hf}_{1,5}(\text{MoO}_4)_6$) = $47 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ позволяет отнести исследованный тройной молибдат к сильно расширяющимся соединениям.

Благодарности: исследования методами порошковой рентгеновской дифракции, термического анализа, HT-XRD и проводимости выполнены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием БИП СО РАН.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 23-29-00327).

Библиография

1. Wang J., Luo L., Huang B. et al. The preparation and optical properties of novel $\text{LiLa}(\text{MoO}_4)_2:\text{Sm}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ red phosphor // *Materials*. – 2018. – Vol. 11 (2). – P. 297. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma11020297>
2. Nasri R., Larbi T., Amlouk M. et al. Investigation of the physical properties of $\text{K}_2\text{Co}_2(\text{MoO}_4)_3$ for photocatalytic application // *J Mater Sci: Mater Electron*. – 2018. – Vol. 29. – P. 18372–18379. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9951-x>
3. Spiridonova T.S., Solodovnikov S.F., Molokeev M.S. et al. Synthesis, crystal structures, and properties of new acentric glaserite-related compounds $\text{Rb}_7\text{Ag}_{5-3x}\text{Sc}_{2+x}(\text{XO}_4)_9$ ($X = \text{Mo}, \text{W}$) // *J. Solid State Chem*. – 2022. – Vol. 305. – P. 122638. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122638>
4. Solodovnikov S.F., Solodovnikova Z.A., Zolotova E.S. et al. Nonstoichiometry in the systems $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--MMoO}_4$ ($M = \text{Co}, \text{Cd}$), crystal structures of $\text{Na}_{3.36}\text{Co}_{1.32}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{Na}_{3.13}\text{Mn}_{1.43}(\text{MoO}_4)_3$ and $\text{Na}_{3.72}\text{Cd}_{1.14}(\text{MoO}_4)_3$, crystal chemistry, compositions and ionic conductivity of alluaudite-type double molybdates and tungstates // *J. Solid State Chem*. – 2017. – Vol. 253. – P. 121–128. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.05.031>
5. Xu D., Zhang H., Pang L. et al. Novel B-site scheelite structure ceramic $\text{Bi}(\text{Ge}_{0.5}\text{Mo}_{0.5})\text{O}_4$ and its dielectric properties // *J. Am. Ceram. Soc*. – 2023. – Vol. 106 (11). – P. 6675–6683. – URL: <https://doi.org/10.1111/jace.19282>
6. Buzlukov A.L., Fedorov D.S., Serdtsev A.V. et al. Ion mobility in triple sodium molybdates and tungstates with a NASICON structure // *J. Exp. Theor. Phys*. – 2022. – Vol. 134. – P. 42–50. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063776122010071>
7. Bugaris D.E., Loye H.-C. $\text{Li}_3\text{Al}(\text{MoO}_4)_3$, a lyonsite molybdate // *Acta Cryst. C*. – 2012. – Vol. C68. – P. i34–i36. – URL: <https://doi.org/10.1107/S0108270112020513>
8. Solodovnikov S.F., Gulyaeva O.A., Savina A.A. et al. Molybdates and tungstates of the alluaudite family: crystal chemistry, composition, and ionic mobility // *J. Struct. Chem*. – 2022. – Vol. 63. – P. 1101–1133. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0022476622070071>
9. Spiridonova T.S., Solodovnikov S.F., Molokeev M.S. et al. Synthesis, crystal structures, and properties of new acentric glaserite-related compounds $\text{Rb}_7\text{Ag}_{(5-3x)}\text{Sc}_{(2+x)}(\text{XO}_4)_9$ ($X = \text{Mo}, \text{W}$) // *J. Solid State Chem*. – 2022. – Vol. 305. – P. 122638. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122638>
10. Ковтунец Е.В., Тушинова Ю.Л., Логвинова А.В. и др. Термическое расширение тройного молибдата $\text{K}_5[\text{Mn}_{0.5}\text{Zr}_{1.5}](\text{MoO}_4)_6$ // *Вестник ВСГУТУ*. – 2024. – № 3 (94). – С. 90–97. – doi.org/10.53980/24131997_2024_3_90
11. Grossman V.G., Molokeev M.S., Bazarov B.G. et al. Synthesis and characterization of a new magnesium molybdates $\text{Tl}_{1.85}\text{Mg}_{0.15}\text{Mg}_2(\text{MoO}_4)_3$ ($M = \text{K}, \text{Rb}$) with a langbeinite type structure // *Solid State Sci*. – 2023. – Vol. 142. – P. 107249. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107249>
12. Grossman V.G., Molokeev M.S., Bazarov B.G. et al. Potassium and thallium conductors with a trigonal structure in the $\text{M}_2\text{MoO}_4\text{--Cr}_2(\text{MoO}_4)_3\text{--Hf}(\text{MoO}_4)_2$ ($M = \text{K}, \text{Tl}$) systems: synthesis, structure, and ionic conductivity // *J. Alloys Compd*. – 2021. – Vol. 873. – P. 159828. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159828>
13. Chimitova O.D., Bazarov B.G., Bazarova J.G. et al. The crystal growth and properties of novel magnetic double molybdate $\text{RbFe}_5(\text{MoO}_4)_7$ with mixed $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ states and 1D negative thermal expansion // *CrystEngComm*. – 2021. – Vol. 23. – P. 3297–3307. – URL: <https://doi.org/10.1039/D1CE00118C>
14. Liu M., Zhang Y., Zou T. et al. Antiferromagnetism of double molybdate $\text{LiFe}(\text{MoO}_4)_2$ // *Inorg. Chem*. – 2020. – Vol. 59. – P. 8127–8133. – URL: <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c00432>
15. Kovtunets E., Tushinova Yu., Bazarov B. et al. $\text{Ho}_2\text{Zr}(\text{MoO}_4)_5$ – A novel double molybdate with negative thermal expansion // *Solid State Sci*. – 2024. – Vol. 150. – P. 107482. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2024.107482>
16. Spassky D., Vasil'ev A., Jamal M.U. et al. Temperature dependent energy transfer to Eu^{3+} emission centres in $\text{K}_5\text{Eu}(\text{MoO}_4)_4$ crystals // *CrystEngComm*. – 2024. – Vol. 26 (8). – P. 1106–1116. – URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D3CE01201H>

