

ИЗВЕСТИЯ

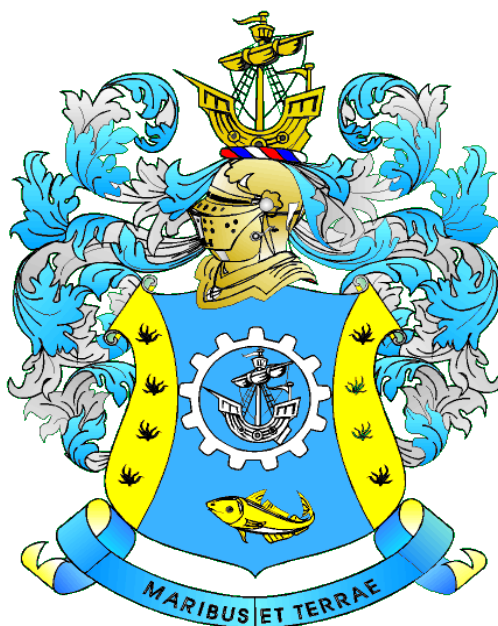
КГТУ

2026

№ 81

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИ-
ВЕРСИТЕТ»**

Научный журнал



Индексирование журнала, включение в базы данных

*Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты диссер-
таций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание
ученой степени доктора наук*

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Agricultural Research Information System (Agris)

Калининград

Редакционная коллегия:

Главный редактор: Н. А. Кострикова, канд. физ.-мат. наук, доц., проректор по научной работе;

Заместитель главного редактора: В. А. Наумов, д-р техн. наук, проф. кафедры техносферной безопасности и природообустройства.

Члены редакционной коллегии:

О. В. Агеев, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры инжиниринга технологического оборудования, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

И. С. Александров, д-р техн. наук, доц., директор Института морских технологий, энергетики и строительства, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

С. Т. Антипов, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия;

О. А. Анциферова, д-р с.-х. наук, доц., проф. кафедры агрономии и агроэкологии, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. Г. Архипов, д-р биол. наук, доц., научный координатор, Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО»), г. Калининград, Россия;

О. О. Бабиц, д-р техн. наук, доц., директор Института живых систем, Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

А. С. Баркова, д-р вет. наук, доц., заведующая кафедрой производства и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

О. М. Бедарева, д-р биол. наук, проф., заведующая кафедрой агрономии и агроэкологии, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. Ф. Белей, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой энергетики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. В. Брюханов, д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник НОЦ «Фундаментальная и прикладная фотоника. Нанофотоника», Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

О. А. Булатов, д-р биол. наук, проф., директор по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), г. Москва, Россия;

Н. Л. Великанов, д-р техн. наук, проф. Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. В. Верхотуров, д-р биол. наук, проф., директор Института агроинженерии и пищевых систем, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. А. Герасимов, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительства, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. И. Гнатюк, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры энергетики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Е. М. Грамузов, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры кораблестроения и авиационной техники, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия;

В. В. Дорофеева, д-р экон. наук, проф., заведующая кафедрой менеджмента, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Л. С. Дышлюк, д-р техн. наук, доц., заведующая лабораторией микробиологии и биотехнологий, Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

С. В. Дятченко, д-р техн. наук, проф. Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. В. Иванов, д-р экон. наук, проф., проф. кафедры менеджмента, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

И. П. Корнева, канд. техн. наук, доц., проф. кафедры физики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

О. В. Кригер, д-р техн. наук, доц., проф. Института живых систем, Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

Е. А. Криксунов, член-корреспондент РАН, д-р биол. наук, проф., заведующий лабораторией онтогенеза кафедры ихтиологии, МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

С. Н. Лябзина, д-р биол. наук, доц., проф. кафедры зоологии и экологии, Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия;

О. Я. Мезенова, д-р техн. наук, проф., заведующая кафедрой пищевой биотехнологии, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. Г. Мнацаканян, д-р экон. наук, проф., директор Института отраслевой экономики и управления, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. Б. Муромцев, д-р вет. наук, проф. кафедры зоотехнии Калининградского филиала Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, г. Калининград, Россия;

Е. Н. Науменко, д-р биол. наук, доц., проф. кафедры водных биоресурсов и аквакультуры, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Никитас Никитакос, проф., Морская академия, г. Шарджа, Объединенные Арабские Эмираты;

В. А. Панфилов, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, г. Москва, Россия;

А. И. Притыкин, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры строительства, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Л. И. Сергеев, д-р экон. наук, проф., заведующий кафедрой экономической теории и инструментальных методов, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Н. Я. Синявский, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой физики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. А. Слежкин, канд. хим. наук, доц., доц. кафедры химии, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. В. Снытников, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры прикладной информатики, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

Т. Е. Степанова, д-р экон. наук, проф., заведующая кафедрой экономической безопасности, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

В. И. Сутырин, д-р техн. наук, доц., проф. образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

О. Я. Тимофеев, д-р техн. наук, проф., декан факультета кораблестроения и океанотехники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия;

Е. В. Ульрих, д-р техн. наук, проф. кафедры инжиниринга технологического оборудования, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

С. В. Федоров, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теории механизмов и машин и деталей машин, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

А. В. Юров, д-р физ.-мат. наук, проф., директор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия.

Адрес редакции: 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1;
тел.: (4012) 99-59-01, 99-59-10, 99-59-74; *факс*: (4012) 91-68-46;
сайт: www.klgtu.ru; *E-mail*: svetlana.suprunova@klgtu.ru

© ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
2026



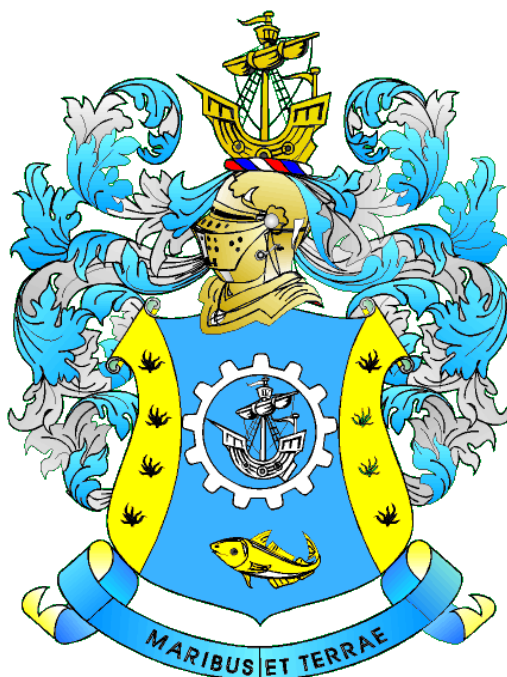
KSTU NEWS

2026

№ 81

FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
«KALININGRAD STATE TECHNICAL UNIVERSITY»

SCIENTIFIC JOURNAL



Journal index, registration in databases

Included in the list of peer-reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the candidate of science degree and for the doctor of science degree should be published

Russian Index of Scientific Citation (RISC)

Agricultural Research Information System (Agris)

Kaliningrad

СОДЕРЖАНИЕ

Биология, экология и рыбное хозяйство

Казакова Е. О., Рыжик И. В. Суточная динамика газообмена CO ₂ прибрежных фотоавтотрофов <i>Nonnkenya reploides</i> и <i>Fucus vesiculosus</i> Баренцева моря	11
Цупкиова Н. А., Севостьянова Е. А., Погодина А. Е., Рудских А. В. Оценка трофо-сапробного статуса пруда Парка Победы (г. Калининград) по гидрохимическим и альгологическим показателям	25

Техника и технология пищевых производств

Ахмедова Н. Р., Наумов В. А. Метод определения допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании рыбного фарша с учетом его реологических свойств	43
Бегдай И. В., Цесарь Т. А., Харин К. В. Интегральная оценка экологической безопасности растительных альтернатив молоку на основе анализа тяжелых металлов	57
Карлов В. А., Мезенова О. Я. Совершенствование технологии ферментативной переработки фруктов с дефектами внешнего вида	71
Федоров Д. С., Ключко Н. Ю. Влияние инулина пищевого и фукуса сушеного на микробиологическую стабильность пастеризованного рыбного паштета	86

Судостроение, машиностроение и энергетика

Ариенчук А. С., Чуреев Е. А. Исследование интерференции корабельных волн асимметричного катамарана	101
Сынашенко О. В., Синявский Н. Я., Кострикова Н. А. Исследование стабильности водотопливной эмульсии для дизельного двигателя	114

CONTENT

Biology, ecology and fisheries

<i>Kazakova E. O., Ryzhik I. V.</i> Diurnal dynamics of CO ₂ gas exchange in coastal photoautotrophs <i>Honckenya peploides</i> and <i>Fucus vesiculosus</i> of the Barents Sea	11
<i>Tsupikova N. A., Sevostyanova E. A., Pogodina A. E., Rudskikh A. V.</i> Assessment of tropho-saprobiological status of the Pobedy Park Pond (Kaliningrad) based on hydrochemical and algological indicators	25

Processes and technology of food manufacturing

<i>Akhmedova N. R., Naumov V. A.</i> Method for determining the maximum permissible rotor speed of rotary lobe pumps when pumping fish mince based on its rheological properties	43
<i>Begdai I. V., Tsesar T. A., Kharin K. V.</i> Integral assessment of the environmental safety of plant-based milk alternatives based on heavy metal analysis	57
<i>Karlov V. A., Mezenova O. Ya.</i> Improvement of the technology for enzymatic processing of fruits with visual defects	71
<i>Fedorov D. S., Klyuchko N. Yu.</i> The effect of food inulin and dried fucus on the microbiological stability of pasteurized fish paste	86

Shipbuilding, machine manufacturing and power engineering

<i>Arienchuk A. S., Chureev E. A.</i> Study of the interference of ship waves of an asymmetric catamaran	101
<i>Synashenko O. V., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A.</i> Study of the stability of water-fuel emulsion for diesel engine	114

БИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ И РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья

УДК 574.24

DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-11-24

**Суточная динамика газообмена CO₂ прибрежных фотоавтотрофов
Honckenya peplodes и *Fucus vesiculosus* Баренцева моря**

Екатерина Олеговна Казакова¹✉, Инна Валериевна Рыжик^{1,2}

¹Мурманский морской биологический институт, Мурманск, Россия

²Мурманский арктический университет, Мурманск, Россия

¹katyadobychina@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5089-1065>

²alaria@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3874-2379>

Аннотация. Происходящие климатические изменения усиливают интерес к исследованию закономерностей обмена углеродсодержащих газов между атмосферой и подстилающей поверхностью на различных масштабных уровнях. На примере двух фотоавтотрофов *F. vesiculosus* и *H. peplodes* разного систематического положения, морфофункциональной организации и условий обитания рассмотрены показатели газообмена углекислого газа (CO₂) в прибрежной зоне Зеленецкой губы Баренцева моря. Водоросль-макрофит находится в литоральной зоне и фотосинтезирует всей поверхностью таллома, тогда как сосудистое растение произрастает в супралиторали и поглощает CO₂ из атмосферы листовыми пластинками через устьичный аппарат. Исследование проводили методом закрытых камер в двух вариантах: прозрачными камерами измеряли нетто-экосистемный обмен (NEE), темными – дыхание экосистемы (R_{eco}). Показатель валовой первичной продукции (GEE) устанавливали расчетным путем. Средние величины потоков (мг С/м²·ч) за сутки у *H. peplodes* и *F. vesiculosus* отличались: NEE составил –44,84 и –20,34 соответственно, R_{eco} – 19,59 и 33,05, GEE не имел достоверных отличий. Амплитуда колебаний NEE, R_{eco} и GEE фотоавтотрофов в течение суток была значительной и отражала суточные изменения внешних условий и физиологические реакции самих организмов. Установлены зависимости параметров газообмена CO₂ от факторов среды. Ведущими факторами, влияющими на потоки углекислого газа, являлись освещенность и температура, на показатели в случае макроводоросли дополнительное влияние оказывал приливно-отливной цикл.

Ключевые слова: фотоавтотрофы, потоки CO₂, факторы среды, супралитораль, литораль, дневная динамика.

Благодарности: авторы выражают благодарность сотруднику лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН Иващенко Андрею Ивановичу за консультацию по теме исследования.

Финансирование: исследование выполнено в рамках темы 188-25-01 «Мониторинг донных сообществ морей Российской Арктики: экология, биоразнообразие, оценка рисков и рациональное использование гидробионтов».

Для цитирования: Казакова Е. О., Рыжик И. В. Суточная динамика газообмена CO₂ прибрежных фотоавтотрофов *Honckenya peploides* и *Fucus vesiculosus* Баренцева моря // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 11–24. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-11-24.

Original article

**Diurnal dynamics of CO₂ gas exchange in coastal photoautotrophs
Honckenya peploides and *Fucus vesiculosus* of the Barents Sea**

Ekaterina O. Kazakova¹✉, Inna V. Ryzhik^{1,2}

¹Murmansk Marine Biological Institute, Murmansk, Russia

²Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

¹katyadobychina@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5089-1065>

²alaria@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3874-2379>

Abstract. The ongoing climate changes heighten the interest in studying the patterns of carbon-containing gas exchange between the atmosphere and the underlying surface at various scale levels. Using two photoautotrophic species, *Fucus vesiculosus* and *Honckenya peploides*, which differ markedly in taxonomic position, morpho-functional organization, and habitat conditions, CO₂ gas exchange parameters have been examined in the coastal zone of Zelenetskaya Bay in the Barents Sea. The macroalga inhabits the littoral zone and photosynthesizes across the entire surface of its thallus, whereas the vascular plant occurs in the supralittoral zone and absorbs atmospheric CO₂ via the stomatal apparatus. The study was conducted using the chamber method in two configurations: transparent chambers were used to measure net ecosystem exchange (NEE), while dark chambers were used to measure ecosystem respiration (R_{eco}). Gross primary production (GEE) was calculated indirectly. The mean daily flux values (mg C m⁻² h⁻¹) differed between *H. peploides* and *F. vesiculosus*. NEE was –44.84 and –20.34, and R_{eco} was 19.59 and 33.05. No significant differences were observed in GEE. The amplitude of the NEE, Reco, and GEE oscillations of the photoautotrophs during the day was significant and reflected diurnal changes in environmental conditions and the physiological reactions of the organisms themselves. Relationships between CO₂ gas exchange parameters and environmental factors were identified. The primary factors influencing carbon dioxide fluxes were light intensity and temperature, while the tidal cycle additionally affected the gas exchange parameters of the macroalga.

Keywords: photoautotrophs, CO₂ fluxes, environmental factors, supralittoral, littoral, daily dynamics.

Acknowledgements: the author is grateful to Andrey I. Ivashchenko, an employee of the laboratory of radiocarbon dating and electron microscopy of the institute of physics and technology of the IGRAS, for his advice on the research topic.

Funding: the research was carried out within the framework of the topic: 188-25-01 "Monitoring of bottom communities of the seas of the Russian Arctic: ecology, biodiversity, risk assessment and rational use of aquatic organisms".

For citation: Kazakova E. O., Ryzhik I. V. Diurnal dynamics of CO₂ gas exchange in coastal photoautotrophs *Honckenya peploides* and *Fucus vesiculosus* of the

Barents Sea. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):11–24. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-11-24.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климатической обстановки стимулирует исследование особенностей газообмена углеродсодержащих газов в системе «атмосфера–подстилающая поверхность» на глобальном, региональном и локальном уровнях [1]. Углекислый газ (CO_2), один из парниковых газов, рассматривается как фактор глобальных изменений в большинстве климатических сценариев. Для более надежного прогнозирования климатических изменений необходимы максимально точные данные о распределении парниковых газов и тенденции изменения их концентраций как в целом по земному шару, так и в отдельных регионах [2]. Углеродный баланс изучается на карбоновых полигонах, которые располагаются в наземных экосистемах (например, лесных, тундровых, степных) и водных (морских, внутренних водоемах – озерах и болотах), а также на осушенных торфяниках [3–6], однако доля исследований, посвященных потокам углерода в водной среде, уступает наземным исследованиям.

В России планировалось создать несколько полигонов, занимающихся изучением потоков углерода в море, – на Дальнем Востоке, Камчатке и в Балтийском море. Одна из площадок карбонового полигона – «Росьянка» – располагается в Балтийском море, на ней изучаются потоки углерода на границах «литосфера–гидросфера» и «гидросфера–атмосфера», исследуется баланс углерода в морской среде и др. [7]. Исследования баланса углекислого газа в прибрежной зоне арктических морей, в частности в приливно-отливной зоне, которую можно рассматривать как буферную между сушей и морем, единичны. В Российской Арктике подобные исследования проводятся только в Хибинах и затрагивают экосистемы суши.

Для арктических побережий особую актуальность приобретает изучение потоков CO_2 , поскольку эта зона характеризуется как сложными условиями для произрастания растений и высокой ролью растительности в формировании первичной продукции, так и высокой уязвимостью [8]. Прибрежные экосистемы Арктики испытывают одновременное воздействие ряда факторов: низких температур, сезонного таяния льда и снега, резких колебаний освещенности, связанных с чередованием полярного дня и ночи, а также морское влияние – приливно-отливные процессы, прибойную динамику и изменения солёности. Совокупность этих факторов формирует специфические условия для функционирования фотоавтотрофов и существенно влияет на интенсивность обмена углекислого газа между поверхностью экосистемы и атмосферой. На побережье моря формируются уникальные биоценозы, которые включают в себя сообщества высших растений и макроводорослей, однако их вклад в формирование потоков CO_2 и общий баланс углерода в арктических прибрежных экосистемах остается недостаточно изученным.

Цель данной работы – определение суточной динамики потоков углекислого газа для двух биотопов (*Honckenya peploides* и *Fucus vesiculosus*) и оценка зависимости экосистемных потоков CO_2 от факторов окружающей среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент проводился на участке площадью 300 м² в районе биостанции Дальние Зеленцы (Мурманский морской биологический институт РАН) (69°11' с. ш., 36°06' з. д.) с 26 по 31 июля 2025 г. (белые ночи).

Выбор эталонных площадок обусловлен тем, что супралиторальная и литоральная зоны различаются по структуре сообществ, участвующих в преобразовании диоксида углерода и формировании потоков CO₂. В супралитории потребление CO₂ идет в основном за счет сосудистых растений, в то время как в литоральной части существенную роль играют макроводоросли. На данных площадках для исследования были выбраны наиболее распространенные фотоавтотрофы, создающие заросли.

Honckenya peploides (L.) Ehrh., 1783 – галофит семейства Caryophyllaceae, распространен на приморских дюнах и супралитории умеренно-холодных побережий. Заросли *H. peploides* стабилизируют песок, накапливают органическое вещество, благодаря чему создаются условия для последующего заселения мест другими сосудистыми растениями [9]. В месте исследования *H. peploides* на супралитории формирует узкую полосу шириной около 1 м. Произрастает на песчаном грунте с примесью галечно-гравийного материала, также встречается на выбросах водорослей-макрофитов. Заливается морской водой только во время сизигийного прилива, а также в период штормов.

Fucus vesiculosus (L.) – макроводоросль класса Phaeophyceae в умеренных и субарктических приливно-отливных зонах [4]. Ее заросли обеспечивают субстрат микро- и мейобентосу. В Зеленецкой губе *F. vesiculosus* занимает широкую полосу обитания (около 8 м), произрастая в основном на средней литорали. Растет на камнях и валунах. Заливание морской водой происходит 2 раза в сутки, в воду погружается весь таллом водоросли. В зависимости от стадии приливно-отливного цикла (ПОЦ) и высоты расположения на литорали время осушения варьирует от часа до восьми.

Измерения потоков CO₂ проводили методом закрытых камер. В данной работе использовали камеру из оргстекла толщиной 4 мм (светопропускаемость 95 %). Объем камеры составлял 0,037 м³, площадь покрываемого открытым основанием участка – 0,09 м². Воздух в камерах перемешивался вентилятором.

Исследование проводилось в двух вариантах:

1. Измерение динамики нетто-экосистемного обмена, или чистого обмена CO₂ (Net Ecosystem Exchange – NEE), осуществляли с помощью прозрачной камеры. В результате изменения концентрации CO₂ NEE определяли как разность между двумя противоположно направленными процессами – выделением CO₂ экосистемой в атмосферу (в результате дыхания) и ассимиляцией CO₂ экосистемой напочвенного покрова из атмосферы (в результате фотосинтеза);

2. Измерение динамики дыхания экосистемы, или валового дыхания (Ecosystem Respiration – R_{eco}), проводили непрозрачной камерой, которая не пропускала солнечный свет, что позволяло измерять интенсивность дыхания.

Валовый газообмен (Gross ecosystem exchange – GEE) – поток (ассимиляция) CO₂ из атмосферы в экосистему, определяемый валовым фотосинтезом растений на единицу площади их произрастания. GEE рассчитывался по формуле $GEE = NEE - R_{eco}$.

В течение эксперимента показатели для растения *H. peploides* измеряли в дневной период (с 10.00 до 18.00) каждый час. Для *F. vesiculosus* измерения были приурочены ко времени отлива (с 14.00 до 23.00), регистрировали также каждый час. Время экспозиции одного измерения составляло 5 мин с трехкратной повторностью. Концентрация CO₂ (мг С/м²·ч) в камере измерялась портативным полевым газоанализатором, разработанным на биологическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова на базе инфракрасного CO₂-сенсора Vent Pro (ООО «Измерение и Контроль», г. Санкт-Петербург) и воздушной помпы (Hargraves Technologies Corp., США), отрицательные значения соответствуют ассимиляции CO₂ экосистемой из атмосферы, положительные – его выделению [10, 11].

Во время измерения CO₂ фиксировались интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) солнечного излучения (с помощью квантового радиометра/фотометра LI-185 (LI-COR Biosciences, США)), температура воздуха внутри и снаружи камеры, температура поверхности почвы (при помощи ртутного термометра ТЛ-4, Россия, ТУ 25-2021.003-88), определялась влажность воздуха. Количество облаков по всему небосводу оценивалось визуально по 10-балльной шкале [12]. Содержание сухого вещества в фотоавтотрофах определяли согласно общепринятой методике [13].

Статистический анализ данных проводили с использованием программного обеспечения Statistica 10 (StatSoft Inc.). Для проверки нормальности распределения использовали критерий Шапиро-Уилка, однородность находили критерием Левена. Определение наличия и силы связи между переменными осуществляли при помощи корреляционного анализа (коэффициент Пирсона), совокупного воздействия факторов среды на потоки CO₂ – с помощью метода множественной регрессии. Для определения статистической значимости различий выборок использовался t-критерий Стьюдента. Данные представлены в виде средних значений и стандартных ошибок ($\bar{X} \pm SE$). Графики построены в программе Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия

В течение суток абиотические факторы, такие как освещенность, температура воды и воздуха, влажность, претерпевают значительные колебания, обусловленные сменой «дня» и «ночи», ПОЦ и метеорологическими условиями. В ходе исследования преимущественно наблюдалась переменная облачность, в солнечную погоду количество облаков не превышало 4 баллов, в пасмурную погоду достигало 10.

На рис. 1 приведены среднесуточные изменения факторов среды в период исследования. Интенсивность освещения варьировала в широких пределах: в дневное время уровень освещенности достигал максимума 1600 ммоль·м⁻²·с⁻¹ к 12.00 и сохранялся примерно до 14.00, после чего постепенно снижался до 300 ммоль·м⁻²·с⁻¹ к 19.00 и 20,25 ммоль·м⁻²·с⁻¹ к 23.00. Температура воздуха возрастала с 10.00 до 12.00, достигая 25 °С, и оставалась на этом уровне до 16.00, затем снижалась, к 19.00 она составляла 14,5 °С, оставалась на плато и к 22.00 достигала минимальных значений за сутки – 13 °С. Суточный ход температуры поверхности почвы соответствовал изменениям температуры воздуха, но характеризовался

меньшими значениями (до 20,9 °C в дневные часы и до 11 °C вечером). Влажность находилась в диапазоне 40–75 %.

Изменения факторов среды напрямую определяют баланс процессов фотосинтеза и дыхания у фотоавтотрофов и, следовательно, величину и направление потоков CO₂. Учитывая, что эти факторы сильно варьируют в приливно-отливной среде, суточный, а тем более годовой углеродный баланс таких сообществ прогнозировать непросто [4, 14].

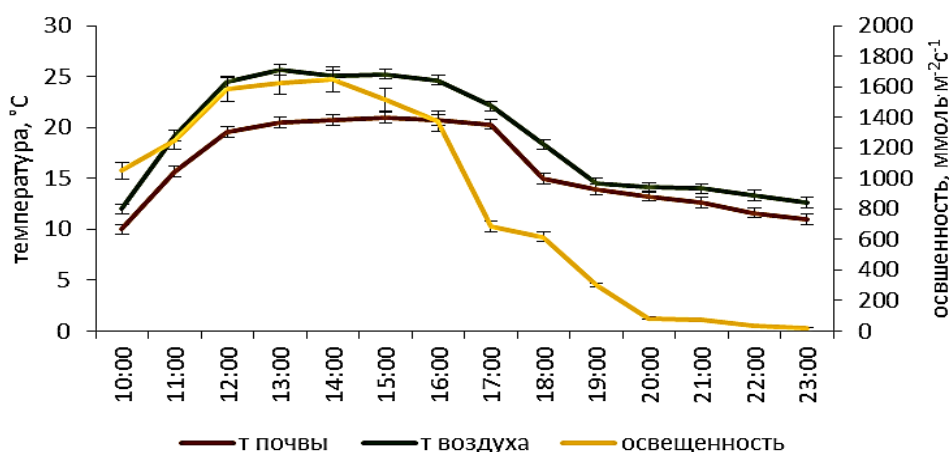


Рис. 1. Среднесуточные интенсивность освещения и температуры воздуха и поверхности почвы (с 26 по 31 июля)

Fig. 1. Average daily intensity of illumination and temperatures of air and soil surface (from July 26 to July 31)

Чистый обмен CO₂ между фотоавтотрофами прибрежной зоны и атмосферой

Выявлена выраженная динамика параметра чистого обмена CO₂ у фотоавтотрофов (рис. 2.1 и 2.2).

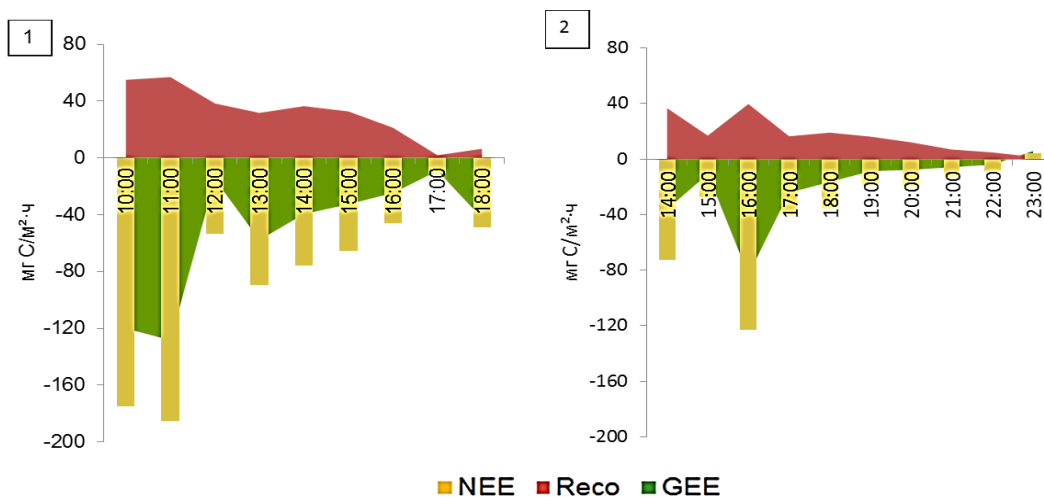


Рис. 2. Составляющие газообмена (NEE, Reco, GEE) у двух видов фотоавтотрофов: 1 – *H. peploides*, 2 – *F. vesiculosus*

Fig. 2. Components of gas exchange (NEE, Reco, GEE) in two types of photoautotrophs: 1 – *H. peploides*, 2 – *F. vesiculosus*

У *H. peplodes* в период измерений фиксировались отрицательные значения NEE, что указывает на преобладание фотосинтеза над дыханием. Максимальное поглощение CO_2 $-120 \text{ мг С/м}^2 \cdot \text{ч}$ – наблюдалось в позднее утро, тогда как к середине дня интенсивность фотосинтеза (ИФ) снижалась до $-15 \text{ мг С/м}^2 \cdot \text{ч}$ (рис. 2.1). Подобное падение может быть связано с эффектом полуденной депрессии фотосинтеза в середине дня при максимальных интенсивности солнечного излучения и температуре [15]. В 18.00 наблюдалось некоторое увеличение показателя чистого обмена, что может объясняться изменением условий.

F. vesiculosus в первую половину отлива (14.00–16.00) активно фотосинтезировал. Максимальное поглощение CO_2 зарегистрировано спустя около двух часов после осушения талломов ($-83 \text{ мг С/м}^2 \cdot \text{ч}$) (рис. 2.2), когда водоросль еще сохраняла достаточное содержание влаги и одновременно получала полный доступ к солнечному свету. Ранее было отмечено, что у *F. vesiculosus* есть два максимума фотосинтетической активности в период осушения, так как увеличение ИФ в первую фазу отлива достигается в том числе способностью макроводоросли аккумулировать углерод в тканях [16]. Макроводоросли, находясь на осушке в отлив, испытывают более сильное действие факторов среды, чем в погруженных условиях в момент прилива. Примечательно, что лишь после 5 часов осушения показатель NEE стабильно уменьшается, в это время содержание воды в талломе находится на уровне примерно 30 %. Однако даже при таком обезвоживании фотосинтез у водорослей не прекращается, как было показано на родственном виде *F. spiralis* [17]. Кроме того, фукоиды во время отлива образуют плотную многослойную массу, талломы самозатеняются и предотвращается их перегрев. Такая структура действует как естественный фильтр, способствуя более продолжительному сохранению влаги и физиологической активности особей, находящихся внутри сообщества. Было отмечено, что после 5 часов осушения у талломов *F. vesiculosus* с поверхности превалировало дыхание, а у тех, что находились в толще слоя водорослей, фотосинтез продолжался [16]. По нашим данным разница в содержании воды между талломами, находящимися на поверхности слоя и внутри, составляет 45 %. Таким образом, благодаря морфофизиологическим характеристикам и тому, что во время осушения водоросли образуют плотное скопление, фотосинтетическая активность *F. vesiculosus* поддерживается на протяжении примерно 8 ч. В конце отлива фотосинтетическая активность *F. vesiculosus* практически прекращается из-за критического высыхания таллома (содержание воды составляет 23 %). Еще одной причиной повышения интенсивности дыхания являлось снижение освещения. Соответственно, баланс CO_2 смещается в сторону источника – к 23.00 *F. vesiculosus* выделяет углекислый газ ($\text{NEE} > 0$).

Дыхание экосистемы

Параметр R_{eco} *H. peplodes* и *F. vesiculosus* показывал общую тенденцию (рис. 2.1 и 2.2). У *H. peplodes* в утреннее время (10:00 – 11:00) и у *F. vesiculosus* в первую половину отлива (14:00 – 16:00) R_{eco} имел высокие значения, что может быть обусловлено нарастанием температурного и солнечного воздействия для сосудистого растения после «ночи», а для макроводоросли после того, как прилив закончился и вода начала отступать. К вечеру дыхание у фотоавтотрофов снижа-

ется и параллельно уменьшается ИФ, что может быть связано с внутренними процессами, например, переключением типа метаболизма (CAM $\rightarrow$ C3 у *H. peploides*); у *F. vesiculosus* снижение R_{eco} во второй половине отлива отражает замедление метаболизма вследствие дегидратации талломов.

Валовый газообмен экосистемы

В период полярного дня, когда фотосинтез может продолжаться многие часы подряд, параллельно идет и интенсивное дыхание, расходуя значимую часть произведенной органики. Важно отметить, показатель GEE существенно превышал NEE у обоих изученных видов (рис. 2.1 и 2.2). По нашим данным, 38 % и 42 % всего фиксированного за день CO_2 вновь возвращалось в атмосферу вследствие дыхания *H. peploides* и *F. vesiculosus* соответственно, а также ассоциированных гетеротрофных организмов. Таким образом, совокупная деятельность как высших растений супралиторали, так и морских водорослей литорали способствует поглощению атмосферного CO_2 (60 %) в прибрежной зоне.

При сравнении средних величин показателей за сутки для двух различных биотопов выявлено, что у *H. peploides* и *F. vesiculosus* выделение ($NEE = -44,84 \pm 6,1$ и $-20,34 \pm 2,9$, $p < 0,05$) и поглощение ($R_{eco} = 19,59 \pm 2,3$ и $33,05 \pm 4,8$, $p < 0,05$) достоверно отличаются, причем у высшего растения оба эти процесса интенсивнее по сравнению с макроводорослью, показатель GEE фотоавтотрофов не имеет достоверных отличий ($-59,88 \pm 9,7$ и $-38,15 \pm 7,3$, $p > 0,05$).

Зависимость NEE, R_{eco} , GEE от факторов среды

Освещенность и температура являются ключевыми факторами, определяющими ИФ, но реакция фотоавтотрофов по результатам корреляционного анализа противоположна. В то время как супралиторальный вид *H. peploides* находился в полуденные часы на открытой местности, литоральный *F. vesiculosus* был покрыт водой в прилив, то есть на момент исследования осушение водоросли приходилось на более мягкий период, поэтому величина NEE *F. vesiculosus* изменяется согласно уровням освещенности и температур – имеется отрицательная корреляционная связь сильной и средней силы соответственно (табл. 1). Другая картина наблюдается у *H. peploides* – связь с этими факторами положительная, кроме того, температура и показатель NEE между собой сильно связаны. Степень облачности также имела разнонаправленное влияние на чистый обмен CO_2 фотоавтотрофов. Прямая пропорциональная связь у NEE *F. vesiculosus* с облачностью объясняется регуляцией водообмена водоросли. С увеличением уровня облачности происходит затенение солнца, снижаются температура и освещенность, замедляется испарение воды с поверхности таллома, благодаря чему увеличивается ИФ. У *H. peploides* обратно пропорциональная связь NEE с уровнем облачности обусловлена тем, что с уменьшением облачности возрастает действие ФАР, в свою очередь вызывающей депрессию фотосинтеза.

Таблица 1. Матрица коэффициентов корреляции между показателями газообмена и факторами среды

Table 1. Matrix of correlation coefficients between gas exchange parameters and environmental factors

Факторы	NEE		R _{eco}		GEE	
	<i>F. v.</i>	<i>H. p.</i>	<i>F. v.</i>	<i>H. p.</i>	<i>F. v.</i>	<i>H. p.</i>
Освещенность	–0,7	0,49	0,65	–0,7	–0,66	0,43
t почвы	–0,65	0,72	0,47	–0,51	–0,53	0,6
t воздуха	–0,62	0,76	0,42	0,6	–0,47	0,67
Влажность	0,55	–0,6	–0,39	0,49	0,48	–0,56
Облачность	0,5	–0,47	–0,53	0,49	0,54	–0,59
ПОЦ	0,69	–	–0,6	–	0,68	–

Примечание: *F. v.* – *F. vesiculosus*, *H. p.* – *H. reploides*; представлены коэффициенты корреляции на уровне значимости $p < 0,05$.

Интенсивность освещения с одинаковой силой связи влияет на динамику дыхания фотоавтотрофов. Температура воздуха и почвы оказывает действие на показатель R_{eco} *H. reploides* в большей степени, чем на R_{eco} *F. vesiculosus*: у растения – средняя связь, у макроводоросли – слабая (табл. 1). Динамика дыхания сосудистых растений супралиторали при использовании метода закрытых камер сопряжена с дыханием почвенной биоты – численностью микроорганизмов в почве (бактерии, грибы и др.) и интенсивностью их обменных процессов [18]. Таким образом, с увеличением температуры и влажности повышается дыхание не только растений, но и дыхание почвы. К примеру, полевые измерения потоков CO₂ на острове Сюртсей (Исландия) на *H. reploides* показали, что на увлажненных участках дыхание интенсивнее, чем на сухих, в 3 раза, что указывает на большую биологическую активность почвы [19]. Получается, R_{eco} для высших растений является многокомпонентным параметром, его составляющие могут иметь различную связь с факторами среды, что может приводить к маскировке закономерностей. У *F. vesiculosus*, в отличие от *H. reploides*, нет корневой системы, субстратом служат валуны, а не почва, то есть R_{eco} определяется талломом и процессами, происходящими в нем – по мере высыхания таллома замедляется метаболизм и снижается дыхание.

Показатели GEE и NEE связаны с фотосинтетической деятельностью фотоавтотрофов, соответственно, корреляционные зависимости у этих параметров с факторами среды имеют близкие значения, но у GEE они меньшей силы, поскольку в расчете учитывается и дыхание, и фотосинтез растительных организмов.

Стоит отметить, для *F. vesiculosus* решающим фактором является чередование осушения и заливания, имеется прямая сильная зависимость с NEE, а также отрицательная средняя связь с показателем R_{eco}. Действие ПОЦ оказывает влияние на все показатели газообмена CO₂, так как вслед за изменением фазы цикла существенно изменяются сопутствующие факторы.

Поскольку на потоки CO₂ действуют множество факторов, была рассмотрена взаимосвязь между величинами. В табл. 2 приведены уравнения регрессии и оценки их статистической достоверности, полученные для потоков CO₂ и факторов среды.

Таблица 2. Уравнения зависимости потоков CO₂ от факторов среды
Table 2. Equations of dependence of CO₂ fluxes on environmental factors

Уравнение регрессии	R ² , %	F, α=0,05	P-value
<i>F. vesiculosus</i>			
NEE = -13,8-0,03X ₁ -5,85X ₂ +5,23X ₃ +0,22X ₄ -0,04X ₅	60	6,81	0,0005
R _{eco} = 30,12+0,035X ₁ +4,97X ₂ -5,94X ₃ -0,01X ₄ -0,11X ₅	69	11,05	0,00001
GEE = -125,38-0,07X ₁ -9,9X ₂ +12,72X ₃ +1,1X ₄ +0,08X ₅	70	11,57	0,00001
<i>H. peploides</i>			
NEE = -202,39-0,02X ₁ +3,08X ₂ +4,15X ₃ +0,86X ₄ -0,25X ₅	62	4,54	0,011
R _{eco} = 42,58-0,03X ₁ +0,11X ₂ +0,39X ₃ +0,48X ₄ +0,16X ₅	60	3,49	0,035
GEE = -116,5-0,07X ₁ +3,36X ₂ +3,91X ₃ +0,22X ₄ -0,76X ₅	57	3,21	0,045

Примечание: X₁ – освещенность, X₂ – t почвы, X₃ – t воздуха, X₄ – влажность, X₅ – облачность, F – критерий Фишера, R² – коэффициент детерминации, уровень значимости p < 0,05.

Результаты показали, что уравнения регрессии обладают умеренной степенью объяснительной способности, что свидетельствует о достаточно надежном описании связи между потоками CO₂ и факторами окружающей среды. Во всех случаях опытное значение критерия Фишера превышает табличное. Поскольку эмпирическое значение F-статистики выше критического, можно подтвердить наличие зависимости потоков CO₂ от изучаемых факторов.

Перспектива дальнейших исследований

В дальнейшем планируются работы по дополнению суточных исследований в полярный день «в ночной период» у фотоавтотрофов. Кроме того, большой интерес представляют собой исследования потоков CO₂ в круглогодичном режиме на макроводорослях в отлив, которые затрагивали бы начало–конец полярной ночи. Особый интерес представляет изучение выбросов макроводорослей, что также планируется сделать в будущих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В июле было проведено измерение составляющих газообмена CO₂ в двух биотопах приливно-отливной зоны мурманского побережья. Фотоавтотрофы *H. peploides* и *F. vesiculosus* как представители массово распространенных видов на побережье Баренцева моря совместно обеспечивают сток углекислого газа в дневной период – высшее растение с 10.00 до 18.00, макроводоросль на протяжении дневного отлива (с 14.00 до 22.00). Сравнение потоков двух биотопов выявило различия между ними – у *H. peploides* поглощение и выделение CO₂ больше, чем у *F. vesiculosus*. При этом амплитуда колебаний NEE, R_{eco} и GEE в течение суток была значительной, отражая суточные изменения внешних условий и физиологические реакции самих организмов.

Установлены зависимости параметров газообмена CO₂ от факторов среды. Ведущими факторами, влияющими на потоки углекислого газа, являются освещен-

ность и температура, кроме того на показатели водоросли оказывает действие приливов и отливов. Полученные коэффициенты регрессионных уравнений могут быть использованы для интерпретации динамики потоков CO₂ у фотоавтотрофов в летний период.

Список источников

1. Оценка первичной биопродукции в воде прибрежной зоны оз. Байкал на основе суточного хода концентрации CO₂ в разные сезоны (2005–2021 гг.) / В. М. Домышева, М. В. Панченко, Д. А. Пестунов [и др.]. – DOI: 10.15372/AOO20220813 // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 8 (403). – С. 686–694.
2. Карбоновые полигоны ИОА СО РАН для исследования динамики парниковых газов в атмосфере. Ч. I. / В. В. Антонович, О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин [и др.]. – DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-46-60 // Системы контроля окружающей среды. – 2022. – № 4 (50). – С. 46–60.
3. Statistical upscaling of ecosystem CO₂ fluxes across the terrestrial tundra and boreal domain: Regional patterns and uncertainties / A. M. Virkkala, J. Aalto, B. M. Rogers [et al.]. – DOI: 10.1111/gcb.15659 // Global Change Biology. – 2021. – Vol. 27 (17). – P. 4040–4059.
4. Modelling the annual primary production of an intertidal brown algal community based on in situ measurements / F. Bordeyne, A. Migné, M. Plus, D. Davoult. – DOI: 10.3354/meps13450 // Marine Ecology Progress Series. – 2020. – Vol. 656. – P. 95–107.
5. Потоки диоксида углерода при разном режиме использования сенокоса на осушенной торфяной почве / А. Г. Молчанов, Г. Г. Суворов, Д. В. Ильясов, А. А. Сирин. – DOI: 10.31857/S0002188120090094 // Агрохимия. – 2020. – № 9. – С. 48–64.
6. Потоки углерода в процессе газообмена CO₂ и CH₄ в системе «атмосфера–водная среда» прибрежной зоны Байкала / Д. А. Пестунов, В. М. Домышева, А. М. Шамрин [и др.]. – DOI: 10.21513/2410-8758-2024-3-399-412 // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2024. – Т. 10, № 3. – С. 399–412.
7. Буканова, Т. В. Дистанционный мониторинг морской площадки карбонового полигона «Росьянка» (Балтийское море): первые результаты / Т. В. Буканова, Е. С. Бубнова, С. В. Александров. – DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-234-247 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19, № 6. – С. 234–247.
8. Ecosystem CO₂ exchange and plant biomass in the littoral zone of a boreal eutrophic lake / T. Larmola, J. Alm, S. Juutinen [et al.]. – DOI: 10.1046/j.1365-2427.2003.01079.x // Freshwater Biology. – 2003. – Vol. 48 (8). – P. 1295–1310.
9. Łabuz, T. A. Polish coastal dunes: affecting factors and morphology / T. A. Łabuz. – DOI: <http://dx.doi.org/10.12657/landfana.022.004> // Landform Analysis. – 2013. – Vol. 22. – P. 33–59.
10. Методическое руководство по определению эмиссии CO₂ из почв в различных типах экосистем. – 2-е издание. – Пушино, 2023. – 79 с.
11. Замолодчиков, Д. Г. CO₂-газообмен тундр острова Вайгач в нетипично теплый и сухой вегетационный сезон / Д. Г. Замолодчиков // Журнал общей биологии. – 2015. – Т. 76, № 2. – С. 83–98.

12. Моргунов, В. Н. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений / В. Н. Моргунов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. – 331 с. – ISBN 5-222-06627-4.
13. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидро-биологической практике / Л. А. Сиренко, А. И. Сакевич, Л. Ф. Осипов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1975. – 247 с.
14. A closed-chamber CO₂-flux method for estimating intertidal primary production and respiration under emersed conditions / A. Migné, D. Davoult, N. Spilmont [et al.]. – DOI: 10.1007/s00227-001-0741-1 // Marine Biology. – 2002. – Vol. 140 (4). – P. 865–869.
15. Смашевский, Н. Д. Экология фотосинтеза / Н. Д. Смашевский // Астраханский вестник экологического образования. – 2014. – № 2 (28). – С. 165–180.
16. Фотосинтетическая активность *Fucus vesiculosus* Linnaeus, 1753 (Phaeophyta: Fucales) Баренцева моря в период приливно-отливного цикла / И. В. Рыжик, А. А. Кособрюхов, Е. Ф. Марковская, М. В. Макаров. – DOI: 10.31857/S0002332920060119 // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2021. – № 1. – С. 55–64.
17. Madsen, T. V. A comparison of air and water as environments for photosynthesis by the intertidal alga *Fucus spiralis* (Phaeophyta) / T. V. Madsen, S. C. Maberly. – DOI: 10.1111/j.0022-3646.1990.00024.x // Journal of Phycology. – 1990. – Vol. 26, № 1. – P. 24–30.
18. Сезонная динамика выделения углекислого газа («дыхание почв») в предгорной зоне Крыма / А. В. Славинская, В. Г. Кобечинская, А. В. Ивашов, М. В. Гритчин // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 177–187.
19. Sigurdsson, B. D. Ecosystem carbon fluxes of *Leymus arenarius* and *Honckenya peploides* on Surtsey in relation to water availability: a pilot study / B. D. Sigurdsson // Surtsey Research. – 2009. – Vol. 12. – P. 77–80.

References

1. Assessment of primary bioproducts in the waters of the coastal zone of the lake Baikal based on the daily course of CO₂ concentration in different seasons (2005-2021) / V. M. Domyшева, M. V. Panchenko, D. A. Pestunov [et al.]. – DOI: 10.15372/AOO20220813 // Optics of the atmosphere and ocean. – 2022. – Vol. 35, № 8 (403). – P. 686–694.
2. Carbon landfills of the IAO SB RAS for the study of greenhouse gas dynamics in the atmosphere. Part I. / V. V. Antonovich, O. Y. Antokhina, P. N. Antokhin [et al.]. – DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-46-60 // Environmental control systems. – 2022. – № 4 (50). – P. 46–60.
3. Statistical upscaling of ecosystem CO₂ fluxes across the terrestrial tundra and boreal domain: Regional patterns and uncertainties / A. M. Virkkala, J. Aalto, B. M. Rogers [et al.]. – DOI: 10.1111/gcb.15659 // Global Change Biology. – 2021. – Vol. 27 (17). – P. 4040–4059.
4. Modelling the annual primary production of an intertidal brown algal community based on in situ measurements / F. Bordeyne, A. Migné, M. Plus, D. Davoult. – DOI: 10.3354/meps13450 // Marine Ecology Progress Series. – 2020. – Vol. 656. – P. 95–107.

5. Carbon dioxide fluxes under different haymaking conditions on drained peat soil / A. G. Molchanov, G. G. Suvorov, D. V. Ilyasov, A. A. Sirin. – DOI: 10.31857/S0002188120090094 // Agrochemistry. – 2020. – № 9. – P. 48–64.
6. Carbon fluxes in the process of CO₂ and CH₄ gas exchange in the atmosphere–aquatic environment system of the Baikal coastal zone / D. A. Pestunov, V. M. Domyшева, A. M. Shamrin [et al.]. – DOI: 10.21513/2410-8758-2024-3-399-412 // Fundamental and applied climatology. – 2024. – Vol. 10, № 3. – P. 399–412.
7. Bukanova, T. V. Remote monitoring of the offshore site of the "Rossyanka" carbon landfill (Baltic Sea): the first results / T. V. Bukanova, E. S. Bubnova, S. V. Alexandrov. – DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-234-247 // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. – 2022. – Vol. 19, № 6. – P. 234–247.
8. Ecosystem CO₂ exchange and plant biomass in the littoral zone of a boreal eutrophic lake / T. Larmola, J. Alm, S. Juutinen [et al.]. – DOI: 10.1046/j.1365-2427.2003.01079.x // Freshwater Biology. – 2003. – Vol. 48 (8). – P. 1295–1310.
9. Łabuz, T. A. Polish coastal dunes: affecting factors and morphology / T. A. Łabuz. – DOI: <http://dx.doi.org/10.12657/landfana.022.004> // Landform Analysis. – 2013. – Vol. 22. – P. 33–59.
10. Methodological guide for determining CO₂ emissions from soils in various types of ecosystems 2nd edition. – Pushchino, 2023. – 79 p.
11. Zamolodchikov, D. N. CO₂-gas exchange of the tundra of Vaigach Island in an atypically warm and dry growing season / D. N. Zamolodchikov // Journal of General Biology. – 2015. – Vol. 76, № 2. – P. 83–98.
12. Morgunov, V. N. Fundamentals of meteorology, climatology Meteorological instruments and methods of observations / V. N. Morgunov. – Rostov-on-Don: Phoenix, 2005. – 331 p. – ISBN 5-222-06627-4.
13. Methods of physiological and biochemical research of algae in hydrobiological practice / L. A. Sirenko, A. I. Sakevich, L. F. Osipov [et al.]. – Kiev: Naukova dumka, 1975. – 247 p.
14. A closed-chamber CO₂-flux method for estimating intertidal primary production and respiration under emersed conditions / A. Migné, D. Davoult, N. Spilmont [et al.]. – DOI: 10.1007/s00227-001-0741-1 // Marine Biology. – 2002. – Vol. 140 (4). – P. 865–869.
15. Smashevsky, N. D. Ecology of photosynthesis / N. D. Smashevsky // Astrakhan Bulletin of Environmental Education. – 2014. – № 2 (28). – P. 165–180.
16. Photosynthetic activity of *Fucus vesiculosus* Linnaeus, 1753 (Phaeophyta: fucales) the Barents Sea during the tidal cycle / I. V. Ryzhik, A. A. Kosobryukhov, E. F. Markovskaya, M. V. Makarov. – DOI: 10.31857/s0002332920060119 // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The series is biological. – 2021. – № 1. – P. 55–64.
17. Madsen, T. V. A comparison of air and water as environments for photosynthesis by the intertidal alga *Fucus spiralis* (Phaeophyta) / T. V. Madsen, S. C. Maberly. – DOI: 10.1111/j.0022-3646.1990.00024.x // Journal of Phycology. – 1990. – Vol. 26, № 1. – P. 24–30.
18. Seasonal dynamics of carbon dioxide release ("soil respiration") in the foothill zone of Crimea / A. V. Slavinskaya, V. G. Kobechinskaya, A. V. Ivashov, M. V. Gritchin // Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. – 2022. – Vol. 8, № 1. – P. 177–187.

19. Sigurdsson, B. D. Ecosystem carbon fluxes of *Leymus arenarius* and *Honckenya peploides* on Surtsey in relation to water availability: a pilot study / B. D. Sigurdsson // Surtsey Research. – 2009. – Vol. 12. – P. 77–80.

Информация об авторах

Е. О. Казакова – младший научный сотрудник

И. В. Рыжик – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Information about the authors

E. O. Kazakova – junior researcher

I. V. Ryzhik – Candidate of Biological sciences, senior researcher

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 20.03.2026; одобрена после рецензирования 07.04.2026; принята к публикации 16.04.2026.

The article was submitted 20.03.2026; approved after reviewing 07.04.2026; accepted for publication 16.04.2026.

Научная статья

УДК 574.5:556.55(470.26)

DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-25-39

**Оценка трофо-сапробного статуса пруда Парка Победы (г. Калининград)
по гидрохимическим и альгологическим показателям**

Надежда Александровна Цупикова¹, Екатерина Александровна Севостьянова², Александра Евгеньевна Погодина³, Артем Викторович Рудских⁴

^{1,2,3,4} Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ tsoupikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9823-5810>

² ekaterina.lozitskaya@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-3917-1953>

³ sashinodelo@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7963-0983>

⁴ aptiom2019@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1983-5360>

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования в период с апреля 2024 по март 2025 г. эколого-гидрохимического состояния и альгоценоза малого городского водоема – пруда без названия в Парке Победы (г. Калининград). На основании ежемесячного мониторинга трех станций выявлена пространственно-временная динамика ключевых гидрохимических параметров, включая растворенный кислород, биогенные элементы (азот аммонийный, нитриты, фосфаты, общее железо) и перманганатную окисляемость. Для характеристики биологического состояния анализировались состав, численность и биомасса фитопланктона с применением стандартных гидробиологических методик. Установлено, что водный объект характеризуется хронически высоким содержанием аммонийного азота, превышающим рыбохозяйственные предельно допустимые концентрации (ПДК) на протяжении всего годового цикла, и критическим дефицитом растворенного кислорода в весенне-летний период. Выявлена статистически значимая зависимость между интенсивностью осадков и уровнем органического загрязнения. Высокое содержание общего железа имеет смешанный генезис, сочетающий влияние природных подземных вод и сток с урбанизированных территорий. По гидрохимическим показателям пруд классифицируется как эвтрофный, воды принадлежат к категории β-мезосапробных. Альгологический анализ показал доминирование зеленых, диатомовых водорослей и цианобактерий, пиковые значения биомассы фитопланктона свидетельствуют об эвтрофном статусе экосистемы. Морфометрические особенности пруда и наличие локальных источников загрязнения обуславливают выраженную пространственную гетерогенность качества среды – северная часть водоема является зоной максимальной аккумуляции загрязняющих веществ из-за поступления ливневых стоков.