17. *Tsyrenova G.D., Pavlova E.T., Solodovnikov S.F. et al.* New ferroelastic $K_2Sr(MoO_4)_2$: synthesis, phase transitions, crystal and domain structures, ionic conductivity // *J. Solid State Chem.* – 2016. – Vol. 237. – P. 64–71. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.01.011>
18. ICDD PDF-2 Database, Cards № 01-072-0735, 01-070-2019, 01-077-2238.
19. *Coelho A.A.* TOPAS and TOPAS-Academic: an optimization program integrating computer algebra and crystallographic objects written in C++ // *Journal of Applied Crystallography.* – 2018. – Vol. 51. – P. 210–218. – URL: <https://doi.org/10.1107/S1600576718000183>
20. *Bubnova R.S., Firsova V.A., Filatov S.K.* Software for determining the thermal expansion tensor and the graphic representation of its characteristic surface (theta to tensor-TTT) // *Glass Physics and Chemistry.* – 2013. – Vol. 39. – P. 347–350. – URL: <https://doi.org/10.1134/S108765961303005X>
21. *Aksenov S.M., Pavlova E.T., Popova N.N. et al.* Stoichiometry and topological features of triple molybdates $A_xB_yC_z(MoO_4)_n$ with the heteropolyhedral open MT-frameworks: Synthesis, crystal structure of $Rb_5\{Hf_{1.5}Co_{0.5}(MoO_4)_6\}$, and comparative crystal chemistry // *Solid State Sci.* – 2024. – Vol. 151. – P. 107525. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2024.107525>
22. *Grossman V.G., Molokeev M.S., Bazarova J.G. et al.* High ionic conductivity of $K_{5-x}Tl_x(Mg_{0.5}Hf_{1.5})(MoO_4)_6$ ($0 \leq x \leq 5$) solid solutions // *Solid State Sci.* – 2022. – Vol. 134. – P. 107027. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2022.107027>
23. *Savina A.A., Khaikina E.G., Solodovnikov S.F. et al.* New alluaudite-related triple molybdates $Na_{25}Cs_8R_5(MoO_4)_{24}$ ($R = Sc, In$): Synthesis, crystal structures and properties // *New J. Chem.* – 2017. – Vol. 41. – P. 5450–5457. – URL: <https://doi.org/10.1039/c7nj00202e>
24. *Shannon R.D.* Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Crystallographica.* – 1976. – Vol. 32. – P. 751–767. – URL: <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
25. *Pet'kov V.I., Shipilov A.S., Sukhanov M.V.* Thermal Expansion of $MZr_2(AsO_4)_3$ and $MZr_2(TO_4)_x(PO_4)_{3-x}$ ($M = Li, Na, K, Rb, Cs$; $T = As, V$) // *Inorganic Materials.* – 2015. – Vol. 51 (11). – P. 1079–1085. – URL: <https://doi.org/10.1134/S002016851510012X>
26. *Petrushina M.Y., Korenev S.V., Dedova E.S. et al.* Materials AM_2O_8 ($A = Zr, Hf$; $M = W, Mo$) with negative thermal expansion // *J. Struct. Chem.* – 2020. – Vol. 61. – P. 1655–1680. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0022476620110013>