Ключевые слова: городской пруд, гидрохимический мониторинг, фитопланктон, биогенные элементы, эвтрофикация, сапробность, качество воды.

Для цитирования: Цупикова Н. А., Севостьянова Е. А., Погодина А. Е., Рудских А. В. Оценка трофо-сапробного статуса пруда Парка Победы (г. Калининград) по гидрохимическим и альгологическим показателям // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 25–39. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-25-39.

Original article

Assessment of tropho-saprobological status of the Pobedy Park Pond (Kaliningrad) based on hydrochemical and algological indicators

Nadezhda A. Tsupikova¹, Ekaterina A. Sevostyanova²✉, Aleksandra E. Pogodina³, Artem V. Rudskikh⁴

^{1,2,3,4} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ tsoupikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9823-5810>

² ekaterina.lozitskaya@klgtu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3917-1953>

³ sashinodelo@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7963-0983>

⁴ aptiom2019@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1983-5360>

Abstract. This paper presents the results of a comprehensive assessment of the ecological and hydrochemical status and algal community of a small urban water body – an unnamed pond located in Pobedy Park (Kaliningrad) – conducted from April 2024 to March 2025. Based on the monthly monitoring across three sampling stations, the study identifies the spatio-temporal dynamics of key hydrochemical parameters, including dissolved oxygen, nutrients (ammonium nitrogen, nitrites, phosphates, total iron) and permanganate index. In order to provide a robust biological characterisation, the phytoplankton composition, abundance, and biomass have been analysed using standard hydrobiological protocols. The findings establish that the water body exhibits chronically high ammonium nitrogen levels, exceeding fisheries maximum allowable concentrations throughout the entire annual cycle, alongside critical dissolved oxygen deficit during the spring and summer months. A statistically significant correlation has been identified between precipitation intensity and the level of organic pollution. Furthermore, the total iron concentrations are of mixed origin, resulting from the combined influence of natural groundwater and runoff from urbanised areas. According to hydrochemical indicators, the pond can be classified as eutrophic, β -mesosaprobic. Algological analysis revealed the dominance of green algae, diatoms and cyanobacteria; peak phytoplankton biomass values indicate the ecosystem's eutrophic status. The morphometric characteristics of the pond, coupled with local point sources of pollution, drive pronounced spatial heterogeneity in environmental quality; specifically, the northern sector of the pond serves as a primary accumulation zone for pollutants due to the influx of stormwater runoff.

Keywords: urban pond, hydrochemical monitoring, phytoplankton, nutrients, eutrophication, saprobity, water quality.

For citation: Tsupikova N. A., Sevostyanova E. A., Pogodina A. E., Rudskikh A. V. Assessment of tropho-saprobological status of the Pobedy Park Pond (Kaliningrad) based on hydrochemical and algological indicators. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):25–39. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-25-39.

ВВЕДЕНИЕ

Важность и актуальность работы по комплексной оценке состояния городских водоемов обусловлена их ключевой ролью в поддержании экологического баланса урбанизированных территорий, обеспечении биоразнообразия, регулировании гидрологических процессов и предоставлении широкого спектра экосистемных услуг, включая рекреационные, образовательные и эстетические функции [1–4]. В условиях плотной городской застройки и значительной антропогенной нагрузки искусственные водоемы становятся важнейшими элементами городской «голубой» инфраструктуры, способствуя смягчению последствий климатических изменений, снижению риска наводнений и улучшению качества городской среды [1, 4–6].

Современные исследования подчеркивают, что городские пруды и озера, несмотря на часто неблагоприятные гидрохимические условия и воздействие загрязнителей, способны поддерживать значительное видовое разнообразие гидробионтов, включая редкие и охраняемые виды, а также служить «экологическими коридорами» для миграции организмов [1, 2, 4]. Особое значение имеют исследования, направленные на выявление факторов, влияющих на экологическое состояние водоемов, таких как гидрологический режим, уровень эвтрофикации, поступление питательных и органических веществ, а также их сезонная динамика [6–8]. Важной задачей является формирование базы данных по состоянию городских водоемов, что позволяет не только отслеживать долгосрочные изменения, но и разрабатывать эффективные стратегии управления и восстановления экосистем [1–3, 9].

Калининград обладает обширной сетью озелененных и водно-парковых территорий. В условиях современной градостроительной политики, ориентированной на формирование устойчивых водно-зеленых городских пространств, возникла необходимость в их реставрации и экологической реабилитации. В результате парковые массивы и находящиеся в их пределах водоемы привлекли повышенное внимание как научного сообщества, так и городского населения, что обусловило актуальность применения многопараметрических методов их оценки. Одним из таких объектов является Парк Победы с расположенным в нем водоемом без названия, экологическое состояние которого до настоящего исследования не было изучено системно.

Пруд без названия в Парке Победы представляет собой водоем искусственного происхождения, имеющий историческую и экологическую значимость, элемент городской водной инфраструктуры Калининграда. Выполненное исследование позволило оценить текущее состояние водоема, выявить пространственно-временную динамику гидрохимических показателей и характеристик фитопланктона как индикаторов экологического состояния водоема, находящегося под воздействием комплекса природных и антропогенных факторов.

Исторической основой появления пруда послужили переустроенные крепостные рвы, которые со временем утратили свое оборонительное значение. Происхождение водоема как фортификационного сооружения во многом предопределило его современный гидрологический режим и склонность к аккумуляции загрязняющих веществ. Несмотря на то, что водный объект обладает признаками водоемов второй рыбохозяйственной категории, в официальных реестрах данный статус юридически не закреплён.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб для выполнения гидрохимического (апрель 2024 – март 2025 г.) и альгологического (апрель – сентябрь 2024) анализов проводился на трех береговых станциях мониторинга с поверхностного горизонта: ст. 1 – северная точка пруда (54.712009, 20.489455), ст. 2 – центральная часть водоема, южнее сужения (54.710055, 20.489493), ст. 3 – юго-западная окраина вблизи стройплощадки и автомобильной дороги (54.708470, 20.489059) (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема станций мониторинга

Fig. 1. Location of sampling stations

Гидрохимический анализ включал определение содержания растворенного кислорода¹, азота аммонийного², нитритов², фосфора фосфатов³, железа общего, величины перманганатной окисляемости⁴.

Отбор проб для альгологического анализа проводили из поверхностного горизонта на глубине около 0,5–0,8 м. Для фиксации и окраски использовали раствор Люголя в модификации Кузьмина Г. В. Концентрация пробы осуществлена методом прямой фильтрации через фильтры с диаметром пор 5 и 1,2 мкм. Материал обработан с использованием камеры «Учинская-2» на микроскопе «Микромед 3 (U2)» с объективами увеличения 63× и 40×. Подсчет биомассы и численности осуществлен по методическим рекомендациям ИБВВ РАН [10, 11].

Качество воды оценивалось путем сравнения концентраций загрязняющих веществ с нормативами (ПДК), установленными для водных объектов рыбохозяйственного значения в соответствии с Приказом Минсельхоза России № 552 от

¹ РД 52.24.419-2019. Массовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика измерений йодометрическим методом. – [Б. м.] : Росгидромет, 2019. – 8 с.

² ГОСТ 33045-2014. Вода. Методы определения азотсодержащих веществ. – М. : Стандартинформ, 2019. – 20 с.

³ ГОСТ 18309-2014. Вода. Методы определения фосфорсодержащих веществ. – М. : Стандартинформ, 2015. – 22 с.

⁴ ГОСТ Р 55684-2013. Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости. – М. : Стандартинформ, 2019. – 16 с.

13.12.2016. Текущее экологическое состояние водоема оценено по трофо-сапробным показателям⁵, трофический статус – по биомассе фитопланктона [12].

Статистическая обработка данных выполнена путем сопоставления (прямого и с временным лагом в 30 дней) усредненных по станциям гидрохимических показателей с метеорологическими данными, а также количественных показателей фитопланктона (численности и биомассы) с гидрохимическими параметрами и метеорологическими данными. Оценка тесноты и направленности связей проведена с помощью коэффициента линейной корреляции Пирсона (r).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидролого-гидрохимическая характеристика

Пруд в парке небольшой, имеет вытянутую форму: длина водоема 0,46 км, средняя ширина – 0,03 км. Площадь водного зеркала составляет 1,5 га. В центральной части пруд пересекает искусственная насыпь, в теле которой организовано гидротехническое сооружение. Значительное уменьшение площади поперечного сечения пропускного отверстия по сравнению с общей шириной водоема условно разделяет его на две гидрологически относительно изолированные части – северную и южную. Данная морфометрическая особенность способствует формированию гидрохимических и альгологических различий между северной и южной частями водоема.

На северо-западе в пруд впадает постоянный водоток, имеющий юго-восточное направление, в зимний период здесь визуально наблюдается поступление теплой воды, что препятствует ледообразованию на данном участке. С восточного берега через систему ливневой канализации в пруд эпизодически стекают талые снеговые и дождевые воды с асфальтированных покрытий и кровель зданий. На западном берегу фиксируется постоянно действующий водовыпуск неизвестного происхождения, устье которого выложено красным кирпичом.

Температура воздуха в период наблюдений демонстрировала значительные внутригодовые колебания, близкие к норме. Прогрев воды происходил вслед за повышением температуры воздуха. Вегетационный период характеризовался устойчиво высокими температурами воздуха, способствующими интенсивному испарению и высокой температуре воды (с мая по август выше 20 °C). В холодное время года (с декабря по апрель) на ст. 1 температура воды выше, чем на других станциях, благодаря поступлению более теплых вод из водовыпуска в северную часть пруда. Суммарное количество осадков за 2024 г. (730 мм) оказалось близким к норме (отклонение –9 %), но их внутригодовое распределение характеризовалось резкими экстремумами: при общем дефиците осадков в вегетационный период значительное превышение нормы осадков наблюдалось в июле (на 72 % выше нормы), а также в первые три месяца года (в феврале почти в 2,5 раза).

Анализ распределения гидрохимических параметров по трем станциям мониторинга позволил выявить выраженную сезонную динамику, обусловленную как природными факторами, так и антропогенной нагрузкой.

⁵ ГОСТ 17.1.2.04-77. Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. — Москва : Издательство стандартов, 1977. – 10 с.

Кислородные условия пруда характеризуются выраженной пространственно-временной неоднородностью и нестабильностью, что типично для антропогенно-трансформированных экосистем. В весенне-летний период формируются зоны гипоксии с периодами глубокого дефицита. В частности, в мае зафиксирован критический минимум содержания растворенного кислорода ($3,34 \text{ мг/дм}^3$, 38 % насыщения на ст. 1). Данному снижению предшествовал пик перманганатной окисляемости (более $16\text{--}17 \text{ мгО/дм}^3$ в апреле), что указывает на интенсивное потребление кислорода и процессы деструкции органического вещества. Вероятно, акватория ст. 1 является зоной аккумуляции аллохтонного и автохтонного детрита, где процессы деструкции преобладают над продукционными (рис. 2). Напротив, в холодный сезон (декабрь–март) наблюдается перенасыщение воды кислородом (до $11\text{--}17 \text{ мг/дм}^3$). Максимальное значение ($17,3 \text{ мг/дм}^3$) на ст. 3 в марте, вероятно, обусловлено интенсивным началом фотосинтеза в отсутствие ледяного покрова. Таким образом, большую часть года по содержанию растворенного кислорода пруд соответствует β -мезосапробной зоне (эвтрофные воды).

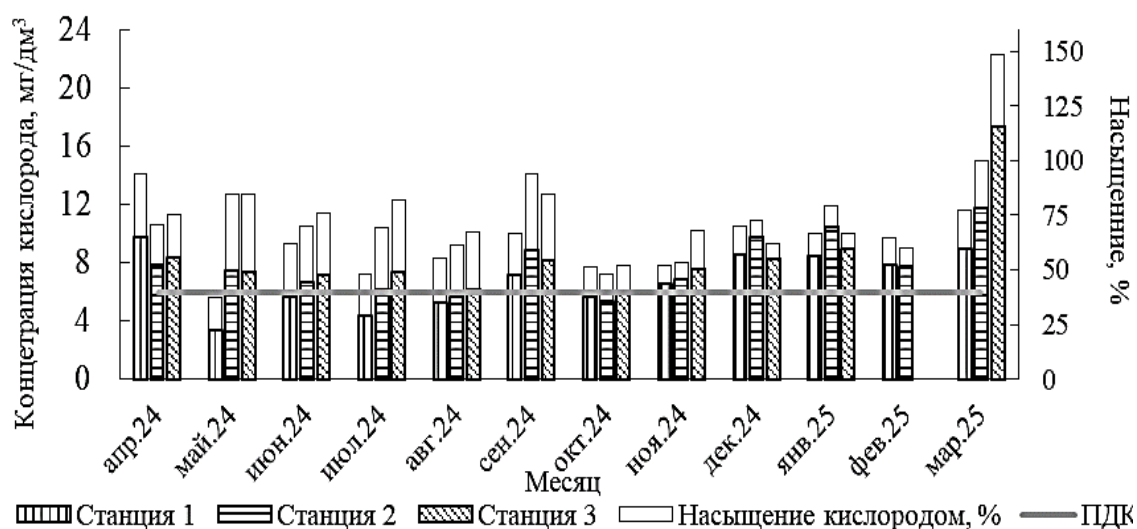


Рис. 2. Растворенный кислорода, мг/дм^3 , и степень насыщения им вод, %
Fig. 2. Dissolved oxygen, mg/dm^3 , and oxygen saturation, %

В водоеме наблюдается четко выраженный сезонный характер хода перманганатной окисляемости (рис. 3). Апрель характеризуется резким увеличением окисляемости (более 16 мгО/дм^3 – соответствует β -мезосапробной зоне и указывает на эвтрофное состояние водного объекта), что может быть связано с высокой биомассой фитопланктона и поступлением аллохтонного органического вещества с ливневыми стоками. Корреляционный анализ выявил статистически значимую инерционную зависимость ($r = 0,54$) между количеством атмосферных осадков и окисляемостью с временным лагом в 30 дней. В целом в весенне-летний период 2024 г. значения окисляемости снижаются с повышенной до малой. Аналогичная тенденция уменьшения величины перманганатной окисляемости прослеживается с января по март 2025 г. (от средней до малой).

В водоеме наблюдается пространственная неоднородность в распределении величины перманганатной окисляемости. Ст. 1 является своеобразной «горячей

точкой», где аккумулируется аллохтонный и автохтонный детрит и сохраняется стабильно более высокий уровень органического загрязнения по сравнению с другими участками акватории.

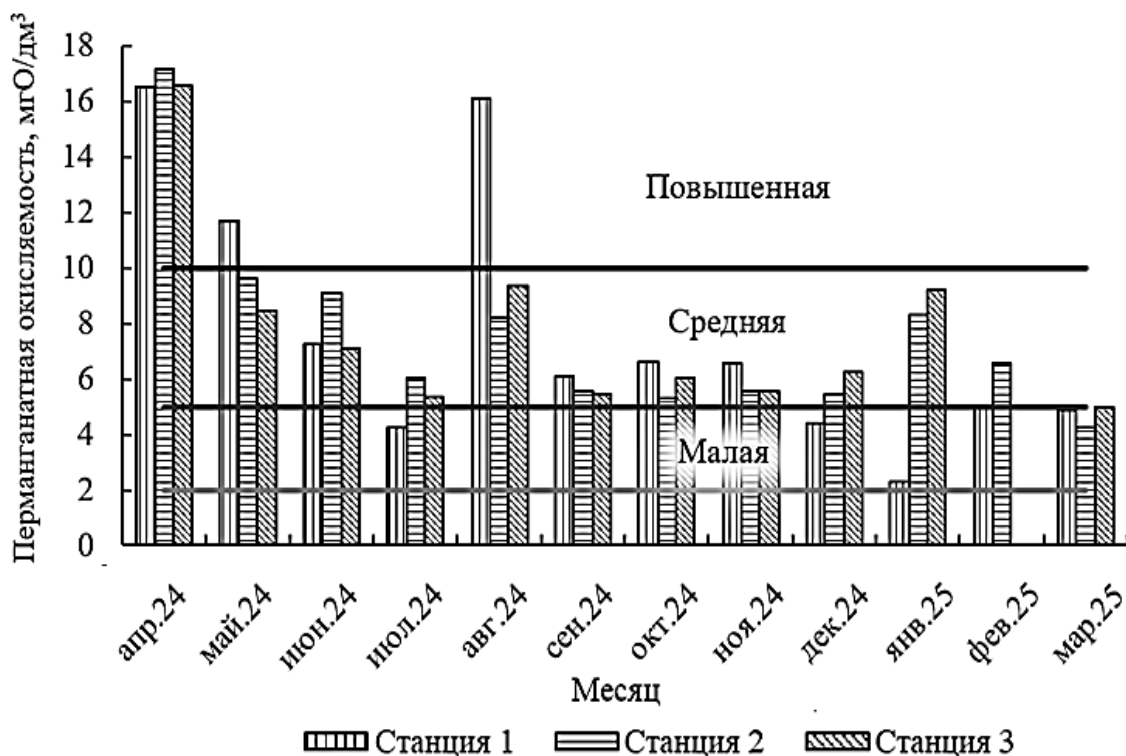


Рис. 3. Перманганатная окисляемость, мгО/дм³
Fig. 3. Permanganate index, mg O/dm³

Анализ биогенных элементов выявил доминирование восстановленных форм азота (рис. 4). В исследуемой аквасистеме нормальный сезонный ход аммонийного азота нарушен, его концентрации существенно превышают рыбохозяйственный ПДК на всех станциях в течение всего годового цикла, стабильно соответствуя полисапробной зоне («грязные воды»), а в периоды пиковых нагрузок (октябрь, февраль) – гиперсапробной. Содержание меняется скачкообразно, нет единообразия в пространственном распределении (повышенное содержание наблюдается как на ст. 1, так и на ст. 3). Хронически высокие концентрации элемента свидетельствуют о протекании процессов аммонификации в условиях недостатка кислорода, особенно в местах накопления органических илов на дне. Также на малых городских водоемах, где концентрация орнитофауны (например, кряквы) высока из-за подкормки жителями, их жизнедеятельность в условиях замедленного водообмена приводит к формированию устойчивого избытка биогенных веществ в водной толще и донных отложениях.

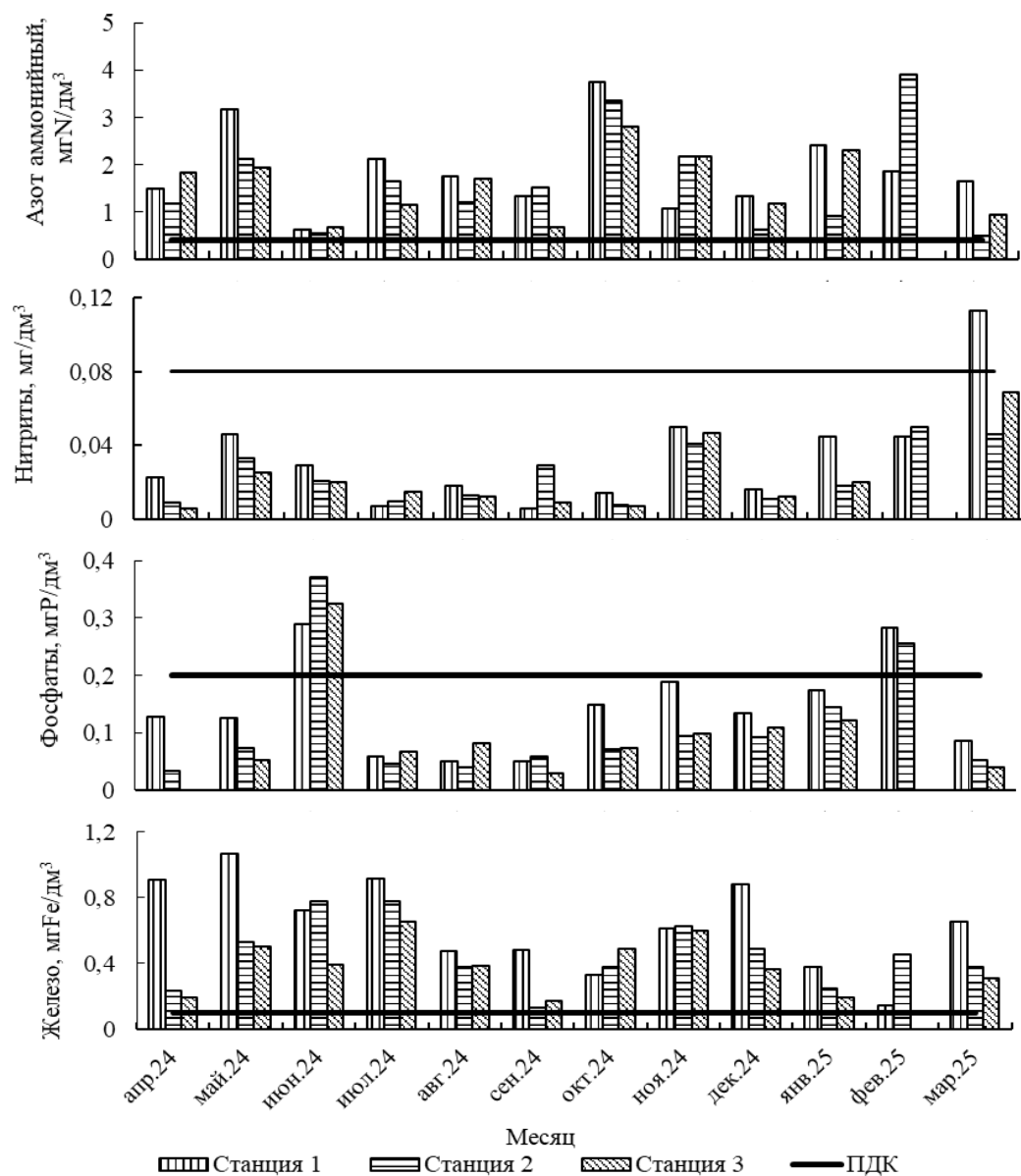


Рис. 4. Биогенные вещества, мг/дм^3
Fig. 4. Nutrients, mg/dm^3

Нитриты – неустойчивые компоненты, поэтому в незагрязненных поверхностных водах они присутствуют в незначительных количествах (до $0,01 \text{ мг/дм}^3$), а их более высокое содержание в водах пруда и динамика подтверждают нарушение процесса нитрификации (рис. 4) [13, 14]. Превышение ПДК ($0,08 \text{ мг/дм}^3$) было зафиксировано только на ст. 1 в марте (более $0,11 \text{ мг/дм}^3$). В остальное время содержание нитритов на всех станциях оставалось в пределах нормативных значений, варьируя от $0,01$ до $0,05 \text{ мг/дм}^3$. Характерно, что накопление нитритов наблюдается именно в зимне-весенний период (январь–март), что может быть связано с замедлением бактериального окисления аммония до нитратов из-за низких температур воды и наличия ледового покрова. Учитывая высокую токсичность нитритов для гидробионтов, их повышенное содержание зимой является неблагоприятным фактором для экосистемы пруда.

Содержание фосфатов превышает ПДК (для эвтрофных водоемов) только в отдельные месяцы (июнь, февраль), тогда как в течение года преимущественно соответствовало α -мезосапробной зоне (0,11–0,30 мг/дм³). В умеренных широтах часто наблюдается годовой максимум к концу зимы, годовой минимум – в конце весны – начале лета. В исследуемом пруду сохранение относительно низких концентраций фосфатов на фоне избытка аммонийного азота позволяет предположить, что фосфор является лимитирующим фактором первичной продукции, однако его низкая концентрация может быть обусловлена связыванием в труднорастворимые соединения с трехвалентным железом. На протяжении большей части исследования уровень фосфатов на ст. 1 более высокий (рис. 4).

Концентрация железа общего велика и повсеместно превышала ПДК (0,1 мгFe/дм³) в течение всего времени наблюдений, достигая максимума в весенний период. Повышенное содержание железа характерно для водоемов Калининграда [15, 16]. Высокий уровень железа, вероятно, имеет двойственную природу: с одной стороны, это влияние природных факторов (содержание общего железа в водоеме обнаруживает устойчивую прямую зависимость от интенсивности атмосферных осадков, $r = 0,51$), с другой – смыв соединений железа с урбанизированной территории (коррозия сетей, строительный мусор) [17]. Наибольшие концентрации железа отмечены в северной части пруда, в зоне влияния водовыпуска (рис. 4).

Наблюдается умеренная положительная тенденция ($r = 0,35$) между сезонными пиками содержания железа и окисляемости, что согласуется с гипотезой о совместном выносе железосодержащих частиц и органических веществ в составе поверхностного стока. Однако статистическая значимость корреляции не достигнута, что может быть связано с малым числом наблюдений ($n = 12$) и высокой вариабельностью данных.

Альгологическая характеристика

Альгоценоз водоема характеризуется преобладанием трех отделов: зеленые (*Chlorophyta*), диатомовые (*Bacillariophyta*) и цианобактерии (*Cyanoprokaryota*). Стабильно в меньшей степени обнаруживаются представители отделов эвгленовые (*Euglenophyta*) и криптофитовые (*Cryptophyta*), в то время как желто-зеленые (*Xanthophyta*) и стрептофитовые (*Streptophyta*) водоросли встречаются спорадически.

В отделе криптофитовых наиболее часто встречающимися являлись представители рода *Cryptomonas* и *Komma caudata* (L.Geitler). В диатомовом комплексе на протяжении всего вегетационного периода основу сообщества формировали пеннатные формы, относящиеся к родам *Nitzschia*, *Navicula* и *Fragilaria*. Отдел зеленых водорослей отличался значительным таксономическим разнообразием. Наиболее многочисленными являлись виды родов *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* и *Monoraphidium*. В составе цианопрокариот в периоды летнего прогрева выделялись нитчатые формы (*Limnothrix* spp. и *Oscillatoria* spp.). Общей чертой выявленной флоры является то, что основная масса обнаруженных видов относится к группе космополитов, широко распространенных в пресноводных водоемах умеренной широты [18, 19].