Bibliography

1. *Wang J., Luo L., Huang B. et al.* The preparation and optical properties of novel $LiLa(MoO_4)_2:Sm^{3+},Eu^{3+}$ red phosphor // *Materials* – 2018. – Vol. 11 (2). – P. 297. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma11020297>
2. *Nasri R., Larbi T., Amlouk M. et al.* Investigation of the physical properties of $K_2Co_2(MoO_4)_3$ for photocatalytic application // *Journal of Material Science: Materials in Electronics* – 2018. – Vol. 29. – P. 18372–18379. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9951-x>
3. *Spiridonova T.S., Solodovnikov S.F., Molokeev M.S. et al.* Synthesis, crystal structures, and properties of new acentric glaserite-related compounds $Rb_7Ag_{5-3x}Sc_{2+x}(XO_4)_9$ ($X = Mo, W$) // *Journal of Solid State Chemistry*, 2022. – Vol. 305. – P. 122638. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122638>
4. *Solodovnikov S.F., Solodovnikova Z.A., Zolotova E.S. et al.* Nonstoichiometry in the systems $Na_2MoO_4-MMoO_4$ ($M = Co, Cd$), crystal structures of $Na_3.36Co_{1.32}(MoO_4)_3$, $Na_3.13Mn_{1.43}(MoO_4)_3$ and $Na_3.72Cd_{1.14}(MoO_4)_3$, crystal chemistry, compositions and ionic conductivity of alluaudite-type double molybdates and tungstates // *Journal of Solid State Chemistry.* – 2017. – Vol. 253. – P. 121–128. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.05.031>
5. *Xu D., Zhang H., Pang L. et al.* Novel B-site scheelite structure ceramic $Bi(Ge_{0.5}Mo_{0.5})O_4$ and its dielectric properties // *Journal of American Ceramic Society.* – 2023. – Vol. 106 (11). – P. 6675–6683. – URL: <https://doi.org/10.1111/jace.19282>
6. *Buzlukov A.L., Fedorov D.S., Serdtsev A.V et al.* Ion mobility in triple sodium molybdates and tungstates with a NASICON structure // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* – 2022. – Vol. 134. – P. 42–50. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063776122010071>
7. *Bugaris D.E., Loyer H.-C.* $Li_3Al(MoO_4)_3$, a lyonsite molybdate // *Acta Crystallographica Section C.* – 2012. – Vol. C68. – P. i34–i36. – URL: <https://doi.org/10.1107/S0108270112020513>
8. *Solodovnikov S.F., Gulyaeva O.A., Savina A.A. et al.* Molybdates and tungstates of the alluaudite family: crystal chemistry, composition, and ionic mobility // *Journal of Structural Chemistry.* – 2022. – Vol. 63. – P. 1101–1133. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0022476622070071>