Пространственное распределение фитопланктона и показатели его развития (численность и биомасса) демонстрируют значительную гетерогенность, что коррелирует с особенностями гидрологического режима водоема. Ранее отмеченные значительные колебания концентраций биогенных веществ создают благоприятные условия для развития толерантных к загрязнению групп водорослей. Кроме того, влияет сезонность развития видов [19].

Численность фитопланктона колебалась в широких пределах – от 3,02 до 61,86 млн кл./дм³. На ст. 1, характеризующейся наибольшим загрязнением, практически во все месяцы количественно доминировали цианобактерии. Их доля в общей численности достигала 65–88 % в отдельные месяцы. В августе здесь явно преобладали зеленые водоросли (47,01 млн кл./дм³ – 75,9 % в общей численности альгоценоза). Осенью доля криптононад на всех станциях наблюдения возрастала в среднем до 39 % по всему водоему (рис. 5).

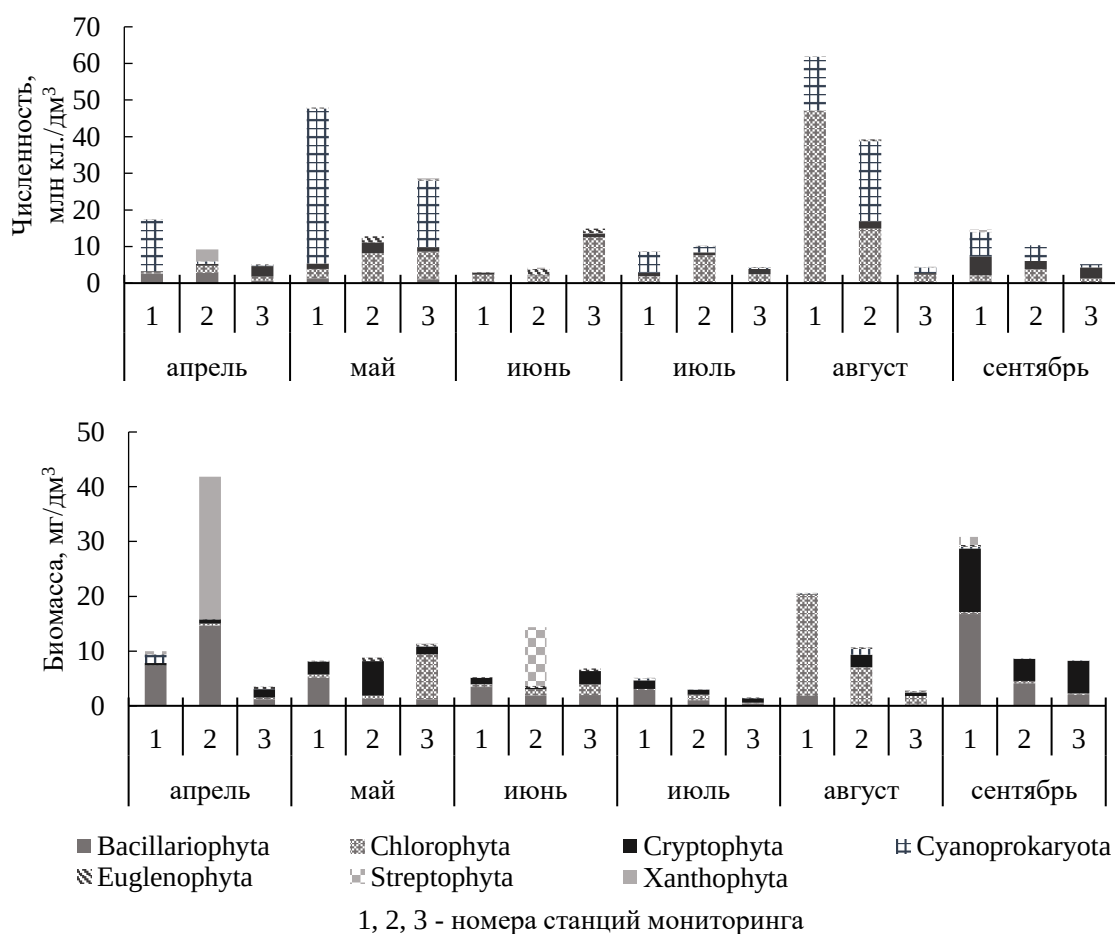


Рис. 5. Численность и биомасса фитопланктона за период мониторинга
Fig. 5. Phytoplankton abundance and biomass during the monitoring period

В изменении биомассы фитопланктона выделены два пика: весенний – апрель (18,4 мг/дм³) – и позднелетний (11,4 мг/дм³), плавно переходящий в осенний (15,9 мг/дм³), что согласуется с классической моделью развития фитопланктона в

умеренных широтах. Минимальные показатели биомассы сообщества наблюдались в июле.

Анализ общей биомассы фитопланктона выявил четкую сезонную смену доминирующих комплексов. На ст. 1 на протяжении большинства месяцев наблюдения, кроме августа, структуру фитопланктона определяли диатомовые водоросли, их доля варьировала от 54 до 73 % от общей биомассы (рис. 5). Значительный вклад в показатель (в среднем более 30 %) на всех трех станциях мониторинга обусловлен их способностью к прикрепленному образу жизни в условиях динамичной среды и может быть следствием условий отбора проб на прибрежных станциях.

В августе–сентябре наблюдалась смена доминирующего комплекса: на всех станциях мониторинга зафиксировано массовое развитие зеленых водорослей, сменившееся осенью криптомонадами. Вклад зеленых в общую биомассу в августе варьировал от 89 % на ст. 1 до 51 % на ст. 3. Криптофитовые в сентябре, напротив, увеличивали свою долю в обратном направлении с юга на север – от 38 до 72 %. Это свидетельствует о смене абиотических условий в водоеме в конце лета, когда повышенные температуры и накопление органических веществ способствуют экспансии сначала Chlorophyta, а затем, с охлаждением воды и началом процесса перемешивания, Cryptophyta. Регистрировались локальные вспышки развития отдельных таксонов. В июне на ст. 2 отмечено преобладание в биомассе стрептофитовых водорослей за счет *Mougeotia sp.* Аналогично, в апреле на той же станции отмечалось локальное доминирование желто-зеленых водорослей *Tribonema sp.*

В июле, августе и сентябре выявлена четкая тенденция снижения общей биомассы фитопланктона в направлении с севера на юг (от ст. 1 к ст. 3). По мере движения воды от северной части пруда к южной в эти месяцы, вероятно, происходит естественное потребление биогенных веществ живыми организмами и их оседание в донные отложения, вследствие чего к ст. 3 питательные вещества поступают в меньшем количестве. Это подтверждается данными гидрохимического анализа за весь рассматриваемый период 2024–2025 гг.

Рассчитанные коэффициенты корреляции демонстрируют умеренное и сильное отрицательное влияние осадков (–0,71 по биомассе и –0,41 по численности) на обе количественные характеристики фитопланктона, однако статистическая достоверность составила $p = 0,09$, что скорее указывает на тенденцию, чем на выявленную линейную зависимость. Очевидно, что в периоды выпадения обильных осадков (например, в июле) биомасса и численность фитопланктона в пруду закономерно снижаются.

Согласно критериям категории трофности по средней биомассе ($11,2 \pm 2,7$ мг/дм³) водоем можно отнести к эвтрофному, что характеризует пруд в Парке Победы как водный объект с высоким уровнем органического загрязнения [12, 20].

ВЫВОДЫ

Согласно данным гидрохимического и альгологического мониторинга, воды пруда по большинству исследованных параметров относятся к категории эвтрофных, β -мезосапробных. На экологическое неблагополучие указывают режим растворенного кислорода, превышение концентраций загрязняющих веществ по

биогенным элементам, стимулирующих интенсивное развитие альгоценоза, структура которого претерпевает выраженные сезонные изменения. Для фитопланктона характерна высокая пространственная и временная неоднородность. Это подтверждается колебаниями величин численности и биомассы фитопланктона (6–61 млн кл./дм³ и 1,5–41,9 мг/дм³). Количественно доминируют зеленые, диатомовые, цианобактерии и криптомонады, среди которых преобладают виды-космополиты, устойчивые к колебаниям факторов среды.

Северная часть пруда (ст. 1) подвергается максимальной нагрузке, в результате чего здесь наблюдается наиболее напряженная экологическая ситуация. Вероятной причиной является активное поступление биогенных элементов и, возможно, аллохтонного фитопланктона с выпадающими в северной части акватории водами.

Обнаруженные зависимости между атмосферными осадками и концентрацией железа ($r = 0,51$), уровнем органического загрязнения ($r = 0,54$ с лагом 30 дней) и количественными характеристиками фитопланктона ($r_b = -0,71$, $r_n = -0,41$) позволяют предположить наличие взаимосвязи между поверхностным стоком и формированием качества воды в исследуемом городском пруду.

Список источников

1. Ecosystem services provided by urban ponds and green spaces: a detailed study of a semi-natural site with global importance for research / V. Krivtsov, A. Arthur, S. Z. Zakeri [et al.]. – DOI: 10.2166/bgs.2022.021 // Blue-Green Systems. – 2022. – Vol. 4, № 1. – P. 1–23.
2. Oertli, B. Toward management of urban ponds for freshwater biodiversity: review / B. Oertli, K. Parris. – DOI: 10.1002/ecs2.2810 // Ecosphere. – 2019. – Vol. 10, № 7. – P. 1–33.
3. Hassall, C. The ecology and biodiversity of urban ponds / C. Hassall. – DOI: 10.1002/wat2.1014 // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. – 2014. – Vol. 1, № 2. – P. 187–206.
4. Urban ponds as an aquatic biodiversity resource in modified landscapes / M. Hill, J. Biggs, I. Thornhill [et al.]. – DOI: 10.1111/gcb.13401 // Global Change Biology. – 2017. – Vol. 23, № 3. – P. 986–999.
5. Challenges of urban artificial landscape water bodies: treatment techniques and restoration strategies towards ecosystem services enhancement / O. Addo-Bankas, Y. Zhao, A. Gómez, A. Stefanakis. – DOI: 10.3390/pr10122486 // Processes. – 2022. – Vol. 10, № 12. – P. 1–11.
6. Assessing biodiversity and regulatory ecosystem services in urban water bodies which serve as aqua-nature-based solutions / S. Martín Muñoz, J. L. Arlandis, J. M. Soria [et al.]. – DOI: 10.3389/fenvs.2023.1304347 // Frontiers in Environmental Science. – 2024. – Vol. 11. – P. 1–14.
7. Sink–source characteristics of carbon and nitrogen in four typical urban water bodies within a medium-sized city of East China / S. Xie, W. Gao, J. Sun [et al.]. – DOI: 10.3390/app15031434 // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, № 3. – P. 1–14.
8. Ecological restoration for eutrophication mitigation in urban interconnected water bodies: evaluation, variability and strategy / L. Wang, X. Hu, H. Zhang [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121475 // Journal of Environmental Management. – 2024. – Vol. 365.

9. Marques, P. Ecosystem functions in urban stormwater management ponds: a scoping review / P. Marques, N. Mandrak. – DOI: 10.3390/su16177766 // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, № 17. – P. 1–15.
10. Методы гидробиологических исследований внутренних вод / А. В. Крылов, А. А. Прокин, А. С. Кулизин [и др.]. – Борок; Ярославль: Филигрань, 2024. – 592 с.
11. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. – 318 с.
12. Китаев, С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон / С. П. Китаев. – Москва: Наука, 1984. – 207 с.
13. Никаноров, А. М. Гидрохимия / А. М. Никаноров. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. – 447 с.
14. Wetzel, R. G. Limnology: lake and river ecosystems / R. G. Wetzel. – DOI: 10.1016/C2009-0-02112-6. – Academic Press, 2001. – 1006 p.
15. Экологическое состояние водоемов городской черты Калининграда на разных этапах благоустройства / Е. А. Севостьянова, Е. Д. Кухарук, В. В. Моисеенко, Н. А. Цупикова. – DOI: 10.17217/2079-0333-2024-68-75-88 // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2024. – № 68. – С. 75–88.
16. Цупикова, Н. А. Некоторые гидролого-гидрохимические особенности и проблемы малых городских прудов на примере пруда Поплавок / Н. А. Цупикова, Е. А. Севостьянова. – DOI: 10.46845/1997-3071-2021-62-50-64 // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2021. – № 62. – С. 50–64.
17. Pochodyła-Ducka, E. Changes in storm-water quality and heavy metals content along the rainfall–runoff process in an urban catchment / E. Pochodyła-Ducka, K. Glińska-Lewczuk, A. Jaszczak. – DOI: 10.3390/w15193505 // Water. – 2023. – Vol. 15 (19). – Article number: 3505.
18. Padisák, J. Phycogeography of freshwater phytoplankton: traditional knowledge and new molecular tools / J. Padisák, G. Vasas, G. Borics. – DOI: 10.1007/s10750-015-2259-4 // Hydrobiologia. – 2015. – Vol. 764. – P. 3–27.
19. Трифонова, И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона / И. С. Трифонова. – Ленинград: Наука, 1990. – 184 с.
20. Неверова-Дзиопак, Е. Оценка трофического состояния поверхностных вод: моногр. / Е. Неверова-Дзиопак, Л. И. Цветкова. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГАСУ, 2020. – 176 с.

References

1. Ecosystem services provided by urban ponds and green spaces: a detailed study of a semi-natural site with global importance for research / V. Krivtsov, H. Forbes, S. Birkinshaw [et al.]. – DOI: 10.2166/bgs.2022.021 // Blue-Green Systems. – 2022. – Vol. 4, № 1. – P. 1–23.
2. Oertli, B. Toward management of urban ponds for freshwater biodiversity: Review / B. Oertli, K. Parris. – DOI: 10.1002/ecs2.2810 // Ecosphere. – 2019. – Vol. 10, № 7. – P. 1–33.

3. Hassall, C. The ecology and biodiversity of urban ponds / C. Hassall. – DOI: 10.1002/wat2.1014 // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. – 2014. – Vol. 1, № 2. – P. 187–206.
4. Urban ponds as an aquatic biodiversity resource in modified landscapes / M. Hill, J. Biggs, I. Thornhill [et al.]. – DOI: 10.1111/gcb.13401 // Global Change Biology. – 2017. – Vol. 23, № 3. – P. 986–999.
5. Challenges of urban artificial landscape water bodies: treatment techniques and restoration strategies towards ecosystem services enhancement / O. Addo-Bankas, Y. Zhao, A. Gomes, A. Stefanakis. – DOI: 10.3390/pr10122486 // Processes. – 2022. – Vol. 10, № 12. – P. 1–11.
6. Assessing biodiversity and regulatory ecosystem services in urban water bodies which serve as aqua-nature-based solutions / S. Muñoz, J. Schoelynck, D. Tetzlaff [et al.]. – DOI: 10.3389/fenvs.2023.1304347 // Frontiers in Environmental Science. – 2024. – Vol. 11. – P. 1–14.
7. Sink-source characteristics of carbon and nitrogen in four typical urban water bodies within a medium-sized city of East China / S. Xie, S. Yang, Y. Deng [et al.]. – DOI: 10.3390/app15031434 // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, № 3. – P. 1–14.
8. Ecological restoration for eutrophication mitigation in urban interconnected water bodies: evaluation, variability and strategy / L. Wang, X. Hu, H. Zhang [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121475 // Journal of Environmental Management. – 2024. – Vol. 365.
9. Marques, P. Ecosystem functions in urban stormwater management ponds: a scoping review / P. Marques, N. Mandrak. – DOI: 10.3390/su16177766 // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, № 17. – P. 1–15.
10. Methods of hydrobiological studies of inland waters / A. V. Krylov, A. A. Prokin, A. S. Kulizin [et al.]; ed. A. V. Krylov. – Borok; Yaroslavl: Filigran Publ., 2024. – 592 p.
11. Guide to methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments / ed. V. A. Abakumov. – Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1983. – 318 p.
12. Kitaev, S. P. Ecological foundations of the bioproductivity of lakes in different natural zones / S. P. Kitaev. – Moscow: Nauka Publ., 1984. – 207 p.
13. Nikanorov, A. M. Hydrochemistry / A. M. Nikanorov. – Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2001. – 447 p.
14. Wetzel, R. G. Limnology: lake and river ecosystems / R. G. Wetzel. – DOI: 10.1016/C2009-0-02112-6. – Academic Press, 2001. – 1006 p.
15. The ecological state of the water bodies in the urban area of Kaliningrad at different stages of improvement / E. A. Sevost'yanova, E. D. Kukharuk, V. V. Moiseenko, N. A. Tsupikova. – DOI: 10.17217/2079-0333-2024-68-75-88 // Bulletin of Kamchatka State Technical University. – 2024. – № 68. – P. 75–88.
16. Tsupikova, N. A. Some hydrological and hydrochemical features and problems of small urban ponds, using the example of the Poplavok pond / N. A. Tsupikova, E. A. Sevost'yanova. – DOI: 10.46845/1997-3071-2021-62-50-64 // Izvestiya KGTU. – 2021. – № 62. – P. 50–64.
17. Pochodyła-Ducka, E. Changes in storm-water quality and heavy metals content along the rainfall–runoff process in an urban catchment / E. Pochodyła-Ducka, K. Glińska-Lewczuk, A. Jaszczak. – DOI: 10.3390/w15193505 // Water. – 2023. – Vol. 15 (19). – Article number: 3505.

18. Padisák, J. Phycogeography of freshwater phytoplankton: traditional knowledge and new molecular tools / J. Padisák, G. Vasas, G. Borics. – DOI: 10.1007/s10750-015-2259-4 // Hydrobiologia. – 2015. – Vol. 764. – P. 3–27.

19. Trifonova, I. S. Ecology and succession of lake phytoplankton / I. S. Trifonova. – Leningrad: Nauka Publ., 1990. – 184 p.

20. Neverova-Dziopak, E. Assessment of trophic status of surface waters: monograph / E. Neverova-Dziopak, L. I. Tsvetkova. – Saint-Petersburg: SPbGASU Publ., 2020. – 176 p.

Информация об авторах

Н. А. Цупикова – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

Е. А. Севостьянова – кандидат биологических наук, ведущий инженер кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

А. Е. Погодина – студент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

А. В. Рудских – студент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

Information about the authors

N. A. Tsupikova – Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

E. A. Sevostyanova – Candidate of Biological sciences, lead engineer of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

A. E. Pogodina – student of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

A. V. Rudskikh – student of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 24.02.2026; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 16.04.2026.

The article was submitted 24.02.2026; approved after reviewing 01.04.2026; accepted for publication 16.04.2026.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Научная статья

УДК 621.66:637.358

DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-43-56

Метод определения допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании рыбного фарша с учетом его реологических свойств

Наталья Равиловна Ахмедова^{1✉}, Владимир Аркадьевич Наумов²

^{1, 2} Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ isfendi@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3483-3580>

² van-old@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью сохранения структуры и качества фаршевых систем из рыбного сырья при их межоперационном транспортировании коловратными насосами в технологических линиях пищевых производств. Существующие рекомендации производителей по ограничению частоты вращения ротора применимы преимущественно к ньютоновским жидкостям и не учитывают сложное реологическое поведение рыбного фарша, характеризующееся наличием предельного напряжения сдвига, псевдопластичностью и тиксотропным разрушением волокнистой структуры под действием сдвиговых деформаций. Цель работы – усовершенствование метода определения наибольшей допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании фаршевых систем из минтая с различными наполнителями (пшено, гречневая крупа, геркулес, ржаная мука). На основе реологической модели, описывающей касательное напряжение как сумму компонентов мгновенно-упругой деформации, пластического сдвига и вязкоупругого течения, получена аналитическая зависимость эффективной динамической вязкости от частоты вращения ротора. Для насосов серии JRZL выведена обобщенная формула связи допустимой частоты с рабочим объемом и безразмерной вязкостью перекачиваемой среды, где показатель степени $\beta = 0,181$ оказался постоянным для всей линейки. Разработан алгоритм решения нелинейного уравнения для расчета предельных режимов работы насоса. Установлено, что для RZL-120 переход от фарша без добавок к фаршу с ржаной мукой снижает допустимую частоту вращения с 232 до 68,7 об./мин. Предложенная методика позволяет обоснованно выбирать тип насоса и режим его работы, обеспечивая сохранение качества продукта и оптимизацию энергетических показателей.

Ключевые слова: коловратный насос, рыбный фарш, допустимая частота вращения ротора, эффективная динамическая вязкость, энергетическая эффективность.

Благодарности: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания НИОКР «Разработка и совершенствование инновационных процессов пищевой инженерии».

Для цитирования: Ахмедова Н. Р., Наумов В. А. Метод определения допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании рыбного фарша с учетом его реологических свойств // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 43–56. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-43-56.

Original article

Method for determining the maximum permissible rotor speed of rotary lobe pumps when pumping fish mince based on its rheological properties

Natal'ya R. Akhmedova^{1✉}, Vladimir A. Naumov²

^{1, 2} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ isfendi@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3483-3580>

² van-old@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

Abstract. The relevance of the study is determined by the need to preserve the structure and quality of fish mince systems during their inter-operational transportation by rotary lobe pumps in food production lines. Existing manufacturers' recommendations on limiting rotor speed are primarily applicable to Newtonian fluids and do not account for the complex rheological behaviour of fish minces, which is characterized by yield stress, pseudoplasticity, and thixotropic destruction of the fibrous structure under shear deformation. The aim of this work is to improve the method for determining the maximum permissible rotor speed of rotary lobe pumps when pumping pollock mince with various fillers (millet, buckwheat, oat flakes, rye flour). Based on a rheological model describing shear stress as a sum of instantaneous-elastic deformation, plastic shear, and viscoelastic flow components, an analytical dependence of effective dynamic viscosity on rotor speed has been derived. For JRZL-series pumps, a generalized formula relating permissible speed to pump working volume and dimensionless viscosity of the pumped medium has been obtained, with the exponent $\beta = 0.181$ remaining constant across the entire pump line. An algorithm for solving the nonlinear equation to calculate limiting pump operating modes has been developed. It has been found that for the RZL-120 pump, transitioning from mince without additives to mince with rye flour reduces the permissible rotor speed from 232 to 68.7 rpm. The proposed methodology enables a scientific election of pump type and operating mode, ensuring product quality preservation and optimization of energy efficiency indicators in food processing technologies.

Keywords: rotary lobe pump, fish mince, maximum permissible rotor speed, effective dynamic viscosity, energy efficiency.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state assignment for R&D "Development and improvement of innovative processes in food engineering".

For citation: Akhmedova N. R., Naumov V. A. Method for determining the maximum permissible rotor speed of rotary lobe pumps when pumping fish mince based on its rheological properties. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):43–56. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-43-56.

ВВЕДЕНИЕ

В известной монографии А. В. Горбатова [1] приведены результаты сравнения разных типов объемных насосов, используемых для межоперационного транспортирования фаршевых систем (ФС) по технологическому трубопроводу. Было установлено, что особая конструкция коловратного насоса (КН) обеспечивает неизменность реологических свойств ФС при довольно высоком давлении нагнетания и наибольший КПД по сравнению с другими типами насосов (винтовыми, шестеренными). В статье [2] показано, что эти утверждения справедливы и для подачи ФС современными КН, которые к тому же позволяют регулировать подачу с помощью изменения частоты вращения ротора (ЧВР).

Главным недостатком КН является высокая стоимость, обусловленная сложностью конструкции и повышенными требованиями к материалам и качеству сборки, поэтому длительное время использование КН в пищевой промышленности было весьма ограничено. Последние десятилетия КН все больше применяются для подачи ФС и других пищевых сред, так как это позволяет сохранить структуру продукта, не допустить снижения его качества при межоперационном транспортировании. Возросло внимание исследователей к проблемам проектирования, изготовления и эксплуатации КН [3–7]. Так, в [3, 4] были разработаны методы моделирования нагрузочных характеристик КН с помощью численного решения системы уравнений Навье-Стокса для проточной части КН. Такие методы весьма трудоемкие, они целесообразны при проектных расчетах КН. В лабораторных условиях [5] была установлена зависимость производительности КН от динамической вязкости μ перекачиваемых сред. В [6, 7] предложен метод моделирования рабочих характеристик КН по данным заводских испытаний, содержащимся в технической документации. Было показано, что при сравнительно небольшой вязкости производительность КН возрастает с увеличением μ , однако при $\mu > \mu_p$ (где предельное значение $\mu_p = 0,5\text{--}1,0$ Па·с в зависимости от конструкции КН) производительность уже не возрастает, а остается равной теоретическому значению:

$$Q_T = V \cdot n, \quad (1)$$

где V – рабочий объем КН (наибольший объем жидкости, перекачиваемый за один оборот ротора), n – ЧВР.

Заметим, что для ФС условие $\mu > 1,0$ Па·с практически всегда выполняется.

По формуле (1) производительность КН прямо пропорциональна ЧВР, но в [1] и других публикациях указывается, что чрезмерное увеличение ЧВР может привести не только к разрушению структуры транспортируемого продукта, а значит, к ухудшению его качества, но и к нестабильной работе насосного оборудования. Последние годы некоторые компании, выпускающие КН (например, [8, 9]), в технической документации стали приводить рекомендации по ограничению ЧВР в зависимости от вязкости перекачиваемого продукта. Однако непосредственно воспользоваться этими рекомендациями можно лишь для ньютоновских жидкостей, так как в них не учитывается зависимость эффективной динамической вязкости пищевых продуктов от сдвига скорости.

В статье [10] выполнен анализ зависимости наибольшей допустимой частоты вращения ротора (НД ЧВР) n_m от рабочего объема коловратных насосов (РОКН) и эффективной динамической вязкости (ЭДВ) перекачиваемой пищевой

жидкости. Результаты испытаний КН линейки Vitalobe компании KSB Aktien-gesellschaft были использованы в качестве исходных данных. Проведенный анализ показал, что при любых условиях величина НД ЧВР снижается с ростом ЭДВ перекачиваемой среды. Однозначной зависимости НД ЧВР от РОКН в [10] установить не удалось. При значениях ЭДВ более 1000 сПз просматривалась тенденция некоторого роста НД ЧВР с увеличением РОКН (при низком коэффициенте парной корреляции). В [11] был разработан метод определения НД ЧВР КН при подаче вязкой среды, если известна зависимость ЭДВ от градиента скорости. Приведены примеры использования предложенного метода для определения НД ЧВР КН Vitalobe при транспортировании двух образцов плавленого сыра. Непосредственно этот метод не может быть использован для фаршевых рыбных систем (ФРС), так как у ФРС гораздо более сложное реологическое поведение. Реологические свойства ФРС исследовались в целом ряде трудов [12–16]. В [16] была предложена реологическая модель ФРС, описывающая напряжение сдвига с учетом мгновенно-упругой деформации, пластического сдвига, вязкоупругого течения и тиксотропного разрушения волокнистой структуры, что создает основу для последующего математического моделирования процесса экструдирования.

Цель статьи – усовершенствовать метод определения наибольшей допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании ФРС с учетом их специфических реологических свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является процесс подачи ФРС насосами линейки КН JRZL компании JEC pumps [9], предметом исследования – НД ЧВР. Технические параметры этих насосов представлены в табл. 1, а НД ЧВР – в табл. 2.

Производительность КН при подаче фарша из минтая будем рассчитывать по (1), а затраченную мощность по формуле из [7, 8]:

$$N = n \cdot V \cdot (b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot \mu b^\chi), \quad (2)$$

где n – ЧВР, с^{-1} ; b_0, b_1, b_2, χ – эмпирические константы; $p = P/P_A$ – безразмерный перепад давления; P – перепад давления, Па; P_A – атмосферное давление; $\mu b = \mu/\mu_0$ – безразмерная эффективная динамическая вязкость (БЭДВ); μ – эффективная динамическая вязкость, Па·с; μ_0 – динамическая вязкость воды при 20 °С, Па·с.

Значения эмпирических констант в (2) были найдены методом наименьших квадратов. Например, для КН марки RZL-120 они следующие: $b_0=0,104$; $b_1=0,120$; $b_2=0,01621$; $\chi=0,348$.

Гидравлический коэффициент полезного действия (ГКПД) КН η и показатель удельных энергетических затрат (ПУЭЗ) E будем рассчитывать по известным формулам:

$$\eta = 100 \cdot Q \cdot P / N, E = N / Q, \quad (3)$$

где Q – объемный расход (подача КН), $\text{м}^3/\text{с}$; P – перепад давления, кПа; N – затраченная мощность, кВт.

Таблица 1. Технические параметры КН линейки JRZL с двухкулачковыми серповидными роторами [9]

Table 1. Technical parameters of rotary lobe pumps of the JRZL series with two-lobe crescent-shaped rotors [9]

№№ пп	Марка КН	n_m , об./мин	P_m , МПа	V , дм ³	d , мм
1	RZL-110	1000	2,0	0,05	25
2	RZL-120	800	0,8	0,21	50
3	RZL-220	700	1,2	0,40	50
4	RZL-330	600	1,2	1,02	76
5	RZL-440	500	1,2	2,27	100

Примечание: n_m – предельное значение ЧВР КН для воды и маловязких жидкостей, P_m – наибольшее допустимое давления нагнетания, V – рабочий объем КН, d – стандартный присоединительный размер (внутренний диаметр).

Таблица 2. Наибольшие допустимые значения ЧВР КН JRZL, об./мин [9]

Table 2. Maximum permissible rotor speeds of JRZL series rotary lobe pumps, rpm [9]

μ , сПз	Номер КН серии JRZL				
	110	120	220	330	440
1–100	1000	800	700	600	500
100–1000	667	533	467	400	333
1000–5000	417	333	292	250	208
5000–10000	250	200	175	150	125
10000–20000	167	133	117	100	83
20000–50000	117	93	82	70	58
50000–100000	83	67	58	50	42

В экспериментах [16] были исследованы фаршевые системы из минтая (ФСМ) следующего состава: ФСМ-1 – без добавок; в остальные фаршевые системы были добавлены сухое обезжиренное молоко, костная минеральная мука и еще один компонент: в ФСМ-2 – пшено, в ФСМ-3 – гречневая крупа, в ФСМ-4 – геркулес, в ФСМ-5 – ржаная мука. На рис. 1 представлена зависимость касательных напряжений от сдвига различных образцов ФСМ [16].

В [16] было показано, что экспериментальные зависимости, представленные на рис. 1, могут быть описаны формулой:

$$\tau = T_1 \cdot (-\omega \cdot t_1) + T_2 \cdot (-\omega \cdot t_2) + \mu_n \cdot \omega, \quad (4)$$

где τ – касательное напряжение, Па; T_1 – напряжение внешнего трения о стенки канала в момент начала движения волокнистой структуры, Па; T_2 – напряжение внутренней прочности в тот же момент, Па; ω – сдвиг (градиент) скорости, с⁻¹; μ_n – коэффициент псевдопластической вязкости диспергированной фазы фаршевой системы, Па·с; t_1, t_2 – временные факторы, характеризующие разрушение волокнистой структуры фаршевой системы, с; причем $t_1 > 0$; $t_2 > 0$; $T_1 + T_2 = \tau_0$ – предельное напряжение сдвига.

Сдвиг скорости в рабочей камере КН приблизительно оценивают как $\omega \approx 2\pi \cdot n$, ($\pi=3,14$; n – ЧВР, с^{-1}). Поэтому зависимость ЭДВ от ЧВР, используя (4), можно рассчитать по такой формуле:

$$\mu = \varphi(n) = [T_1 \cdot (-2\pi \cdot n \cdot t_1) + T_2 \cdot (-2\pi \cdot n \cdot t_2)] / (2\pi \cdot n) + \mu_n. \quad (5)$$

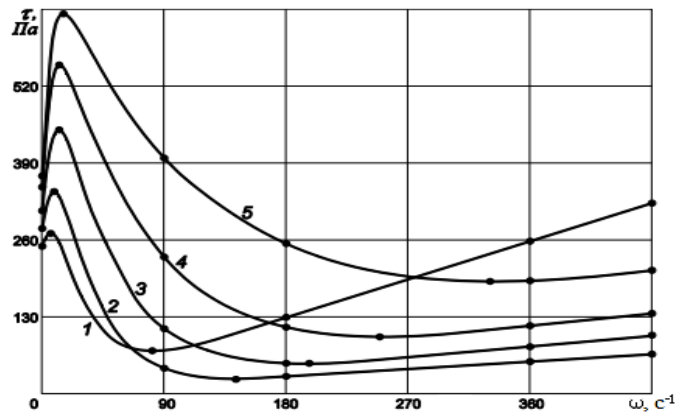


Рис. 1. Касательные напряжения в фаршевой системе из минтая с различными наполнителями: 1 – ФСМ-1; 2 – ФСМ-2; 3 – ФСМ-3; 4 – ФСМ-4; 5 – ФСМ-5.

Результаты экспериментального исследования из [16]

Fig. 1. Shear stress in pollock mince systems (PMS) with various fillers: 1 – PMS-1; 2 – PMS-2; 3 – PMS-3; 4 – PMS-4; 5 – PMS-5. Experimental results from [16]

На рис. 2 представлены результаты расчета по формуле (5). Видно, что при небольших значениях ЧВР наименьшая величина ЭДВ у ФСМ-1 (фарш минтая без добавок). При больших значениях ЧВР у ФСМ-1 величина ЭДВ наибольшая из всех исследованных образцов.

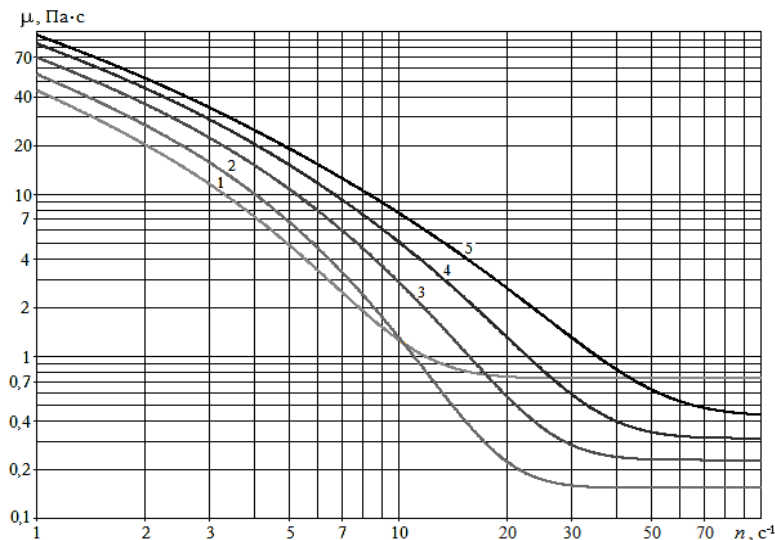


Рис. 2. Зависимость ЭДВ в фаршевой системе из минтая с различными наполнителями от ЧВР: 1 – ФСМ-1; 2 – ФСМ-2; 3 – ФСМ-3; 4 – ФСМ-4; 5 – ФСМ-5

Fig. 2. Dependence of effective dynamic viscosity on rotor speed in pollock mince systems (PMS) with various fillers: 1 – PMS-1; 2 – PMS-2; 3 – PMS-3; 4 – PMS-4; 5 – PMS-5

Если, как в [11], найти зависимость НД ЧВР от ЭДВ $n_M = f(\mu)$ для разных КН, то это позволит определить НД ЧВР в заданных условиях по точке указанного графика и $\mu = \varphi(n)$. То есть для расчета n_M необходимо решить алгебраическое уравнение (6):

$$n_M - f[\varphi(n_M)] = 0. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В [10] была выдвинута гипотеза, что зависимость НД ЧВР от БЭДВ и рабочего объема КН можно рассчитать по формуле:

$$n_M = B(\mu b) / \nu^{\beta(\mu b)}, \quad \nu = V/V_0, \quad V_0 = 1 \text{ дм}^3, \quad (7)$$

где ν – безразмерный рабочий объем КН; β , B – эмпирические функции аргумента БЭДВ.

Как указано выше, для КН серии Vitalobe функция $B(\mu b)$ оказалась убывающей. Зависимость $\beta(\mu b)$ в [10] установить не удалось. Статистический анализ данных табл. 2 показал, что для КН серии JRZL $\beta=0,181$ и не зависит от БЭДВ (относительное среднее квадратичное отклонение менее 0,1 %). Для аппроксимации зависимости B от БЭДВ была получена формула (8), результаты расчета по которой хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 3):

$$B = \begin{cases} 1685 / \mu b^{0,221} & \text{при } \mu b \leq 3170, \\ 18900 / \mu b^{0,520} & \text{при } \mu b > 3170. \end{cases} \quad (8)$$

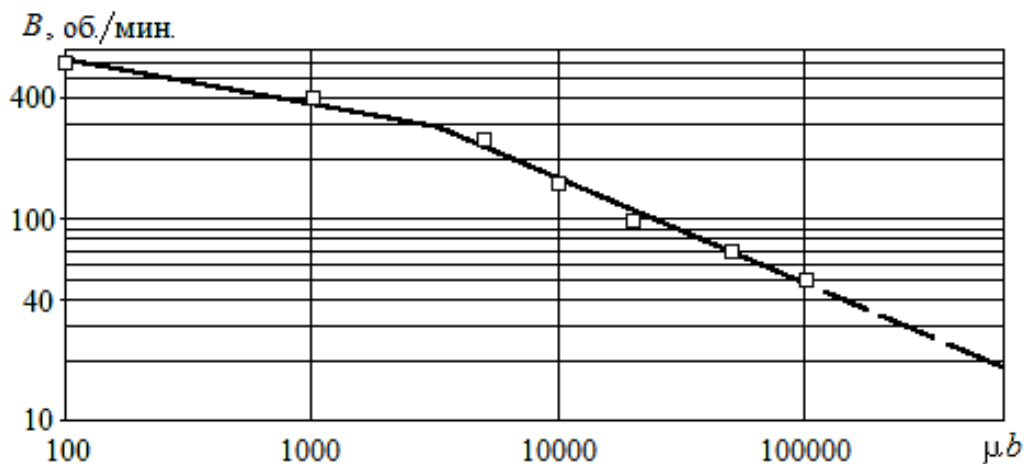


Рис. 3. Зависимость величины B в формуле (7) для КН серии JRZL от динамической вязкости перекачиваемой среды. Точки – по опытным данным, линия – по формуле (8)

Fig. 3. Dependence of parameter B in equation (7) for JRZL-series rotary lobe pumps on the dynamic viscosity of the pumped medium. Symbols – experimental data, line – calculated by equation (8)

Был рассчитан индекс детерминации R^2 для зависимости (8), скорректированный с учетом малого количества экспериментальных точек ($s=7$):

$$1 - (1 - R^2) \cdot (s - 1) / (s - r - 1) = 0,956,$$

где r – количество эмпирических коэффициентов, определяемых по выборке.

При значениях индекса детерминации, близких к единице, строить границы доверительных интервалов нецелесообразно, так как они расположены близко от основной линии графика.

На рис. 4 (а, б) представлены зависимости НД ЧВР КН JRZL от БЭДВ и РОКН соответственно. Видно, что результаты расчета вполне удовлетворительно согласуются с данными табл. 2; значение индекса детерминации также весьма высоко – $R^2 = 0,983$.

Графическая интерпретация определения НД ЧВР КН показана на рис. 5.

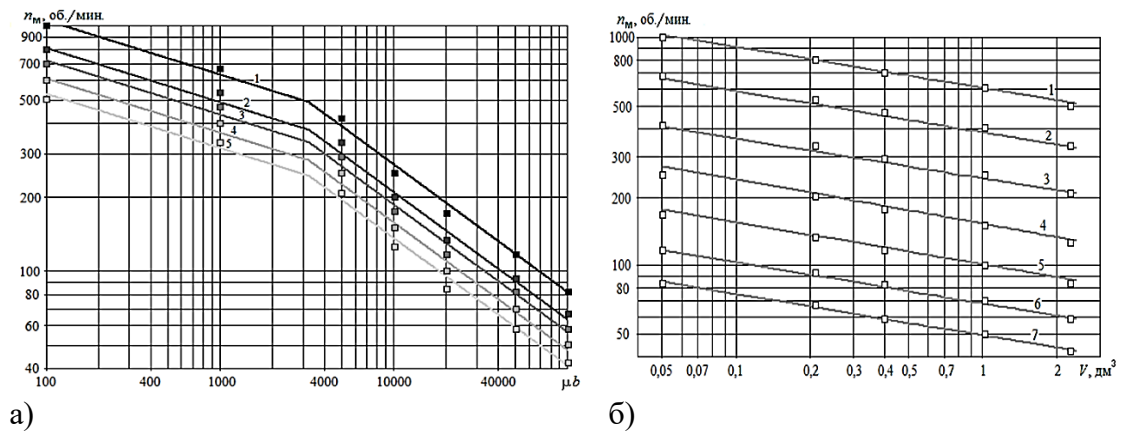


Рис. 4. Зависимость НД ЧВР КН линейки JRZL:

- а) от БЭДВ: 1 – RZL-110; 2 – RZL-120; 3 – RZL-220; 4 – RZL-330; 5 – RZL-440;
б) от рабочего объема: 1 – $\mu b=100$; 2 – $\mu b=1000$; 3 – $\mu b=5000$; 4 – $\mu b=10000$;
5 – $\mu b=20000$; 6 – $\mu b=40000$; 7 – $\mu b=100000$. Точки – экспериментальные данные из табл. 2, линии – расчет по (7)

Fig. 4. Dependence of the maximum permissible rotor speed of JRZL series rotary lobe pumps: а) on dimensionless effective dynamic viscosity: 1 – RZL-110; 2 – RZL-120; 3 – RZL-220; 4 – RZL-330; 5 – RZL-440;
b) on working volume: 1 – $\mu b=100$; 2 – $\mu b=1000$; 3 – $\mu b=5000$; 4 – $\mu b=10000$;
5 – $\mu b=20000$; 6 – $\mu b=40000$; 7 – $\mu b=100000$. Symbols – experimental data from Table 2, lines – calculated by equation (7)

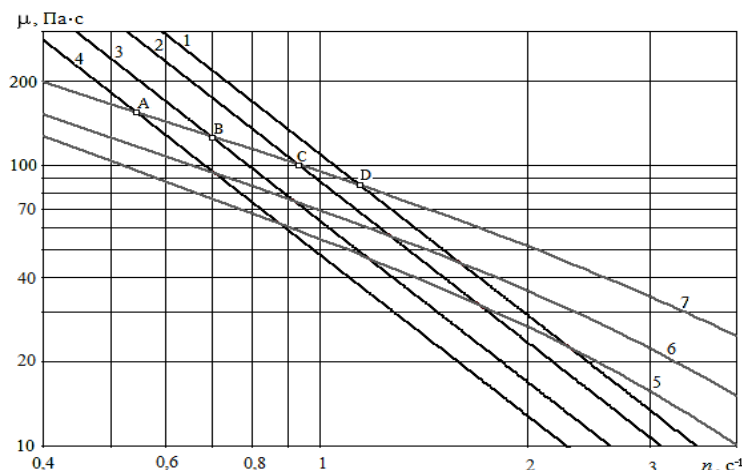


Рис. 5. Определение НД ЧВР КН серии JRZL при подаче различных ФСМ:

1 – связь μ и n_M RZL-120; 2 – RZL-220; 3 – RZL-330; 4 – RZL-440;

5 – зависимость ЭДВ от ЧВР ФСМ-2; 6 – ФСМ-3; 7 – ФСМ-5

Fig. 5. Determination of the maximum permissible rotor speed of JRZL series rotary lobe pumps when pumping various pollock mince systems (PMS):

1 – μ vs. n_M relationship for RZL-120; 2 – RZL-220; 3 – RZL-330; 4 – RZL-440;

5 – effective dynamic viscosity vs. rotor speed dependence for PMS-2; 6 – PMS-3;

7 – PMS-5

Рассмотрим подробнее определение НД ЧВР при подаче ФСМ-5. Точки обозначают пересечение графика зависимости $\mu=f(n)$ указанной фаршевой системы с линиями $n_M = f(\mu)$ четырех КН серии JRZL: А – RZL-440, $n_M = 0,544 \text{ с}^{-1}$ или 32,6 об./мин, В – RZL-330, $n_M = 0,696 \text{ с}^{-1}$ или 41,8 об./мин, С – RZL-220, $n_M = 0,932 \text{ с}^{-1}$ или 55,9 об./мин, D – RZL-120, $n_M = 1,145 \text{ с}^{-1}$ или 68,7 об./мин. Аналогичным образом с помощью решения уравнения (6) численным методом находятся значения n_M в других точках пересечения на рис. 6. Зная n_M , можно рассчитать подачу КН по формуле (1), затраченную мощность – по формуле (2), показатели энергетической эффективности – по формуле (3). Часть таких результатов приведена в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Результаты расчета НД ЧВР четырех КН серии JRZL, ЭДВ, подачи, затраченной мощности и показателей энергетической эффективности для ФСМ-1 ($p=1$)

Table 3. Calculated values of maximum permissible rotor speed, effective dynamic viscosity, flow rate, power consumption and energy efficiency parameters for pollock mince system PMS-1 ($p=1$)

Марка КН серии JRZL	n_M		μ	Q	N	η	E
	с^{-1}	об./мин	$\text{Па}\cdot\text{с}$	$\text{дм}^3/\text{с}$	кВт	%	$\text{кДж}/\text{дм}^3$
120	4,03	232	7,11	0,846	0,490	17,3	0,579
220	2,55	153	14,46	1,02	1,236	14,7	1,211
330	1,57	94,1	26,65	1,60	1,257	12,7	0,786
440	1,12	67,3	38,39	2,55	2,196	11,6	0,862

Таблица 4. Результаты расчета НД ЧВР четырех КН серии JRZL, ЭДВ, подачи, затраченной мощности и показателей энергетической эффективности для ФСМ-2 ($p=1$)

Table 4. Calculated values of maximum permissible rotor speed, effective dynamic viscosity, flow rate, power consumption and energy efficiency parameters for pollock mince system PMS-2 ($p=1$)

Марка КН серии JRZL	n_M		μ	Q	N	η	E
	c^{-1}	об/мин	Па·с	дм ³ /с	кВт	%	кДж/дм ³
120	2,28	137	22,39	0,480	0,361	13,3	0,753
220	1,70	102	31,77	0,678	0,688	12,2	1,015
330	1,17	70,3	46,64	1,20	1,084	11,0	0,907
440	0,877	52,6	61,63	1,99	1,944	10,2	0,976

На основании данных, представленных в табл. 3 и 4, можно проследить уменьшение величины НД ЧВР с увеличением рабочего объема насоса. При этом ЭДВ, подача и затраченная мощность увеличиваются, а ГКПД снижается. Монотонное возрастание ПУЭЗ нарушается наибольшим значением этого показателя у КН RZL-220. Покажем, как воспользоваться результатами расчетов табл. 3 и 4 для выбора насоса. Пусть необходимо подобрать КН для ФСМ-2 с подачей $Q_0 = 0,9$ дм³/с. По табл. 4 у RZL-220 подача меньше Q_0 , а у RZL-330 – больше. Получить заданную подачу можно либо увеличением ЧВР у RZL-220, либо уменьшением у RZL-330, но увеличивать ЧВР у первого насоса нельзя (так будет превышено значение n_M), поэтому следует уменьшить ЧВР у RZL-330 до значения $n_1 = n_M \cdot Q_0 / 1,2 = 70,3 \cdot 0,9 / 1,2 = 52,7$ об./мин.

Интересно проследить, как изменяются показатели работы насоса для разных образцов ФСМ. В табл. 5 представлены результаты такого расчета для КН RZL-120.

Таблица 5. Результаты расчета НД ЧВР КН RZL-120, ЭДВ, подачи, затраченной мощности и показателей энергетической эффективности для образцов ФСМ (при $p=1$)

Table 5. Calculated values of maximum permissible rotor speed, effective dynamic viscosity, flow rate, power consumption and energy efficiency parameters for pollock mince system samples using RZL-120 pump ($p=1$)

Образец ФСМ	n_M		μ	Q	N	η	E
	c^{-1}	об./мин	Па·с	дм ³ /с	кВт	%	кДж/дм ³
ФСМ-1	4,03	232	7,11	0,846	0,490	17,3	0,579
ФСМ-2	2,28	137	22,39	0,480	0,361	13,3	0,753
ФСМ-3	1,60	95,7	44,67	0,335	0,301	11,2	0,897
ФСМ-4	1,29	77,5	67,15	0,271	0,271	10,0	0,999
ФСМ-5	1,14	68,7	84,64	0,240	0,256	9,4	1,064

Согласно данным табл. 5, используя указанный насос, наибольшую величину ЧВР можно установить при транспортировании ФСМ-1 (232 об./мин), наименьшую – при транспортировании ФСМ-5 (68,7 об./мин). При этом в первом случае подача будет 0,846 дм³/с, затраченная мощность – 0,49 кВт, ПУЭЗ –

0,579 кДж/дм³. Во втором случае все показатели уменьшились и составили 0,24 дм³/с, 0,256 кВт, 1,064 кДж/дм³ соответственно.

Как было указано выше, подача КН не зависит от перепада давления для сред с такой большой вязкостью. Значит, все результаты расчета Q останутся справедливыми и для иных значений перепада давления. Другие показатели работы КН (N , η , E) зависят от величины p , причем сам перепад давления будет меняться с изменением подачи. Поэтому для уточнения значений указанных показателей их следует рассчитывать в рабочей точке насосной установки, для чего необходимо иметь рабочую характеристику трубопровода.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенный метод позволяет определять наибольшую допустимую частоту вращения ротора коловратного насоса при перекачивании фаршевых систем из рыбного сырья с учетом их специфических реологических свойств. Чтобы рассчитать НД ЧВР, необходимо знать параметры реологической модели фарша и эмпирические зависимости допустимой частоты от вязкости для конкретной серии насосов.

Для коловратных насосов серии JRZL получена обобщенная формула $n_M = B(\mu b)/\nu^{\beta(\mu b)}$, где показатель степени β оказался постоянным ($\beta=0,181$), а функция $B(\mu b)$ аппроксимирована с высокой степенью согласия с экспериментальными данными.

Разработанный алгоритм решения нелинейного уравнения $n_M - f[\varphi(n_M)] = 0$ позволяет определить предельные режимы работы насоса для конкретных фаршевых систем из минтая с различными наполнителями. Установлено, что НД ЧВР снижается как с увеличением рабочего объема насоса, так и с усложнением состава фаршевой системы: для насоса RZL-120 при переходе от фарша без добавок (ФСМ-1) к фаршу с ржаной мукой (ФСМ-5) НД ЧВР уменьшается с 232 до 68,7 об./мин, а удельные энергетические затраты возрастают в 1,8 раз. Это связано с тем, что добавление наполнителей повышает эффективную динамическую вязкость фарша при высоких градиентах скорости и усиливает эффект разрушения структуры, что требует снижения частоты вращения для сохранения качества продукта.

Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать тип коловратного насоса и режим его работы при заданной подаче, обеспечивая сохранение структуры рыбного фарша и оптимизацию энергетических показателей насосной установки в технологических линиях производства экструдированной продукции.

Список источников

1. Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов: моногр. / А. В. Горбатов. – Москва: Пищ. пром-сть, 1979. – 384 с.
2. Наумов, В. А. Производительность и энергетическая эффективность коловратного насоса при перекачивании мясного фарша / В. А. Наумов. – DOI: 10.21323/2071-2499-2024-4-44-48 // Все о мясе. – 2024. – № 4. – С. 27–32.
3. Kang, Y. H. Factors impacting on performance of lobe pumps: a numerical evaluation / Y. H. Kang, Y. H. Vu, C. Hsu. – DOI: 10.1017/jmech.2012.26 // Journal of Mechanics. – 2012. – Vol. 28, № 2. – P. 229–238.