9. *Spiridonova T.S., Solodovnikov S.F., Molokeev M.S. et al.* Synthesis, crystal structures, and properties of new acentric glaserite-related compounds $\text{Rb}_7\text{Ag}(5-3x)\text{Sc}(2+x)(\text{XO}_4)_9$ ($X = \text{Mo}, \text{W}$) // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2022. – Vol. 305. – P. 122638. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122638>
10. *Kovtunets E.V., Tushinova Yu.L., Logvinova A.V. et al.* Thermal expansion of ternary molybdate $\text{K}_5[\text{Mn}_0.5\text{Zr}_{1.5}](\text{MoO}_4)_6$ // *ESSUTM Bulletin*. – 2024. – N 3 (94). – P. 90–97. – doi.org/10.53980/24131997_2024_3_90
11. *Grossman V.G., Molokeev M.S., Bazarov B.G. et al.* Synthesis and characterization of a new magnesium molybdates $\text{Tl}_1.85\text{M}_0.15\text{Mg}_2(\text{MoO}_4)_3$ ($M = \text{K}, \text{Rb}$) with a langbeinite type structure // *Solid State Science*. – 2023. – Vol. 142. – P. 107249. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107249>
12. *Grossman V.G., Molokeev M.S., Bazarov B.G. et al.* Potassium and thallium conductors with a trigonal structure in the $\text{M}_2\text{MoO}_4\text{--Cr}_2(\text{MoO}_4)_3\text{--Hf}(\text{MoO}_4)_2$ ($M = \text{K}, \text{Tl}$) systems: synthesis, structure, and ionic conductivity // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 873. – P. 159828. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159828>.
13. *Chimitova O.D., Bazarov B.G., Bazarova Zh.G. et al.* The crystal growth and properties of novel magnetic double molybdate $\text{RbFe}_5(\text{MoO}_4)_7$ with mixed $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ states and 1D negative thermal expansion // *CrystEngComm*. – 2021. – Vol. 23. – P. 3297–3307. – URL: <https://doi.org/10.1039/D1CE00118C>
14. *Liu M., Zhang Y., Zou T. et al.* Antiferromagnetism of double molybdate $\text{LiFe}(\text{MoO}_4)_2$ // *Inorganic Chemistry*. – 2020. – Vol. 59. – P. 8127–8133. – URL: <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c00432>
15. *Kovtunets E., Tushinova Yu., Bazarov B. et al.* $\text{Ho}_2\text{Zr}(\text{MoO}_4)_5$ – A novel double molybdate with negative thermal expansion // *Solid State Science*. – 2024. – Vol. 150. – P. 107482. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2024.107482>
16. *Spassky D., Vasilyev A., Jamal M.U. et al.* Temperature dependent energy transfer to Eu^{3+} emission centres in $\text{K}_5\text{Eu}(\text{MoO}_4)_4$ crystals // *CrystEngComm*. – 2024. – Vol. 26 (8). – P. 1106–1116. – URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D3CE01201H>
17. *Tsyrenova G.D., Pavlova E.T., Solodovnikov S.F. et al.* New ferroelastic $\text{K}_2\text{Sr}(\text{MoO}_4)_2$: synthesis, phase transitions, crystal and domain structures, ionic conductivity // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2016. – Vol. 237. – P. 64–71. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.01.011>
18. ICDD PDF-2 Database, Cards N 01-072-0735, 01-070-2019, 01-077-2238.
19. *Coelho A.A.* TOPAS and TOPAS-Academic: an optimization program integrating computer algebra and crystallographic objects written in C++ // *Journal of Applied Crystallography*. – 2018. – Vol. 51. – P. 210–218. – URL: <https://doi.org/10.1107/S1600576718000183>
20. *Bubnova R.S., Firsova V.A., Filatov S.K.* Software for determining the thermal expansion tensor and the graphic representation of its characteristic surface (theta to tensor-TTT) // *Glass Physics and Chemistry*. – 2013. – Vol. 39. – P. 347–350. – URL: <https://doi.org/10.1134/S108765961303005X>
21. *Aksenov S.M., Pavlova Er.T., Popova N.N. et al.* Stoichiometry and topological features of triple molybdates $\text{A}_x\text{B}_y\text{C}_z(\text{MoO}_4)_n$ with the heteropolyhedral open MT-frameworks: Synthesis, crystal structure of $\text{Rb}_5\{\text{Hf}_{1.5}\text{Co}_{0.5}(\text{MoO}_4)_6\}$, and comparative crystal chemistry // *Solid State Science*. – 2024. – Vol. 151. – P. 107525. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2024.107525>
22. *Grossman V.G., Molokeev M.S., Bazarova J.G. et al.* High ionic conductivity of $\text{K}_{5-x}\text{Tl}_x(\text{Mg}_{0.5}\text{Hf}_{1.5})(\text{MoO}_4)_6$ ($0 \leq x \leq 5$) solid solutions // *Solid State Science*. – 2022. – Vol. 134. – P. 107027. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2022.107027>
23. *Savina A.A., Khaikina E.G., Solodovnikov S.F. et al.* New alluaudite-related triple molybdates $\text{Na}_{25}\text{Cs}_8\text{R}_5(\text{MoO}_4)_{24}$ ($R = \text{Sc}, \text{In}$): Synthesis, crystal structures and properties // *New Journal of Chemistry*. – 2017. – Vol. 41. – P. 5450–5457. – URL: <https://doi.org/10.1039/c7nj00202e>
24. *Shannon R.D.* Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Crystallographica*. – 1976. – Vol. 32. – P. 751–767. – URL: <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
25. *Petkov V.I., Shipilov A.S., Sukhanov M.V.* Thermal Expansion of $\text{MZr}_2(\text{AsO}_4)_3$ and $\text{MZr}_2(\text{TO}_4)_x(\text{PO}_4)_{3-x}$ ($M = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$; $T = \text{As}, \text{V}$) // *Inorganic Materials*. – 2015. – Vol. 51 (11). – P. 1079–1085. – URL: <https://doi.org/10.1134/S002016851510012X>
26. *Petrushina M.Y., Korenev S.V., Dedova E.S. et al.* Materials AM_2O_8 ($A = \text{Zr}, \text{Hf}$; $M = \text{W}, \text{Mo}$) with negative thermal expansion // *Journal of Structural Chemistry*. – 2020. – Vol. 61. – P. 1655–1680. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0022476620110013>