4. Li, Y. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap / Y. Li, D. Guo, X. Li. – DOI: 10.1080/19942060.2018.1517053 // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2018. – Vol. 12. – P. 711–723.
5. Li, Y. B. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump / Y. B. Li, J. Du, D. S. Guo. – DOI: 10.1007/s40430-019-1781-0 // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 41. – P. 1–11.
6. Ахмедова, Н. Р. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на энергетическую эффективность кулачковых насосов / Н. Р. Ахмедова, О. И. Левичева, В. А. Наумов. – DOI: 10.26297/0579-3009.2023.5-6.14 // Известия вузов. Пищевая технология. – 2023. – № 5–6 (394). – С. 88–93.
7. Левичева, О. И. Усовершенствование аналитической модели нагрузочных характеристик пищевых коловратных насосов / О. И. Левичева // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2025. – Т. 11, № 1. – С. 18–27.
8. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet. – Текст: электронный // KSB Aktiengesellschaft: сайт. – URL: <https://www.ksb.com/en-se/lc/products/pump/dry-installed-pump/vitalobe/V06A> (дата обращения: 02.12.2025).
9. Operating & Maintenance Manual for JRZL-100 Series Rotary Lobe Pumps. – Текст: электронный // Dixon: сайт. – URL: https://dixonvalve.com/sites/default/files/documents/Rotary-Lobe-Pumps-JRZL-100-Series_0.pdf (дата обращения: 31.12.2025).
10. Наумов, В. А. Зависимость наибольшей допустимой частоты вращения ротора от рабочего объема коловратных насосов и вязкости пищевой жидкости / В. А. Наумов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 26–35.
11. Наумов, В. А. Допустимая частота вращения ротора коловратного насоса при транспортировании плавленых сыров / В. А. Наумов, О. И. Левичева. – DOI: 10.21603/2073-4018-2025-3-27 // Сыроделие и маслоделие. – 2025. – № 3. – С. 98–103.
12. Исследование влияния структурорегулирующих добавок на свойства рыбных фаршевых систем / В. Д. Богданов, А. А. Симдянкин, А. В. Панкина, В. Д. Мостовой. – DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-3-219-230 // Вестник МГТУ. – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 219–230.
13. Исследование реологических характеристик рыбного фарша из объектов аквакультуры / Ю. А. Фатыхов, Д. Л. Альшевский, В. И. Устич [и др.]. – DOI: 10.24143/2073-5529-2023-3-119-128 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2023. – № 3. – С. 119–128.
14. Совершенствование технологии рыбного фарша из прудовых рыб и оценка качества кулинарных изделий из него / Н. В. Ярцева, Н. В. Долганова, И. Ю. Алексанян, А. Х.-Х. Нугманов. – DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-2-7 // Индустрия питания. – 2022. – Т. 7, № 2. – С. 61–71.
15. Gorbatovskiy, A. A. Minced products from undersized sea fish: new industrial technology / A. A. Gorbatovskiy, I. L. Rakityanskaya, M. V. Kaledina. – DOI: 10.21603/2308-4057-2021-1-87-94 // Foods and Raw Materials. – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 87–94.
16. Агеев, О. В. Обоснование реологической модели фаршевой системы из рыбного сырья при производстве экструдированной продукции / О. В. Агеев // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 6–25.

References

1. Gorbatov, A. V. Rheology of meat and dairy products: monogr. / A. V. Gorbatov. – Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1979. – 384 p.
2. Naumov, V. A. Productivity and energy efficiency of the lobe pump for minced meat pumping / V. A. Naumov. – DOI: 10.21323/2071-2499-2024-4-44-48 // All about meat. – 2024. – № 4. – P. 27–32.
3. Kang, Y. H. Factors impacting on performance of lobe pumps: a numerical evaluation / Y. H. Kang, Y. H. Vu, C. Hsu. – DOI: 10.1017/jmech.2012.26 // Journal of Mechanics. – 2012. – Vol. 28, № 2. – P. 229–238.
4. Li, Y. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap / Y. Li, D. Guo, X. Li. – DOI: 10.1080/19942060.2018.1517053 // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2018. – Vol. 12. – P. 711–723.
5. Li, Y. B. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump / Y. B. Li, J. Du, D. S. Guo. – DOI: 10.1007/s40430-019-1781-0 // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 41. – P. 1–11.
6. Akhmedova, N. R. Influence of liquid food products viscosity on the lobe pumps energy efficiency / N. R. Akhmedova, O. I. Levicheva, V. A. Naumov. – DOI: 10.26297/0579-3009.2023.5-6.14 // Proceedings of Higher Education Institutions. Food Technology. – 2023. – № 5–6 (394). – P. 88–93.
7. Levicheva, O. I. Improvement of the analytical model of the food lobe pumps load characteristics / O. I. Levicheva // Bulletin of Science and Education of North-West Russia. – 2025. – Vol. 11, № 1. – P. 18–27.
8. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet. – Text: electronic // KSB Aktiengesellschaft: site. – URL: <https://www.ksb.com/en-se/lc/products/pump/dry-installed-pump/vitalobe/V06A> (date of treatment: 02.12.2025).
9. Operating & Maintenance Manual for JRZL-100 Series Rotary Lobe Pumps. – Text: electronic // Dixon: website. – URL: https://dixonvalve.com/sites/default/files/documents/Rotary-Lobe-Pumps-JRZL-100-Series_0.pdf (date of treatment: 31.12.2025).
10. Naumov, V. A. Dependence of the maximum allowable rotor speed on the lobe pumps working volume and the viscosity of the food liquid / V. A. Naumov // Bulletin of Science and Education of North-West Russia. – 2025. – Vol. 11, № 3. – P. 26–35.
11. Naumov, V. A. Inter-Operational Conveying of Processed Cheese Spreads: Permissible Rotation Speed of Rotary Lobe Pump. / V. A. Naumov, O. I. Levicheva. – DOI: 10.21603/2073-4018-2025-3-27 // Cheese and Butter Making. – 2025. – № 3. – P. 98–103.
12. Investigation of the effect of structure-regulating additives on the properties of minced fish systems / V. D. Bogdanov, A. A. Simdyankin, A. V. Pankina, V. D. Mostovoy. – DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-3-219-230 // Bulletin of MSTU. – 2022. – Vol. 25, № 3. – P. 219–230.
13. Study of the rheological properties of minced fish from aquaculture objects / Yu. A. Fatykhov, D. L. Alshevsky, V. I. Ustich [et al.]. – DOI: 10.24143/2073-5529-2023-3-119-128 // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. – 2023. – № 3. – P. 119–128.

14. Technology Improvement of Minced Fish from Pond Fish and Quality Assessment of Culinary Products / N. V. Yartseva, N. V. Dolganova, I. Yu. Aleksanyan, A. Kh.-Kh. Nugmanov. – DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-2-7 // Food Industry. – 2022. – Vol. 7, № 2. – P. 61–71.

15. Gorbatovskiy, A. A. Minced products from undersized sea fish: new industrial technology / A. A. Gorbatovskiy, I. L. Rakityanskaya, M. V. Kaledina. – DOI: 10.21603/2308-4057-2021-1-87-94 // Foods and Raw Materials. – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 87–94.

16. Ageev, O. V. Substantiation of a rheological model for a fish-based mince system in the production of extruded products / O. V. Ageev // Bulletin of Science and Education of North-West Russia. – 2025. – Vol. 11, № 3. – P. 6–25.

Информация об авторах

Н. Р. Ахмедова – кандидат биологических наук, заведующая кафедрой техносферной безопасности и природообустройства

В. А. Наумов – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства

Information about the authors

N. R. Akhmedova – Candidate of Biological Sciences, Head of the Department of Technosphere Safety and Environmental Engineering

V. A. Naumov – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 02.03.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 16.04.2026.

The article was submitted 02.03.2026; approved after reviewing 12.03.2026; accepted for publication 16.04.2026.

Научная статья

УДК 577.118, 504.5

DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-57-70

**Интегральная оценка экологической безопасности растительных
альтернатив молоку на основе анализа тяжелых металлов**

**Инна Владимировна Бегдай¹, Тамара Александровна Цесарь², Константин
Викторович Харин³**

^{1,2,3} Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

¹ algae@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-7675-8078>

² tsesar.tamara@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0860-6080>

³ k-harin79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9091-6375>

Аннотация. В рамках данной работы выполнена интегральная оценка экологической безопасности растительных аналогов молока, представленных на российском рынке. Исследование охватывало как готовые коммерческие напитки популярных брендов, так и образцы, приготовленные лабораторным способом из крупяного сырья. Основной целью являлись определение уровня содержания токсичных и условно-токсичных тяжелых металлов – свинца, кадмия, цинка и меди – и последующая оценка потенциального неканцерогенного риска для здоровья взрослых и детей при регулярном потреблении данных продуктов. Лабораторный анализ проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии, полученные количественные данные сравнивали с установленными гигиеническими нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК). Для перехода от химических концентраций к оценке воздействия на здоровье применялась утвержденная методика расчета экспозиционных доз и коэффициента опасности (HQ). Результаты анализа показали, что ни в одном из исследованных образцов, как промышленных, так и лабораторных, не было зафиксировано превышения ПДК по всем четырем металлам. Концентрации варьировали в безопасных пределах 4,8 %–36,7 % от соответствующих ПДК. Ключевым результатом интегральной оценки является расчет HQ. Его значения для каждого металла, а также суммарные показатели риска всех типов напитков для взрослых и детей оказались существенно меньше единицы (менее 0,01). Это однозначно свидетельствует об отсутствии угрозы появления неканцерогенных эффектов для здоровья при долгосрочном употреблении. Таким образом, исследование демонстрирует, что рассмотренные растительные аналоги молока обладают высоким уровнем экологической безопасности по критерию содержания тяжелых металлов. Установлено, что решающим фактором безопасности является качество исходного сельскохозяйственного сырья, а не тип обработки (промышленный или лабораторно приготовленный).

Ключевые слова: растительное молоко, тяжелые металлы, экологическая безопасность, коэффициент опасности, риск.

Для цитирования: Бегдай И. В., Цесарь Т. А., Харин К. В. Интегральная оценка экологической безопасности растительных альтернатив молоку на основе анализа тяжелых металлов // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 57–70. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-57-70.

Original article

Integral assessment of the environmental safety of plant-based milk alternatives based on heavy metal analysis

Inna V. Begday¹✉, Tamara A. Tsesar², Konstantin V. Kharin³

^{1,2,3} North-Caucasus Federal University, Stavropol', Russia

¹ algae@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-7675-8078>

² tsesar.tamara@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0860-6080>

³ k-harin79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9091-6375>

Abstract. The study presents a comprehensive assessment of the environmental safety of plant-based milk alternatives available on the Russian market. The study included both ready-to-drink commercial beverages from popular brands and laboratory-prepared samples from cereal raw materials. The primary objective has been determination of the levels of toxic and conditionally toxic heavy metals- lead, cadmium, zinc, and copper – and subsequent assessment of the potential non-carcinogenic health risk to adults and children with regular consumption of these products. Laboratory analysis has been performed using atomic absorption spectrometry. The resulting quantitative data have been compared with the established hygienic standards (MPCs). To convert chemical concentrations to health impact assessment, an approved method for calculating exposure doses and hazard quotients (HQs) has been used. The analysis results showed that none of the samples, whether industrial or laboratory, exceeded the MPCs for all four metals. Concentrations varied within safe limits, ranging from 4.8 % to 36.7 % of the corresponding MACs. The key result of the integrated assessment is the calculation of the hazard quotient (HQ). Its values for each metal, as well as the overall risk indicators for all beverage types for adults and children, were significantly less than one (less than 0.01). This clearly indicates no risk of developing non-carcinogenic health effects with long-term consumption. Thus, the study demonstrates that the plant-based milk analogues examined possess a high level of environmental safety in terms of heavy metal content. It has been found that the decisive safety factor is the quality of the original agricultural raw materials, not the type of processing (industrial or laboratory prepared).

Keywords: plant-based milk, heavy metals, environmental safety, hazard quotient, risk.

For citation: Begdai I. V., Tsesar T. A., Kharin K. V. Integral assessment of the environmental safety of plant-based milk alternatives based on heavy metal analysis. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):57–70. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-57-70.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы мировая пищевая индустрия переживает стремительные изменения, связанные с повышением интереса к продуктам растительного происхождения. Особенно активно развивается сегмент растительных аналогов молока, который рассматривается не только как альтернатива животным продуктам, но и как важный элемент экологически устойчивого питания. Рост популярности таких напитков обусловлен рядом факторов – изменением потребительских привычек, распространением вегетарианства и веганства, увеличением числа людей с непереносимостью лактозы, а также растущим вниманием к вопросам экологии и рационального использования природных ресурсов [1]. Растительные белки хорошо усваиваются, хотя их аминокислотный состав обычно менее сбалансирован, чем у животных. При этом многие растительные культуры выгодно отличаются ценным профилем жирных кислот, особенно по содержанию омега-3 и омега-6. Пищевые волокна растительного сырья поддерживают здоровое пищеварение, помогают снижать холестерин и способствуют нормальной микробиоте, что делает их важным компонентом рациона [2].

Согласно исследованию Strategic Market Research (2022), растительное молоко является крупнейшей категорией продуктов на растительной основе, а ежегодный прирост мирового рынка оценивается в 15,5 % и, по прогнозам, сохранится до 2029 г. [3]. В настоящее время доля растительных аналогов составляет около 10 % мирового рынка молочной продукции, причем на соевое молоко приходится 37,8 %, миндальное – 20 %, овсяное – 12 %, а на прочие виды (включая рисовое, кокосовое, гороховое и смеси) – 15,3 % [4].

Смена традиционных продуктов на растительные аналоги ставит новые задачи перед специалистами в области пищевой химии и экологии. Несмотря на очевидные преимущества растительных напитков – меньшую углеродную нагрузку, отсутствие холестерина и животного белка, остаются нерешенными вопросы их пищевой ценности и экологической безопасности.

Во многих странах введены стандарты на контроль за содержанием токсичных элементов в пищевых продуктах, однако исследования показывают, что в растительном сырье концентрация тяжелых металлов может варьировать в зависимости от региона произрастания, почвенных условий и особенностей технологической обработки [5, 6].

В отличие от коровьего молока, в котором поступление тяжелых металлов в продукт в основном связано с загрязнением кормов и воды, растительные напитки могут аккумулировать загрязнители уже на стадии выращивания культур – овса, сои, риса, миндаля и др. [7]. Торможение роста является одним из самых важных и наиболее легко определяемых проявлений токсичности тяжелых металлов в отношении растений, так как под влиянием тяжелых металлов у растений уменьшаются линейные размеры корней и побегов, снижается накопление биомассы [8]. Увеличение концентрации тяжелых металлов оказывает воздействие на фотосинтез и дыхание растений, изменяет анатомическую структуру листа, организацию хлоропластов, уменьшает содержание фотосинтетических пигментов и снижает скорость дыхания [9].

Проблема загрязнения пищевых продуктов тяжелыми металлами исследуется на протяжении десятилетий. Еще в середине XX в. А. П. Виноградов [10, 11]

показал, что свинец, кадмий, цинк и медь способны активно накапливаться в почвах и растительных тканях, переходя далее в продукты питания. Позднее работы А. М. Каббата-Пендиса и В. Б. Ильина подтвердили, что биогеохимические циклы металлов тесно связаны с деятельностью человека и в значительной степени определяют устойчивость агроэкосистем [6, 12]. Кадмий (Cd) проявляет высокую подвижность в кислых почвах и активно усваивается растениями семейства злаковых, однако в условиях нейтральной реакции и при наличии достаточного количества цинка его поступление существенно снижается [13]. Свинец (Pb), напротив, обладает низкой биодоступностью, но способен прочно связываться с поверхностью корней и накапливаться в оболочке зерна. Медь (Cu) и цинк (Zn) относятся к числу эссенциальных микроэлементов, необходимых для нормального метаболизма растений и человека [14, 15]. Поэтому оценка содержания таких элементов, как Pb, Cd, Cu и Zn, становится ключевым направлением исследований в области пищевой экологии. На сегодняшний день большинство исследований растительного молока посвящены вопросам его пищевой ценности, органолептических свойств и технологии производства [3, 16]. Однако комплексная оценка экологической безопасности подобных напитков, включающая как лабораторный анализ содержания тяжелых металлов, так и оценку неканцерогенного риска для здоровья населения, до сих пор проводится ограниченно. Под неканцерогенным риском понимается вероятность развития вредных эффектов для здоровья (кроме рака) при воздействии химических веществ, оцениваемая путем сравнения уровней экспозиции с референтными (безопасными) дозами.

В то время, как в развитых странах контроль за составом растительных продуктов регулируется строгими стандартами (например, директивами ЕС), на российском рынке растительное молоко представлено относительно недавно и систематические данные о его качестве и безопасности отсутствуют, что делает подобные исследования особенно актуальными в контексте обеспечения продовольственной и экологической безопасности страны. Кроме того, растительное молоко сегодня является одним из наиболее перспективных направлений пищевой промышленности: его производство требует меньше воды и земли, чем животноводство, выбросы парниковых газов при этом значительно ниже. Следовательно, оценка не только пищевой, но и экологической безопасности данных продуктов имеет важное прикладное значение для устойчивого развития.

Современные методы оценки экологических рисков, рекомендованные Роспотребнадзором, позволяют не только определить концентрацию загрязнителей в продукте, но и рассчитать HQ, отражающий потенциальное влияние на здоровье человека при длительном употреблении продукта. Такой подход позволяет перевести результаты химического анализа в форму, применимую для практической оценки безопасности продуктов питания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на базе научно-учебной лаборатории биогеохимии окружающей среды Северо-Кавказского федерального университета. Объектами стали наиболее распространенные марки растительного молока, представленные

ные на российском рынке – «Овсяша», «Nemoloko» и «Здоровое меню» – и приобретенные в супермаркете «Перекресток». Выбор обусловлен их высокой доступностью, популярностью и разнообразием ассортимента.

В качестве образцов для приготовления растительного молока в лабораторных условиях были выбраны наиболее популярные производители круп: «Националь» (овсяные хлопья «Геркулес»), «Увелка» (крупка гречневая зеленая ядрица, сорт 1), «Бакалейный стандарт» (рис длиннозерный, сорт 2; крупка гречневая зрелая ядрица, сорт 1). Выбор этих марок также обусловлен их высокой степенью распространенности и соответствием требованиям ГОСТ. Все образцы имели сертификаты качества и маркировку «без ГМО».

Приготовление лабораторного молока проводилось по унифицированной методике на основании патента № 2756071: 100 г исходного продукта замачивали в 500 мл воды, выдерживали при температуре 20 ± 2 °C в течение 8 ч, после чего смесь измельчали и фильтровали через двойной слой марли. Полученный напиток анализировался в тот же день [17].

В качестве маркерных веществ были взяты Pb, Cu, Cd, Zn. Определение концентрации тяжелых металлов проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на приборе Thermo Scientific iCE 3300. Подготовка проб включала стадию минерализации в соответствии с ГОСТ 26929-94 «Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов». Результаты выражали в миллиграммах на килограмм продукта (мг/кг) и сравнивали с нормативами ПДК из «Санитарных правил и норм 42-123-4089-86. Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах». Все определения проводили в двух параллельных пробах, результаты усредняли и округляли до второго десятичного знака.

Для оценки потенциальных последствий употребления растительного молока применялась методика расчета экспозиционных доз (D_i) и HQ, рекомендованная руководящими документами МУ 2.3.7.2519-09 «Определение экспозиции и оценка риска воздействия химических контаминантов пищевых продуктов на население: методические указания» и Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду». Массовую долю химического элемента (m) рассчитывали по формуле:

$$m = \frac{(C_x - C_k) * Y * K}{p}, \quad (1)$$

где C_x – концентрация элемента в исследуемом растворе, мкг/см³; C_k – среднеарифметическое значение концентрации элемента для параллельных контрольных растворов, мкг/см³; Y – исходный объем исследуемого раствора, см³; p – навеска пробы, г; K – коэффициент разбавления.

Если разность ($C_x - C_k$) оказывается меньше предела обнаружения $3S_n$, то дается односторонняя оценка максимально возможной концентрации элемента в продукте в млн⁻¹:

$$m_{\text{макс}} < \frac{3S_n * Y * K}{p\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где n – число параллельных измерений абсорбции испытуемого раствора.

Результаты измерений усредняли из двух параллельных определений и округляли до второго десятичного знака.

Для оценки потенциального риска при употреблении растительного молока рассчитывались D_i и HQ_i , отражающий вероятность развития неканцерогенных эффектов. Экспозиция контаминанта рассчитывалась по формуле:

$$D_i = \frac{C_i \times M \times T_p}{P \times T}, \quad (3)$$

где D_i – значение экспозиции контаминанта, мг/кг массы тела/сут; C_i – концентрация контаминанта в рассматриваемом пищевом продукте, мг/кг; M – потребление продукта, (кг/год); T_p – количество лет, в течение которых употребляется исследуемый напиток (1 год); P – масса тела человека, кг (стандартное значение – 70 кг); T – усредненное время воздействия токсиканта (или средняя продолжительность возможного воздействия токсиканта за время жизни человека), принимаемое равным 30 годам.

HQ рассчитывали путем сопоставления величин потенциальной суточной дозы вещества, поступающего определенным путем, и уровня безопасного воздействия при этом же пути поступления:

$$HQ_i = D_i \div RfD, \quad (4)$$

где HQ – коэффициент опасности воздействия вещества i ; D_i – потенциальная доза поступления вещества i , мг/(кг*сутки); RfD – безопасный уровень воздействия, мг/(кг*сутки).

Если $HQ < 1$, то опасности и риска угрозы здоровью нет. Если же $HQ > 1$, то существует опасность отравления, которая тем больше, чем больше индекс HQ превышает единицу.

Оценка проводилась для двух сценариев:

- взрослое население (70 кг, 120 кг молока в год);
- детское население (31 кг, 137,4 кг молока в год).

Для расчетов использованы значения референтных доз (RfD): Pb – 0,0035 мг/кг·сут; Cd – 0,0005 мг/кг·сут; Cu – 0,04 мг/кг·сут; Zn – 0,3 мг/кг·сут (ЕРА, 2021), ПДК взяты из «Санитарных правил и норм 42-123-4089-86».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Целью анализа являлось определение содержания Pb , Cd , Zn , Cu в промышленном и лабораторно приготовленном растительном молоке, а также сравнение результатов с ПДК согласно «Санитарным правилам и нормам 42-123-4089-86». Результаты представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, содержание всех исследуемых элементов во всех образцах значительно ниже ПДК.

Наибольшее содержание Pb отмечено в рисовом молоке «Здоровое меню» (0,0241 мг/кг), что составляет лишь 4,8 % от допустимого уровня. Концентрации Cd варьировали от 0,0106 до 0,0113 мг/кг и составили не более 36,7 % от ПДК. Содержание Cu находилось в пределах 0,0069–0,0121 мг/кг, что существенно ниже установленных нормативов. Уровень Zn составлял 0,2393–0,3660 мг/кг при ПДК 3 мг/кг, то есть не превышал 12,2 % от допустимого значения. Таким образом, ни один из промышленных образцов не продемонстрировал превышений нормативов,

что свидетельствует о высоком уровне производственного контроля и качестве исходного сырья.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в исследуемом растительном молоке
Table 1. Content of heavy metals in the studied plant milk

Продукт	Содержание ТМ, мг/кг			
	Pb	Cd	Zn	Cu
Молоко на основе крупы гречневой зрелой	0,0530	н/о	0,1166	0,0043
Молоко на основе крупы гречневой зеленой	0,0068	н/о	0,4409	0,0196
Молоко на основе хлопьев овсяных	0,0140	н/о	0,2871	0,0233
Молоко на основе крупы рисовой	0,0504	н/о	0,2745	0,0045
Молоко миндальное «Овсяша»	0,0258	0,0089	0,3423	0,0053
Молоко рисовое «Здоровое меню»	0,0296	0,0086	0,1049	0,0011
Молоко кокосовое «Овсяша»	0,0079	0,0108	0,3752	0,0205
Молоко овсяное «Nemoloko»	0,0112	0,0068	0,1824	0,003
ПДК	0,5	0,03	3	10

Как и в случае с промышленными продуктами, превышений ПДК по тяжелым металлам в лабораторно приготовленных образцах растительного молока не выявлено. Особенностью приготовленных образцов является отсутствие Cd во всех пробах (концентрация ниже предела обнаружения), что, вероятно, связано с низким уровнем загрязнения используемого зернового сырья. Наибольшее содержание Pb (0,053 мг/кг) зафиксировано в зрелой гречке, что составляет 10,6 % от допустимой нормы. Это объясняется способностью зрелой гречки к накоплению свинца при выращивании на почвах с повышенным содержанием Pb, что отмечалось и другими исследователями [5, 6].

Для всех образцов наблюдается четкая тенденция:

- более высокое содержание Zn в зеленой гречке (0,4409 мг/кг);
- умеренные значения Cu (0,0097–0,0233 мг/кг);
- минимальные концентрации Cd (не обнаружен).

Сравнение с промышленными напитками показывает, что уровень тяжелых металлов в лабораторно приготовленных образцах сопоставим, а иногда даже ниже, что подтверждает экологическую чистоту круп, использованных в исследовании.

Оценка риска для здоровья населения выполнена для взрослой и детской групп исходя из среднесуточного потребления напитков и концентрации выявленных элементов. Результаты расчетов по промышленным образцам приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оценки неканцерогенного риска при употреблении промышленного растительного молока

Table 2. Results of the assessment of non-carcinogenic risk from the consumption of industrial plant milk

Вещество	Концентрация, мг/кг	RfD (референтная доза), мг/кг	Среднесуточная доза поступления, мг/кг сут		HQ (коэффициент опасности)	
			Взрослые	Дети	Взрослые	Дети
«Овсяша» миндальное						
Кадмий	0,0089	0,0005	$1,39 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$	0,0027	0,0072
Свинец	0,0258	0,0035	$4,04 \times 10^{-6}$	$1,044 \times 10^{-5}$	0,0015	0,0030
Цинк	0,3423	0,300	$5,4 \times 10^{-5}$	$1,39 \times 10^{-4}$	0,00018	0,00046
Медь	0,0053	0,040	$8,3 \times 10^{-7}$	$2,15 \times 10^{-6}$	0,000021	0,00005
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0044		Для детей: 0,0057			
«Овсяша» кокосовое						
Кадмий	0,0108	0,0005	$1,69 \times 10^{-6}$	$4,37 \times 10^{-6}$	0,00338	0,00874
Свинец	0,0079	0,0035	$1,24 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$	0,00035	0,00091
Цинк	0,3752	0,300	$5,8 \times 10^{-4}$	$1,52 \times 10^{-4}$	0,00193	0,00051
Медь	0,0205	0,040	$3,21 \times 10^{-6}$	$8,3 \times 10^{-6}$	0,00008	0,00021
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0057		Для детей: 0,0055			
«Nemoloko» овсяное						
Кадмий	0,0068	0,0005	$1,06 \times 10^{-6}$	$2,75 \times 10^{-6}$	0,0021	0,0055
Свинец	0,0112	0,0035	$1,75 \times 10^{-6}$	$4,53 \times 10^{-6}$	0,0005	0,0013
Цинк	0,1824	0,300	$2,86 \times 10^{-5}$	$7,4 \times 10^{-5}$	0,000095	0,00025
Медь	0,0030	0,040	$4,7 \times 10^{-7}$	$1,21 \times 10^{-6}$	0,000012	0,00003
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0027		Для детей: 0,0038			
«Здоровое меню» рисовое						
Кадмий	0,0086	0,0005	$1,35 \times 10^{-6}$	$3,48 \times 10^{-6}$	0,0027	0,00696
Свинец	0,0296	0,0035	$4,63 \times 10^{-6}$	$1,20 \times 10^{-5}$	0,0013	0,0034
Цинк	0,1049	0,300	$1,64 \times 10^{-5}$	$4,25 \times 10^{-5}$	0,000055	0,00014
Медь	0,0011	0,040	$1,7 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$	0,000004	0,00001
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0041		Для детей: 0,0057			

Во всех исследованных образцах HQ по каждому элементу меньше 1, что означает отсутствие угрозы для здоровья. Наибольшие значения HQ отмечены по кадмию, однако суммарный риск остается в пределах допустимого: для взрослых 0,0027–0,0057, для детей 0,0038–0,0057.