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ
ДЛЯ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ» (ВЕСТНИК ВСГУТУ)**

Статья представляется в виде файла в электронном виде формата *.doc на электронный адрес vestnikvsgutu@mail.ru. Объем статьи должен быть не менее 8 полных страниц (включая таблицы, рисунки и список литературы) в формате MSWORD 6.0/95, MSWORD 97, MSWORD 2000 (шрифт TimesNewRoman, 12 пт. через один интервал, поля: верхнее 2 см, левое 2 см, правое 2 см, нижнее 2 см, ориентация – книжная, перенос слов автоматический). Абзацный отступ – 1,25 см. В начале статьи необходимо указать раздел, в который следует поместить статью, и сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, академическое звание, наименование организации, E-mail, факс (если имеется), индекс статьи по Универсальной десятичной классификации (УДК), название и краткую аннотацию (100 слов) статьи, ключевые слова (6...8 слов). Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, а также список цитированной литературы (библиография) даются и на английском языке.

Текст статьи должен включать разделы: Введение (обязательно указать цель работы), **Материалы и методы исследования, Результаты исследования и их обсуждение, Заключение, Библиография.** В тексте статьи, описывающем результаты исследования, должны использоваться глаголы в прошедшем времени.

Все формулы, в том числе отдельные переменные, упоминаемые в тексте, должны быть набраны в редакторе формул MicrosoftEquation или MathType. Не допускается набор формул в текстовом режиме или с использованием таблицы символов.

Параметры MicrosoftEquation или MathType должны быть следующими:

Стиль: текста – TimesNewRoman, прямой; функции – TimesNewRoman, наклонный; переменной – TimesNewRoman, наклонный; греческих букв – Symbol, наклонный; символов – Symbol, прямой; чисел – TimesNewRoman, прямой.

Размеры: обычный – 12 pt, крупный индекс – 10 pt, мелкий индекс – 8 pt, крупный символ – 16 pt, мелкий символ – 12 pt.

Размер формул по горизонтали не должен превышать 130 мм, длинные формулы следует обязательно разбивать на блоки. Не рекомендуется применять «многоэтажные» индексы.

Формулы ставятся по центру, номер формулы ставится у правого края, например:

$$z(\zeta) = z_A + Ke^{i\alpha\zeta} \int_1^{\zeta} \frac{(1-\zeta)d\zeta}{[(\zeta+c) \cdot (1+c \cdot \zeta)]^{3/2} \cdot \zeta^{\alpha}} \quad (1)$$

Нумеруются лишь те формулы, на которые в тексте имеются ссылки.

В таблице необходимо пронумеровать заголовки столбцов. При переносе таблиц на другую страницу пишется «Продолжение таблицы», а вместо головной части таблицы, ставится нумерация столбцов.

Рисунки представлять в электронной версии, выполненные на компьютере, черно-белые или в цвете. Для выполнения рисунков допускается использование графики MSWord. Надписи и обозначения на рисунках должны быть выполнены шрифтом, близким по начертанию шрифтам TimesNewRoman 11pt. Подрисуночные подписи вставлять в рисунок не рекомендуется.

При выборе единиц измерения рекомендуется придерживаться международной системы единиц СИ.

Ссылки в тексте на цитированную литературу даются в квадратных скобках, например [1]. Библиография приводится в конце статьи и входит в общий объем, необходимо указать не менее 15 источников. Ссылка в тексте идет последовательно, по нумерации источников, например [1, 2, 3]. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Не менее 50 % источников из библиографии должны быть опубликованы в периодических печатных изданиях в течение последних десяти лет. Не рекомендуется использование научной литературы старше 20 лет и более трех интернет-источников. Рекомендуется включение в текст статьи ссылок на научные труды иностранных авторов.

При составлении списка литературы (на русском и иностранных языках) обязательно указание следующих данных:

для книг – фамилия и инициалы автора, полное название книги, место издания, издательство, год издания, том или выпуск и общее количество страниц;

для статей в периодических изданиях – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала (сборника), год издания (для сборника – также место издания), том, номер (выпуск), первая и последняя страницы статьи;

для статей в неперіодических изданиях (книгах) – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название книги (сборника), место издания, издательство, год издания, первая и последняя страницы статьи;

для тезисов и текстов докладов на конференциях (семинарах, симпозиумах) – фамилия и инициалы автора, название доклада, полное название сборника тезисов или трудов конференции, дата и место проведения конференции, том, номер (выпуск), первая и последняя страницы тезисов или текста доклада;

для препринтов – фамилия и инициалы автора, название работы, место (город), год издания, количество страниц, (номер препринта / название научного учреждения или учебного заведения);

для патентов и авторских свидетельств – вид патентного документа, его номер, название страны, выдавшей документ, индекс МКИ, название изобретения, авторы, дата подачи заявки, дата публикации и сведения об официальном издании, где опубликованы сведения о патентном документе, сведения о приоритете;

для депонированных рукописей – фамилия и инициалы автора, полное название рукописи, наименование организации, год издания, общее количество страниц, место депонирования.

Примеры оформления библиографии:

а) для журнальных статей:

Узаков Я.М., Каимбаева Л.А. Использование мяса и субпродуктов маралов в производстве мясных изделий // Мясная индустрия, 2021. – № 8. – С. 40–43.

б) для книг:

Никонов В. И., Яковлева В. Я. Алгоритмы успешного маркетинга. – М., 2020. – С. 256–300.

в) для статей в сборнике:

Абильмажинова Н.К., Абжанова Ш.А., Таева А.М. Исследование качественных показателей мясных полуфабрикатов из конины с использованием // Естественные и технические науки: опыт, проблемы, перспективы: мат-лы конф. – Ставрополь: Центр научного знания «Логос», 2020. – № 1. – С. 3–7.

г) для статей в интернет-изданиях:

Логинова Л. Г. Сущность результата дополнительного образования детей // Образование: исследовано в мире: междунар. науч. пед. интернет-журн. 21.10.2021. URL: <http://www.oim.ru/reader.asp?номер=366> (дата обращения: 17.04.2022).

д) Патент RU 2427124 C1 A01C 7/20. Сошник / Тумурхонов В.В., Раднаев Д.Н., Лобанов И.Ф., Прокопьев С.Н. Патентообладатели: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова». – Заявка № 2010110214/21, заявл. 27.08.2011, опубл. 17.03.2010.

д) для источников Интернета: полностью название ресурса на языке оригинала.

Отбор, редактирование и рецензирование публикуемых статей производятся редакционной коллегией и ведущими учеными. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Научное издание

ВЕСТНИК
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ
(Вестник ВСГУТУ)

Научно-технический журнал
№ 1 (96)

Редакторы

Р. А. Багаева

Е. В. Белоplotова

Компьютерная верстка

Е. В. Белоplotовой

Ю. А. Мунхановой

Выход в свет 25.03.2025. Формат 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 14,42. Тираж 100 экз. Заказ № 30.
Цена 350 руб.

Издательство ВСГУТУ, редакция «Вестник Восточно-Сибирского
государственного университета технологий и управления» (Вестник ВСГУТУ)
Адрес издательства, редакции: 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ,
ул. Ключевская, д. 40В, строение 1.
Отпечатано в типографии ВСГУТУ
Адрес типографии: 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ,
ул. Ключевская, д. 40В, строение 9.