Для наглядного сравнения рисков по лабораторно приготовленным образцам молока приведены данные табл. 3.

Таблица 3. Результаты оценки неканцерогенного риска при употреблении растительного молока лабораторного приготовления

Table 3. Results of the assessment of non-carcinogenic risk of consumption of laboratory-prepared plant milk

Вещество	Концентрация, мг/кг	RfD (референтная доза), мг/кг	Среднесуточная доза поступления, мг/кг сут		HQ (коэффициент опасности)	
			Взрослые	Дети	Взрослые	Дети
Молоко на основе крупы гречневой зрелой						
Кадмий	—	—	—		—	
Свинец	0,0530	0,0035	$8,3 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-5}$	0,0024	0,0060
Цинк	0,1166	0,300	$1,83 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$	0,000061	0,00015
Медь	0,0043	0,040	$6,7 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-6}$	0,000017	0,000044
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0025		Для детей: 0,0062			
Молоко на основе крупы гречневой зеленой						
Кадмий	—	—	—		—	
Свинец	0,0068	0,0035	$1,06 \times 10^{-6}$	$2,75 \times 10^{-6}$	0,00030	0,00079
Цинк	0,4409	0,300	$6,9 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$	0,00023	0,0006
Медь	0,0196	0,040	$3,07 \times 10^{-6}$	$7,93 \times 10^{-6}$	0,000077	0,00019
Суммарный риск	Для взрослых: 0,00061		Для детей: 0,0016			
Молоко на основе хлопьев овсяных						
Кадмий	—	—	—		—	
Свинец	0,0140	0,0035	$2,19 \times 10^{-6}$	$5,67 \times 10^{-6}$	0,00063	0,00160
Цинк	0,2871	0,300	$4,5 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-4}$	0,00015	0,00039
Медь	0,0233	0,040	$3,65 \times 10^{-6}$	$9,43 \times 10^{-6}$	0,00009	0,00024
Суммарный риск	Для взрослых: 0,00087		Для детей: 0,0022			
Молоко на основе крупы рисовой						
Кадмий	—	—	—		—	
Свинец	0,0504	0,0035	$7,89 \times 10^{-6}$	$2,04 \times 10^{-5}$	0,00250	0,00580
Цинк	0,2745	0,300	$4,3 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$	0,00014	0,00036
Медь	0,0045	0,040	7×10^{-7}	$1,82 \times 10^{-6}$	0,000018	0,000046
Суммарный риск	Для взрослых: 0,0027		Для детей: 0,0062			

Значения HQ во всех случаях также не превышают 0,01, что указывает на отсутствие угрозы здоровью даже при длительном употреблении растительного молока. Наибольшие значения HQ отмечены для кадмия и свинца, что соответствует их биотоксичности, однако абсолютные величины показателей минимальны. У детей HQ несколько выше, чем у взрослых, что объясняется более низкой массой тела и, соответственно, большей дозовой нагрузкой при одинаковом потреблении. Максимальные показатели наблюдаются для свинца в молоке из риса и зрелой гречки (HQ = 0,0024–0,0060), что не представляет опасности, но требует умеренности при регулярном употреблении детьми.

Полученные результаты позволяют сделать несколько важных выводов:

1. Все исследованные продукты – как промышленные, так и лабораторно приготовленные – соответствуют требованиям экологической безопасности по содержанию тяжелых металлов.

2. Содержание кадмия во всех лабораторных образцах ниже предела обнаружения, что свидетельствует о хорошем качестве зернового сырья.

3. Максимальные концентрации свинца (до 0,053 мг/кг) не превышают 10,6 % от ПДК, что исключает риск хронического накопления.

4. Суммарные показатели $HQ < 1$ для всех металлов и возрастных категорий, что подтверждает отсутствие неканцерогенного риска.

5. Незначительные различия между промышленным и лабораторно приготовленным молоком указывают на то, что качество продукции определяется не технологией, а исходным сырьем и регионом его происхождения.

В целом результаты исследования показывают, что растительные напитки, произведенные в России, обладают высоким уровнем безопасности и могут рассматриваться как полноценная альтернатива животным продуктам при условии соблюдения технологических норм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило комплексно оценить экологическую безопасность растительного молока, представленного на российском рынке и приготовленного в лабораторных условиях.

Сравнение промышленных и лабораторно приготовленных образцов показало, что концентрации металлов сопоставимы, а различия не превышают статистической погрешности. Это указывает на одинаково высокий уровень экологической безопасности обоих типов напитков.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что растительное молоко можно рекомендовать для включения в рацион различных возрастных групп населения, в том числе детей и лиц с непереносимостью лактозы, при условии соблюдения правил хранения и сроков годности.

С точки зрения устойчивого развития растительное молоко является не только питательно и безопасно значимым продуктом, но и экологически предпочтительным: его производство требует меньше воды, энергии и земельных ресурсов по сравнению с животноводческими аналогами.

Для дальнейшего повышения точности оценок рекомендуется проводить периодический мониторинг содержания тяжелых металлов в растительном сырье и готовых напитках, а также разработать национальные стандарты экологической сертификации растительных продуктов питания.

Список источников

1. Hale, M. Exploring the growth of plant-based milk alternatives. – Текст: электронный // Dairy Foods:сайт. – URL:<https://www.dairyfoods.com/blogs/14-dairy-foods-blog/post/95247-exploring-the-growth-of-plant-based-milk-alternatives#:~:text=The%20plant%2Dbased%20milk%20alternatives,a%20way%20of%20identifying%20yourself.%E2%80%9D> (дата обращения: 20.10.2025).

2. Алексаночкин, Д. И. Напитки на растительной основе: обзор сырьевых компонентов и технологий получения / Д. И. Алексаночкин, И. Д. Семенов, И. А. Фоменко // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2025. – Т. 28, № 3. – С. 371–384. – DOI 10.21443/1560-9278-2025-28-3-371-384. – EDN CIANAP.
3. McClements, D. J. Plant-based milks: a review of the science underpinning their design, fabrication, and performance / D. J. McClement, E. Newman, I. F. McClements. – DOI: 10.1111/154 - 4337.12505 // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2019. – Vol. 18, № 6. – P. 2047–2067.
4. Федеральный центр развития экспорта продукции АПК Минсельхоза России (Агроэкспорт). Обзор ВЭД «Растительные напитки». – Текст: электронный // Агроэкспорт: сайт. – URL: <https://aemcx.ru/> (дата обращения: 25.09.2025).
5. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте / Ю. В. Алексеев. – Санкт-Петербург: Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН, 2008. – 216 с. – ISBN 978-5-86763-213-7. – EDN QBSZFI.
6. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение: моногр. / В. Б. Ильин; отв. ред. А. И. Сысо. – Российская акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской акад. наук, 2012. – 218 с. – ISBN 978-5-7692-1229-1. – EDN QLDFYR.
7. Горлов, И. Ф. Оценка миграции тяжелых металлов в пищевой цепи «вода – почва – корма – молоко» / И. Ф. Горлов, Н. И. Мосолова, Е. Ю. Злобина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 3(27). – С. 101–104. – EDN PCXKYZ.
8. Титов, А. Ф. Тяжелые металлы и растения: моногр. / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. – Петрозаводск: Институт биологии Карельского научного центра, 2014. – 194 с. – ISBN 978-5-9274-0641-8.
9. Дмитриюкова, М. Ю. Влияние кадмия на рост и дыхание растений табака с геном леггемоглобина а сои / М. Ю. Дмитриюкова, А. Х. Баймиев, З. Ф. Рахманкулова // Агрохимия. – 2011. – № 10. – С. 70–75. – EDN MXFYTG.
10. Виноградов, А. П. Полное собрание трудов в 18 т. Т. 4. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах: моногр. / науч. ред. Е.М. Коробова; [сост. Л. Д. Виноградова]. – М.: РАН, 2021. – 298 с. – ISBN 978-5-907366-41-1.
11. Виноградов, А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры / А. П. Виноградов // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571. – EDN SIZCQF.
12. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants: Fourth edition: monogr. / A. Kabata-Pendias. – Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. – 548 p. – ISBN 978-0-429192-03-6. – EDN KYXAU.
13. Медведев, И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах: моногр. / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов: ООО «Ракурс», 2017. – 178 с. – ISBN 978-5-9758-1665-8. – EDN ZUOCLR.
14. Губин, А. Н. Кадмий в системе: торфяная низинная почва – растение / А. Н. Губин, М. А. Ефремова, В. Н. Ефимов // Плодородие. – 2007. – № 2 (35). – С. 34–35. – EDN KUCKDJ.
15. Гнусарев, С. С. Влияние смешанной гнили от трутовика настоящего (*Fomes fomentarius* (L.:Fr.) Gill.) на накопление тяжелых металлов березой повислой (*Betula pendula* Roth.) / С. С. Гнусарев, Н. А. Митрофанова, Б. П. Чураков //

Медико-физиологические проблемы экологии человека: материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием, Ульяновск, 01–04 декабря 2021 г. – Ульяновск: Ульяновский государственный университет, 2021. – С. 67–70. – DOI 10.34014/MPPHE.2021-67-70. – EDN XMOGNP.

16. Velangi, M. Role of plant based milk alternatives as a functional beverage: a review / M. Velangi, M. Savla. – DOI:10.52403/ijhsr.20221135 // Int. J. Health Sci. Res. – 2022. – Vol. 12. – P. 273–281.

17. Патент № 2756071. Российская Федерация. Способ получения растительного молока: № 2021103148: заявл. 10.02.2021: опубл. 27.09.2021 / В. А. Нгуен, В.И. Дейнека, Л.А. Дейнека. – 12 с.

References

1. Hale, M. Exploring the growth of plant-based milk alternatives. – Text: electronic // Dairy Foods: site. – URL:<https://www.dairyfoods.com/blogs/14-dairy-foods-blog/post/95247-exploring-the-growth-of-plant-based-milk-alternatives#:~:text=The%20plant%2Dbased%20milk%20alternatives,a%20way%20of%20identifying%20yourself.%E2%80%9D> (date of treatment: 10.20.2025).

2. Aleksanochkin, D. I. Plant-based drinks: a review of raw materials and production technologies / D. I. Aleksanochkin, I. D. Semenov, I. A. Fomenko // Bulletin of MSTU. Transactions of Murmansk State Technical University. – 2025. – Vol. 28, № 3. – P. 371–384. – DOI 10.21443/1560-9278-2025-28-3-371-384. – EDN CIANAP.

3. McClements, D. J. Plant-based milks: a review of the science underpinning their design, fabrication, and performance / D. J. McClement, E. Newman, I. F. McClements. – DOI: 10.1111/154 - 4337.12505 // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2019. – Vol. 18, №. 6. – P. 2047–2067.

4. Federal Center for the Export of Agricultural Products of the Ministry of Agriculture of Russia (Agroexport). Review of the foreign economic activity «Herbal drinks». – Text: electronic // Agroexport: site. – URL:<https://aemcx.ru> / (date of treatment: 09.25.2025).

5. Alekseev, Yu. V. Heavy metals in the agricultural landscape / Yu. V. Alekseev. – Saint-Petersburg: St.-Petersburg Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences, 2008. – 216 p. – ISBN 978-5-86763-213-7. – EDN QBSGFJ.

6. Ilyin, V. B. Heavy metals and nonmetals in the soil-plant system: monographs / V. B. Ilyin; ed. by A. I. Syso. – Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Soil Science and Agrochemistry. – Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2012. – 218 p. – ISBN 978-5-7692-1229-1. – EDN QLDFYP.

7. Gorlov, I. F. Assessment of migration of heavy metals in the food chain «water – soil – feed – milk» / I. F. Gorlov, N. I. Mosolova, E. Y. Zlobina // Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education. – 2012. – № 3(27). – P. 101–104. – EDN PCXKYZ.

8. Titov, A. F. Heavy metals and plants: monographs / A. F. Titov, N. M. Kaznina, V. V. Talanova. – Petrozavodsk: Institute of Biology of the Karelian Scientific Center, 2014. – 194 p. – ISBN 978-5-9274-0641-8.

9. Dmitryukova, M. Y. The effect of cadmium on the growth and respiration of tobacco plants with the soy leghemoglobin a gene / M. Y. Dmitryukova, A. H. Baymiev, Z. F. Rakhmankulova // *Agrochemistry*. – 2011. – № 10. – P. 70–75. – EDN MXFYTG.
10. Vinogradov, A. P. Complete works in 18 volumes. Vol. 4. Geochemistry of rare and scattered elements in soils: monographs / scientific ed. by E.M. Korobov; [comp. by L. D. Vinogradov]. – M.: RAS, 2021. – 298 p. – ISBN 978-5-907366-41-1.
11. Vinogradov, A. P. Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust / A. P. Vinogradov // *Geochemistry*. – 1962. – № 7. – P. 555–571. – EDN SIZCQF.
12. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants: Fourth edition: monogr. / A. Kabata-Pendias. – Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. – 548 p. – ISBN 978-0-429192-03-6. – EDN KYYXAU.
13. Medvedev, I. F. Heavy metals in ecosystems: monographs / I. F. Medvedev, S. S. Derevyagin. – Saratov: Rakurs LLC, 2017. – 178 p. – ISBN 978-5-9758-1665-8. – EDN ZUOCLR.
14. Gubin, A. N. Cadmium in the system: peat lowland soil – plant / A. N. Gubin, M. A. Efremova, B. H. Efimov // *Fertility*. – 2007. – № 2 (35). – P. 34–35. – EDN KUCKDJ.
15. Gnusarev, S. S. The influence of mixed rot from the present tinder (*Fomes fomentarius* (L.:Fr.) Gill.) on the accumulation of heavy metals by birch (*Betula pendula* Roth.) / S. S. Gnusarev, N. A. Mitrofanova, B. P. Churakov // *Medical and physiological problems of human ecology: materials VIII All-Russian Conference with International participation (Ulyanovsk, December 01-04, 2021)*. – Ulyanovsk: Ulyanovsk State University, 2021. – P. 67–70. – DOI 10.34014/MPPE.2021-67-70. – EDN XMOGNP.
16. Velangi, M. Role of plant based milk alternatives as a functional beverage: a review / M. Velangi, M. Savla. – DOI:10.52403/ijhsr.20221135 // *Int. J. Health Sci. Res.* – 2022. – Vol. 12. – P. 273–281.
17. Patent № 2756071. Russian Federation. Method for producing plant milk: № 2021103148: declared 10.02.2021: published 27.09.2021 / V. A. Nguyen, V. I. Deineka, L. A. Deineka. – 12 p.

Информация об авторах

И. В. Бегдай – кандидат технических наук, доцент, заведующая научно-учебной лабораторией биогеохимии окружающей среды

Т. А. Цесарь – инженер-лаборант научно-учебной лаборатории биогеохимии окружающей среды

К. В. Харин – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой экологии и биогеографии

Information about the authors

I. V. Begdai – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research and Educational Laboratory of Environmental Biogeochemistry

T. A. Tsesar – Laboratory Engineer in the Research and Educational Laboratory of Environmental Biogeochemistry

K. V. Kharin – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Ecology and Biogeography

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 11.02.2026; принята к публикации 13.02.2026.

The article was submitted 15.01.2026; approved after reviewing 11.02.2026; accepted for publication 13.02.2026.

Научная статья

УДК 634.1.076:664.87:796

DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-71-85

Совершенствование технологии ферментативной переработки фруктов с дефектами внешнего вида

Вадим Александрович Карлов¹, Ольга Яковлевна Мезенова²

^{1,2} Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ vaden1410@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1547-5772>

² mezenova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4716-2571>

Аннотация. Высокое содержание свободной влаги и активных ферментов в свежей плодоовощной продукции обуславливает ее скоропортящийся характер и значительные потери при хранении и транспортировке, достигающие в Калининградской области 56 тыс. т ежегодно. Особые потери составляют фрукты с дефектами внешнего вида, которые, сохраняя свою высокую биологическую ценность, подвергаются утилизации. Это определяет актуальность разработки эффективных технологий их переработки. В работе представлены исследования по совершенствованию технологии получения функциональной пищевой добавки «ВИТУ-МИН» из фруктов пониженного качества путем интенсификации процесса биоконверсии сырья на основе двухэтапного ферментолитиза. Обоснован состав ферментного комплекса карбогидраз с учетом полисахаридного состава исходных фруктов (яблок, бананов, апельсинов): первый этап включает обработку целлюлазой и пектиназой для деструкции клеточных стенок и высвобождения БАВ, второй – использование β -глюконазы, глюкаваморина, альфа-лактазы для гидролиза высвободившихся полисахаридов. Методом математического моделирования определены оптимальные значения факторов первого этапа: температура 49 °С, pH 3,8, продолжительность 2 ч. Экспериментально подтверждена эффективность разработанной схемы: выход жидкой фракции увеличился на 62,3 %, содержание сухих веществ – на 15,7 %, выход целевой добавки возрос на 7,9 % по сравнению с одностадийной обработкой. Данные ИК-спектроскопии подтвердили глубокую деградацию целлюлозно-пектинового комплекса. Полученная добавка характеризуется высоким содержанием витаминов С (66,5 мг/100 г) и Р (122,5 мг/100 г), соответствует требованиям микробиологической безопасности ТР ТС 021/2011 и рекомендуется к использованию для обогащения традиционных, функциональных и специализированных пищевых продуктов.

Ключевые слова: фрукты пониженного качества, ферментолитиз, карбогидразы, функциональная пищевая добавка, пищевая ценность.

Благодарности: авторы выражают благодарность доценту кафедры химии Калининградского государственного технического университета, кандидату химических наук Булычеву Александру Григорьевичу за помощь в проведении аналитических исследований.

Для цитирования: Карлов В. А., Мезенова О. Я. Совершенствование технологии ферментативной переработки фруктов с дефектами внешнего вида // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 71–85. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-71-85.

Original article

Improvement of the technology for enzymatic processing of fruits with visual defects

Vadim A. Karlov^{1✉}, Ol'ga Ya. Mezenova²

^{1,2} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ vaden1410@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0009-0006-1547-5772>

² mezenova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4716-2571>

Abstract. High content of free moisture and active enzymes in fresh fruits and vegetables determines their perishable nature and leads to significant losses during storage and transportation, reaching 56 thousand tons annually in the Kaliningrad region. Fruits with visual defects constitute a particular portion of these losses, as they are discarded despite retaining high biological value. This underscores the relevance of developing efficient technologies for their processing. This paper presents research on improving the technology for producing the functional food additive "VITUMIN" from low-grade fruits by intensifying the bioconversion of raw materials through two-stage enzymolysis. The composition of the carbohydrase enzyme complex has been substantiated based on the polysaccharide profile of the source fruits (apples, bananas, oranges). The first stage involves treatment with cellulase and pectinase to disrupt cell walls and release biologically active substances (BAS); the second stage utilizes β -glucanase, Glucavamorin, and Alphasyl BT to hydrolyze the released polysaccharides. Using mathematical modeling, we determined the optimal values for the first-stage factors: temperature 49°C, pH 3.8, and duration of 2 hours. The effectiveness of the developed scheme has been experimentally confirmed: the liquid fraction yield increased by 62.3%, the dry matter content by 15.7%, and the yield of the target additive increased by 7.9% compared to single-stage processing. IR spectroscopy data confirmed the profound degradation of the cellulose-pectin complex. The resulting additive is characterized by a high content of vitamins C (66.5 mg/100 g) and P (122.5 mg/100 g), meets the microbiological safety requirements of TR CU 021/2011, and is recommended for use in enriching traditional, functional, and specialized food products.

Keywords: low-grade fruits, enzymatic hydrolysis, carbohydrase enzymes, functional food ingredient, biological value.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to Alexander G. Bulychev, PhD in Chemistry, Associate Professor at the Department of Chemistry (Kaliningrad State Technical University), for his assistance with the analytical research.

For citation: Karlov V. A., Mezenova O. Ya. Improvement of the technology for enzymatic processing of fruits with visual defects. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):71–85. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-71-85.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших компонентов сбалансированного и здорового питания являются продукты растительного происхождения, такие как фрукты и овощи, травы и ягоды. По данным Всемирной организации здравоохранения и Министерства здравоохранения РФ рекомендуется систематически потреблять не менее 400 г/день фруктов и овощей, равномерно разделенных на 5–6 порций. Подобное распределение способствует поддержанию стабильного уровня сахара в крови, обеспечивает равномерное поступление в организм пищевых волокон, витаминов, антиоксидантов и минеральных веществ, а также позволяет оптимизировать работу пищеварительной системы и синтез необходимых метаболитов [1, 2].

Следует отметить, что нутриентный состав свежих фруктов и овощей определяет также их хранимоспособность. Они отличаются высоким содержанием влаги, простых сахаров, активными ферментными системами, что делает их уязвимыми и скоропортящимися при хранении [3]. Процессы ухудшения качества за счет ферментации начинаются практически сразу после сбора урожая. На первых этапах хранения сырье безопасно и сохраняет все биологически активные вещества (БАВ), однако при этом теряются внешние потребительские свойства, появляются трещины, вмятины, что затрудняет его дальнейшую реализацию. В большинстве случаев это приводит к последующей утилизации фруктов и овощей [4]. Так, в 2024 г. на территории Калининградской области количество растительных утилизированных отходов составило около 56 тыс. т без учета потерь на производстве и в торговых сетях.

Наибольшую долю среди растительных отходов занимают фрукты, что объясняется повышенным содержанием в их составе углеводов (в особенности простых моно- и дисахаридов) и активных ферментов (полифенолоксидаза, аскорбатоксидаза, различные гидролазы). Все это обуславливает быстрое протекание нежелательных физико-химических процессов, особенно при нарушениях условий хранения и транспортировки.

Фрукты с внешними дефектами, или фрукты пониженного качества (ФПК), обладают значительным биопотенциалом благодаря высокому содержанию многих БАВ (углеводов, витаминов, минеральных веществ, органических кислот) и широкому спектру минорных компонентов (флавоноидов, антоцианов, катехинов, гликозидов, аминов, органических кислот и т. д.). Однако современные промышленные методы переработки не позволяют полностью реализовать этот потенциал из-за технологических ограничений, а также отсутствия рациональных способов переработки. Основная масса ФПК утилизируется, что ведет к экономическим потерям и создает экологические проблемы для окружающей среды.

Приведенные факторы обосновывают актуальность совершенствования технологии переработки фруктового сырья с внешними дефектами качества с учетом его высокой биологической ценности.

Перспективным решением проблемы является получение из ФПК функциональных пищевых добавок серии «ВИТУМИН» с применением методов биотехнологии [5]. Целевые добавки, полученные по разработанному методу, представляют собой сухие концентраты натуральных БАВ, характеризующиеся высокой биологической ценностью, повышенной биодоступностью и усвояемостью. Однако разработанная ранее технология отличается длительностью ферментации, невысоким

уровнем биоконверсии полисахаридов сырья, вследствие чего снижается выход БАВ.

Цель настоящей работы – совершенствование переработки фруктов пониженного качества при получении фруктовой функциональной пищевой добавки «ВИТУМИН» с применением двухэтапного ферментолиза.

Соответствующими задачами работы являлись: обоснование состава ферментного комплекса при двухэтапном ферментолизе ФПК в технологии получения пищевой функциональной добавки; анализ эффективности усовершенствованной технологии; оценка качества итогового продукта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные исследования проводили на лабораторной базе кафедр пищевой биотехнологии и химии Калининградского государственного технического университета.

В экспериментах использовали фрукты с признаками внешней некондиционности, полученные в торговых сетях Калининградской области и г. Калининграда – ООО «SPAR» и ООО «Виктория». Данные ФПК имели только внешние дефекты (вмятины, трещины, морщинистость), при этом признаков ферментативной и микробной порчи не было.

Для осуществления двухэтапного ферментативного гидролиза применяли ферментные препараты (ФП), характеристика которых представлена в табл. 2.

Таблица 1. Характеристика использованных ферментных препаратов

Table 1. Characteristics of the enzyme preparations used

Название ФП	Производитель	Активность	Температурный оптимум, °C	Оптимум pH
Альфалад БТ	ОАО «Биопрепарат»	800 ед./мл	90 – 95	6,5 – 7,5
Пектиназа		35 ед./г	35 – 50	3,7 – 4,3
Глюкавоморин		6000 ед./см ³	55 – 60	4,0 – 5,0
β-глюконаза		10000 ед./мл ¹ 20000 ед./мл ² 30000 ед./мл ³	65 – 70	4,0 – 5,0
Целлюлаза		4000 ед./мл	50 – 60	3,5 – 4,5

Примечания: ¹ – бета-глюканазная активность; ² – ксиланазная активность; ³ – целлюлазная активность.

Для оптимизации процесса двухэтапного ферментолиза (первого этапа) при установлении оптимальных значений основных факторов проводили его математическое моделирование методом ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) 2-го порядка для трех факторов: X₁ – температура 1-го этапа ферментолиза (45–55 °C); X₂ – значение pH ферментализуемой смеси (3,4–4,2); X₃ – время 1-го этапа ферментолиза (1–2 ч). В качестве параметра оптимизации использовали обобщенный показатель (Y), объединяющий частные отклики, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Частные отклики процесса ферментализации ФПК и их «идеальные» значения

Table 2. Partial responses of the low-grade fruit enzymolysis process and their "ideal" values

Наименование частного отклика		«Идеальное» значение
Y ₁	Активность фермента пектиназы ¹ , %	100
Y ₂	Активность фермента целлюлазы ¹ , %	100
Y ₃	Накопление растворимых сахаров, °Brix	8
Y ₄	Содержание сухих веществ, %	7

Примечание: ¹ – согласно паспорту ферментного препарата.

Первоначально целые фрукты подвергали мойке, измельчали на стационарной мясорубке с получением биомассы, включающей кожуру, семена, мякоть и косточки, после чего добавляли теплую воду температурой 50 °C (гидромодуль 1:1). Предварительно взвешенные ферменты, предназначенные для первичной ферментации, разводили в небольшом количестве теплой воды и вводили при перемешивании в смесь, состав которой представлен в табл. 3.

Таблица 3. Состав ферментируемой смеси из фруктов пониженного качества

Table 3. Composition of the fermented mixture from low-grade fruits

Компонент	Содержание
Яблоки, г	125
Апельсины, г	62,5
Бананы, г	62,5
Вода, г	125
Ферменты 1-го этапа	
Пектиназа, %	0,15
Целлюлаза, %	0,1
Ферменты 2-го этапа	
β-глюконаза, %	1,1
Глюкавомарин, %	0,5
Альфалад БТ, %	0,8

Контроль активной кислотности фруктовой смеси (pH) проводили с использованием pH-метра MT Measurement PH100B. Для регулирования и стабилизации показателей применяли растворы 40 %-й лимонной кислоты и насыщенный раствор карбоната натрия. Начальный показатель pH смеси составлял 4,1, а после добавления нескольких капель лимонной кислоты снизился до pH 3,9.

Двухступенчатый ферментализм проводили при постоянном перемешивании смеси с применением шейкера с возможностью контроля температуры и скорости вращения платформы: на первом этапе 49±2 °C, на втором – 61±2 °C.

По завершении процесса образцы нагревали на водяной бане до 80 °C в течение 15 мин для пастеризации смесей и инактивации ферментов. Далее смеси подвергали фракционированию путем центрифугирования (3900 об./мин, 10 мин), что обеспечивало эффективное разделение на жидкую и осадочную фракции. В жидкой фазе после очистки определяли содержание сухих веществ с использованием анализатора влажности OHAUS MB23, после чего она направлялась на обезвоживание. Перед обезвоживанием к ней добавляли карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) в

количестве 1,5 % к массе после предварительного нагрева на водяной бане до температуры 50 °С. Применение КМЦ обусловлено необходимостью повышения адгезионно-когезионных свойств жидкой фракции и улучшения процесса сушки при последующей сублимации, осуществляемой на установке Martin Christ Alpha1-2 LDplus при температуре минус 55 °С.

В полученных добавках определяли содержание влаги – по ГОСТ 28561-90; аскорбиновой кислоты – йодометрическим методом, по ГОСТ 4815-76; веществ с Р-витаминной активностью – пермарганатометрическим методом. Качественный углеводный состав анализировали методом инфракрасной спектроскопии на ИК-Фурье-спектрометре ФТ-801 с обработкой спектров в программе ZaiR 3.5. Эксперименты проводили в двукратной повторности. Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследовали химический состав наиболее распространенных в розничной торговле Калининградской области ФПК с внешними дефектами – яблок, бананов и апельсинов, включая среднеевропейские и азиатские сорта:

– яблоки: Belfort, Antonovka, Red, Golden, Ing.– Mar., Akerо, Wealthy;

– бананы: Palayankodan, Rasakadali, Robusta, Poovan, Nendran, Kadali, Red banana, Padatti;

– апельсины: Aiyuan, Buzhihuo, Chunjian, Daya, Mingrijian, Ponkan, Qicheng, Shatangju, Wogan, Yuanhong.

Основное внимание при анализе уделяли изучению их полисахаридного состава, который играет ключевую роль в ферментализации фруктов. Полисахариды представляют собой высокомолекулярные углеводные полимеры, которые в растительном сырье выполняют главным образом структурную функцию, являясь ключевыми элементами клеточных стенок. Результаты анализа содержания основных полисахаридов в изучаемых фруктах приведены в табл. 4 [6–10].

Таблица 4. Полисахаридный состав ферментированной смеси из фруктов пониженного качества

Table 4. Composition of the fermented mixture from low-grade fruits

Фрукт		Содержание от общего содержания углеводов, %			
		Целлюлоза	Гемицеллюлоза	Пектин	Крахмал
Яблоки		20,14 ± 2,34	42,70 ± 7,74	35,5 ± 6,64	1,66 ± 0,53
Бананы	Мякоть	64,34 ± 18,25	11,40 ± 3,25	9,49 ± 3,91	14,77 ± 4,20
	Кожура	22,95 ± 5,20	19,64 ± 4,92	32,48 ± 3,25	24,93 ± 5,12
Апельсины	Мякоть	39,93 ± 7,26	17,39 ± 4,31	36,01 ± 7,18	6,66 ± 1,55
	Кожура	21,59 ± 6,62	14,79 ± 1,63	58,31 ± 3,84	5,32 ± 0,57
Среднее значение		33,79 ± 21,49	21,18 ± 10,76	34,35 ± 11,67	10,66 ± 6,85

Из данных табл. 4 следует, что основную массовую долю полисахаридов во фруктовой композиции составляют целлюлоза и пектин – от 60 % общей массы всех полисахаридов сырья. Их разрушение является ключевым этапом в обеспечении доступа ферментов к содержимому клеток и высвобождению БАВ.

Для деградации целлюлозы и пектина были использованы специфические по активности ферменты – целлюлаза и пектиназа. Их применение обеспечивает растворение стенок растительных клеток и высвобождение крахмала и других растворимых сахаров, локализованных в хлоропластах клеток [11]. Для эффективного расщепления подобных соединений рационально было задействовать ферменты бета-глюканаза, амилаза, глюкаваморин, способствующие трансформации высвобожденных макромолекул в моно-, ди- и олигосахариды.

Для повышения глубины ферментализации ФПК процесс проводили в два этапа. Первый этап заключался в обработке сырья ферментами целлюлазно-пектиназного комплекса. В результате их воздействия происходило разрушение ригидных клеточных структур фруктовой массы, что сопровождалось высвобождением водорастворимых полисахаридов и БАВ, которые переходили в водную фазу системы, формируя ферментолитат. Второй этап заключался в ферментативной обработке смеси комплексом карбоксигидраз (бета-глюканаза, амилаза и глюкаваморин), который обеспечивал дальнейшее расщепление сложных углеводов до простых сахаров, преимущественно глюкозы и фруктозы, что существенно повышало выход, биологическую ценность и усвояемость конечного продукта.

В результате проведения экспериментов по плану ОЦКП были получены следующие зависимости обобщенного параметра оптимизации от температуры, pH и времени ферментализации в кодированной модели (соответствующие факторы X_1 , X_2 и X_3) и в натуральной модели (соответствующие обозначения T , K и B), представленные в уравнениях (1) и (2):

$$Y = 0.15867 + 0.03982x_1 + 0.00695x_2 + 1.1015x_3 + 0.02348x_1^2 + 0.033605x_2^2 - 0.00045x_3^2 + 0.008832x_1x_2 \quad (1)$$

$$Y = 0.0054B - 0.0018B^2 + 0.21003K^2 + 0.004416KT - 1.7996625 + 0.00094T^2 - 0.1027368T + 5.91028 \quad (2)$$

На основе полученных зависимостей были найдены оптимальные значения искомых факторов: температура ферментализации $T = 49^\circ\text{C}$; pH или активная кислотность $K = 3,8$; продолжительность $B = 2$ ч. С учетом этих данных была предложена усовершенствованная технологическая схема получения функциональной фруктовой добавки серии «ВИТУМИН», представленная на рис. 1.

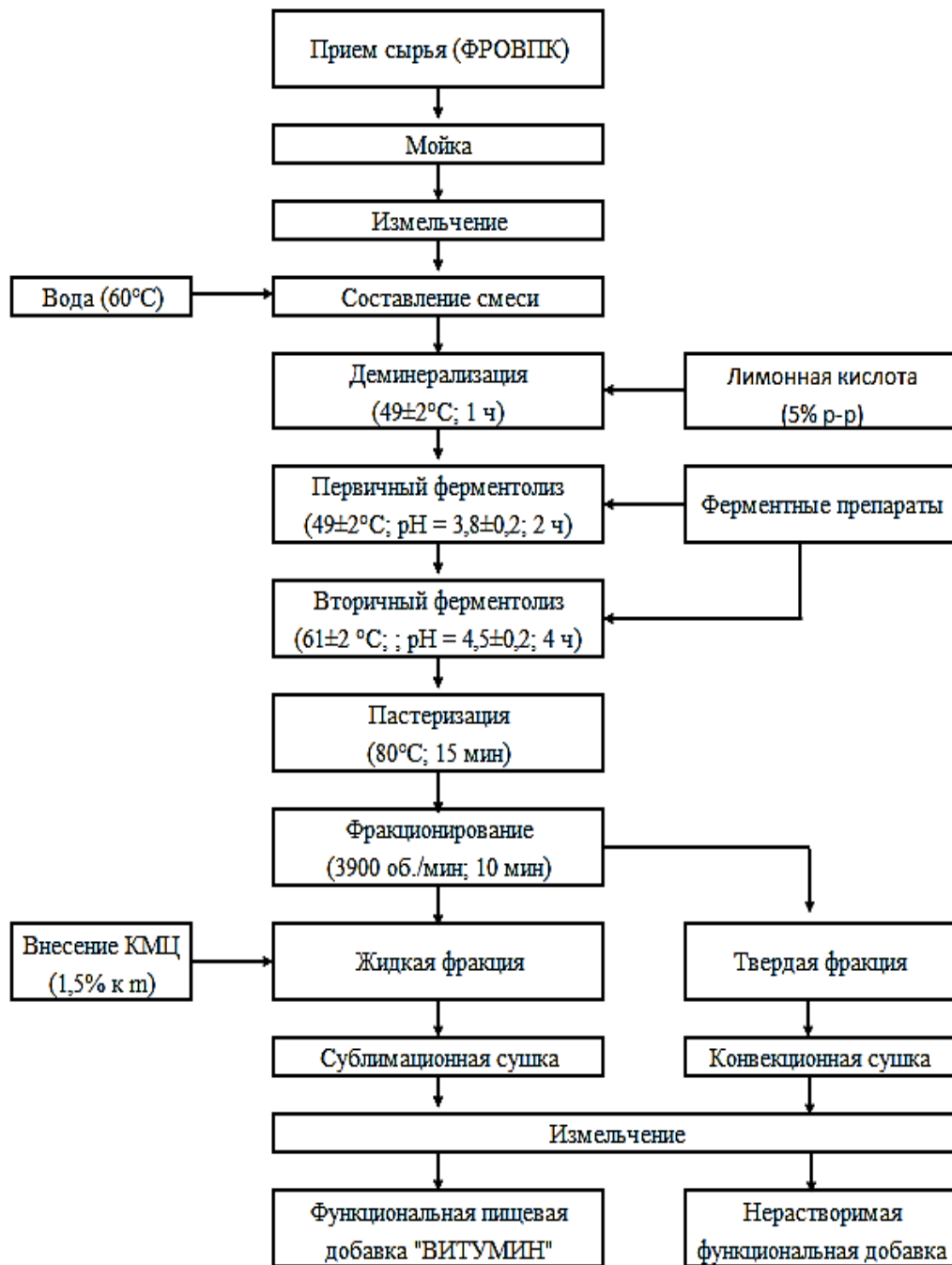


Рис. 1. Усовершенствованная технологическая схема получения функциональной пищевой добавки «ВИТУМИН» при комплексной переработке ФПК

Fig. 1. Improved technological scheme for obtaining the functional food additive "VITUMIN" during complex processing of low-grade fruits (LGF)

Отличительной особенностью предложенной технологии является двухстадийная последовательная обработка ФПК специфическими ферментами, что позволило увеличить степень биоконверсии сырья и повысить выход целевых продуктов ферментолитов (табл. 5).

Таблица 5. Характеристика массовых показателей ферментализатов
Table 5. Characteristics of the mass indicators of enzymolysates

Показатель	Контроль ¹	Опыт № 1		Опыт № 2		Сравнение	
		Повторность № 1	Повторность № 2	Повторность № 1	Повторность № 2	Среднее значение	Изменение выхода, %
Масса жидкой фракции ферментализата, г (до внесения КМЦ)	190,5	309,0	308,5	312,0	307,5	309,2	+62,3
Масса твердой фракции ферментализата, г	226,4	191	191,5	188,0	192,5	190,7	–15,7
Содержание сухих веществ, %	6,0	7,2	6,6	6,8	7,0	6,9	+15,0
Масса продукта после сушки, г	35,5	40,3	35,4	39,2	38,5	38,3	+7,9
Содержание воды в порошке, %	6,5	6,5	6,4	6,5	6,6	6,5	–
Выход продукта (добавки «ВИТУ-МИН»), % к массе сырья	14,2	16,1	14,1	15,6	15,4	15,3	+7,9

Примечание: ¹ – контрольные данные основаны на ранее опубликованных результатах [5].

Из приведенных данных следует вывод о значительном приросте ключевых целевых показателей, достигнутом за счет применения двухэтапной ферментации: масса жидкой фракции увеличилась на 62,3 %, содержание сухих веществ возросло на 15,7 %, а выход целевого продукта повысился на 7,9 %. Одновременно существенно сократилась масса побочной твердой фракции (на 15,7 %), что является прямым следствием более глубокой деградации клеточной структуры биомассы, обусловленной синергизмом поэтапного воздействия ферментным комплексом.

Для оценки эффективности биодегradации целлюлозы и пектина по накоплению простых сахаров на первом этапе ферментализации применяли методику ИК-Фурье спектроскопии в диапазоне волновых чисел от 500 до 4000 см⁻¹. Результаты исследования представлены на рис. 2.



Рис. 2. ИК-спектры ферментированного образца ФПК
Fig. 2. IR spectra of the fermented low-grade fruit (LGF) sample

Анализ полученных ИК-спектров показал, что после первого этапа ферментативной обработки в составе жидкой фракции преобладают продукты гидролиза структурных полисахаридов (главным образом целлюлозы и пектина). Установлено, что фракция преимущественно содержит компоненты, характерные для крахмала, а также простые сахара – глюкозу, фруктозу, сахарозу и короткие олигосахариды. Данное положение подтверждается наличием интенсивных пиков в диапазоне 2919 см^{-1} (C–H растяжения, характерные для алифатических углеводородов углеводной природы), 1712 см^{-1} (валентные колебания карбонильных групп C=O, связанные с присутствием моносахаридов), а также выраженным комплексом полос в области $1023\text{--}1251\text{ см}^{-1}$, соответствующих валентным колебаниям связей C–O в спиртовых и эфирных функциональных группах, что типично для углеводов, включая крахмал и простые сахара.

Одновременно спектральная картина демонстрирует значительное снижение интенсивности сигналов, ассоциированных с нативными целлюлозой и пектином. Остаточное присутствие данных полимеров фиксируется лишь слабыми сигналами – в области около 1598 см^{-1} (возможные колебания карбоксильных анионных групп COO^- , связанные с остатками пектиновых кислот) и при 1344 см^{-1} (деформационные колебания C–O–H связей, характерные для целлюлозного остова). Существенное ослабление данных пиков по сравнению с контрольным образцом указывает на эффективную частичную деградацию целлюлозно-пектинового комплекса под действием ферментных препаратов на первом этапе обработки [12].

Содержание витамина С и соединений с Р-витаминной активностью в целевом продукте – добавке «ВИТУМИН» – представлено в табл. 6.

Таблица 6. Содержание витаминов С и Р в функциональной добавке из ФПК «ВИТУМИН»

Table 6. Vitamin C and P content in the functional food additive "VITUMIN" derived from low-grade fruits

Показатель	Контроль ¹	Опыт № 1		Опыт № 2		Среднее значение	Удовлетворение суточной потребности, % ²
		Повторность № 1	Повторность № 2	Повторность № 1	Повторность № 2		
Содержание витамина С, мг/100 г	72,0	65,2	61,7	69,3	70,1	66,5	66,5
Содержание витамина Р, мг/100 г	122,4	117,3	112,5	131,7	128,6	122,5	61,2

Примечание: ¹ – контрольные данные основаны на опубликованных результатах [5];
² – МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации».

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о функциональных свойствах добавки «ВИТУМИН», изготавливаемой по усовершенствованной технологии. Употребление 100 г добавки обеспечивает удовлетворение суточной потребности в витамине С на 66,5 % от физиологической нормы, а витамина Р – на 61,2 %. С учетом потенциального присутствия других БАВ ароматической природы (флавоноидов, катехинов, антоцианов) и антиоксидантных свойств витаминов С и Р полученную добавку можно характеризовать как биологически активную добавку – источник природных антиоксидантов. Учитывая природный потенциал сырья и щадящие условия ферментализации в составе добавки можно ожидать также наличие значительного количества других БАВ – простых сахаров (глюкоза, фруктоза, сахароза), органических кислот (яблочная, лимонная), растворимых олигосахаридов различной молекулярной массы, а также витаминов (группы В, РР, К и др.), минеральных веществ (натрий, калий, магний, кальций, железо), характерных для исходной фруктовой смеси.

Показатели микробиологической безопасности разработанной добавки свидетельствуют о ее соответствии требованиям, установленным Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» (табл. 7).

Микробиологический анализ подтвердил соответствие разработанной фруктовой функциональной добавки серии «ВИТУМИН» требованиям ТР ТС 021/2011 по основным показателям безопасности. Зафиксировано незначительное превышение содержания дрожжей, что в целом характерно для натурального фруктового сырья и не влияет на безопасность продукта.

Таблица 7. Микробиологические показатели безопасности функциональной пищевой фруктовой добавки «ВИТУМИН»

Table 7. Microbiological safety indicators of the functional fruit food additive "VITUMIN"

Показатель	Функциональная пищевая фруктовая добавка «ВИТУМИН»	Требования ТР ТС 021/2011
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	$3,3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
БГКП, не допускаются в массе, г	не обнаружено в 0,1 г	0,1
<i>E.coli</i> , не допускается в массе, г	не обнаружено в 1,0 г	1,0
Плесени, КОЕ/г, не более	$0,3 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
Дрожжи, КОЕ/г, не более	$0,5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^1$

Добавка «ВИТУМИН», полученная методом двухступенчатого ферментализации фруктов с внешними дефектами, представляет собой концентрат натуральных биологически активных соединений. Ее достоинством также являются безопасность, приятная органолептическая оценка с фруктовыми оттенками вкуса и аромата. Добавку рекомендуется употреблять для обогащения многих пищевых продуктов (хлебобулочных, молочных, мясных, кондитерских изделий) с целью повышения их органолептической привлекательности и пищевой ценности. Целесообразно ее введение в состав специализированной пищевой продукции спортивного, диетического и лечебно-профилактического назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований усовершенствована технология переработки фруктов пониженного качества в функциональную пищевую добавку «ВИТУМИН» путем введения двухэтапного ферментализации специализированными ферментами.

На основании анализа полисахаридного состава ФПК (яблоки, бананы, апельсины) обоснованы этапность и состав ферментного комплекса: на первом этапе – целлюлаза и пектиназа для деструкции клеточных стенок; на втором – β -глюконаза, глюкаваморин и альфа-галактаридаза БТ для гидролиза полисахаридов до простых сахаров.

Методом математического моделирования установлены оптимальные значения факторов первого этапа ферментализации: температура – 49 °С, pH – 3,8, продолжительность – 2 ч. Показано, что двухэтапная обработка позволяет увеличить выход жидкой фракции на 62,3 %, содержание сухих веществ – на 15,7 %, а выход целевой добавки – на 7,9 % по сравнению с одностадийной технологией. Методом ИК-спектроскопии подтверждена эффективность деградации целлюлозно-пектинового комплекса ФПК.

Установлено высокое содержание в добавке витаминов-антиоксидантов (С – 66,5 мг/100 г, Р – 122,5 мг/100 г), обеспечивающих 66,5 и 61,2 % от рекомендуемой физиологической суточной нормы соответственно. По микробиологической безопасности добавка соответствует требованиям ТР ТС 021/2011.

Полученная добавка «ВИТУМИН» обладает функциональными свойствами и рекомендуется в качестве обогащающего компонента в составе традиционных и при проектировании специализированных продуктов питания.

Список источников

1. Healthy diet. – Текст: электронный // World Health Organization (WHO): сайт. – URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet> (дата обращения: 18.11.2025).
2. Рациональные нормы потребления пищевых продуктов. – Текст: электронный // Министерство здравоохранения Российской Федерации: сайт. – URL: <https://minzdrav.gov.ru/opendata/7707778246-normpotrebproduct/visual> (дата обращения: 18.11.2025).
3. Influence of moisture content and temperature interaction on mechanical properties of DESMA (Novella pentadesma) SEED / O. A. Fabunmi, Z. D. Osunde, B. A. Alabadan, A. A. Jigam // Journal of Advances in Food Science & Technology. – 2015. – № 2. – P. 81–85.
4. Санкин, С. А. Основные направления в организации сбора, транспортировки, обезвреживания и использования твердых бытовых отходов (ТБО) / С. А. Санкин // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 12. – С. 91–98.
5. Мезенова, О. Я. Получение функциональных пищевых добавок при комплексной переработке фруктов и овощей пониженного качества с применением методов биотехнологии / О. Я. Мезенова, В. А. Карлов, А. А. Гольбрайх // Вестник МГТУ. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 302–315.
6. Salo, M. L. Carbohydrate and acid composition of some apple varieties / M. L. Salo, I. Korhonen // Agricultural and Food Science. – 1972. – Vol. 44 (2). – P. 63–67.
7. Nanocellulose and microcrystalline cellulose from citrus processing waste: a review / R. Ciriminna, G. Li Petri, G. Angellotti [et al.]. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135865 // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 281. – P. 135865.
8. Yoshida, Y. Citrus Juice Waste as a Potential Source of Dietary Fiber / Y. Yoshida, M. Ueda. – DOI: 10.2503/jjshs.53.354 // Journal of The Japanese Society for Horticultural Science. – 1984. – Vol. 53, № 3. – P. 354–361.
9. Physiochemical analysis of Five Varieties of Banana Commonly Consumed in Nigeria / I. Ogunlade, O. S. Adediran, M. A. Azeez [et al.] // International Journal of Agriculture Innovations and Research. – 2019. – Vol. 7, № 5. – P. 567–570.
10. Soltani, M. Some Physical Properties of Full-Ripe Banana Fruit (Cavendish variety) / M. Soltani, R. Alimardani, M. Omid // International Journal of Agricultural Science, Research and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 1–5.
11. Enzyme activities and gene expression of starch metabolism provide insights into grape berry development / X. Zhu, C. Zhang, W. Wu [et al.]. – DOI: 10.1038/hortres.2017.18 // Horticulture Research. – 2017. – Vol. 4. – P. 17018.
12. Тарасевич, Б. Н. ИК-спектры основных классов органических соединений: справочные материалы / Б. Н. Тарасевич. – Москва: Хим. фак. МГУ, 2012. – 55 с.

References

1. Healthy diet. – Text: electronic // World Health Organization (WHO): site. – URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet> (date of treatment: 18.11.2025).
2. Rational norms of food product consumption. – Text: electronic // Ministry of Health of the Russian Federation: site. – URL: <https://minzdrav.gov.ru/opendata/7707778246-normpotrebproduct/visual> (date of treatment: 18.11.2025).
3. Influence of moisture content and temperature interaction on mechanical properties of DESMA (Novella pentadesma) SEED / O. A. Fabunmi, Z. D. Osunde, B. A. Alabadan, A. A. Jigam // Journal of Advances in Food Science & Technology. – 2015. – № 2. – P. 81–85.
4. Sankin, S. A. Main directions in the organization of collection, transportation, neutralization and use of solid household waste (MSW) / S. A. Sankin // Technical Sciences – from Theory to Practice. – 2012. – № 12. – P. 91–98.
5. Mezenova, O. Ya. Obtaining functional food additives in the complex processing of fruits and vegetables of reduced quality using biotechnology methods / O. Ya. Mezenova, V. A. Karlov, A. A. Gol'braykh // Vestnik of MSTU. – 2024. – Vol. 27, № 3. – P. 302–315.
6. Salo, M. L. Carbohydrate and acid composition of some apple varieties / M. L. Salo, I. Korhonen // Agricultural and Food Science. – 1972. – Vol. 44 (2). – P. 63–67.
7. Nanocellulose and microcrystalline cellulose from citrus processing waste: a review / R. Ciriminna, G. Li Petri, G. Angellotti [et al.]. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135865 // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 281. – P. 135865.
8. Yoshida, Y. Citrus Juice Waste as a Potential Source of Dietary Fiber / Y. Yoshida, M. Ueda. – DOI: 10.2503/jjshs.53.354 // Journal of The Japanese Society for Horticultural Science. – 1984. – Vol. 53, № 3. – P. 354–361.
9. Physiochemical analysis of Five Varieties of Banana Commonly Consumed in Nigeria / I. Ogunlade, O. S. Adediran, M. A. Azeez [et al.] // International Journal of Agriculture Innovations and Research. – 2019. – Vol. 7, № 5. – P. 567–570.
10. Soltani, M. Some Physical Properties of Full-Ripe Banana Fruit (Cavendish variety) / M. Soltani, R. Alimardani, M. Omid // International Journal of Agricultural Science, Research and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 1–5.
11. Enzyme activities and gene expression of starch metabolism provide insights into grape berry development / X. Zhu, C. Zhang, W. Wu [et al.]. – DOI: 10.1038/hortres.2017.18 // Horticulture Research. – 2017. – Vol. 4. – P. 17018.
12. Tarasevich, B. N. IR spectra of the main classes of organic compounds: reference materials / B. N. Tarasevich. – Moscow: Faculty of chemistry MSU, 2012. – 55 p.

Информация об авторах

В. А. Карлов – магистрант 1-го курса кафедры пищевой биотехнологии
О. Я. Мезенова – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой пищевой биотехнологии

Information about the authors

V. A. Karlov – 1st year Master degree student of the Department of Food Biotechnology
O. Ya. Mezenova – DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Food Biotechnology

Вклад авторов

В. А. Карлов – анализ литературы, проведение экспериментов по оценке эффективности предложенного метода, анализ экспериментальных данных, подготовка статьи
О. Я. Мезенова – постановка задачи, статистическая обработка и интерпретация экспериментальных данных, подготовка статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

V. A. Karlov – literature review, conducting experiments to evaluate the effectiveness of the proposed method, analysis of experimental data, manuscript preparation
O. Ya. Mezenova – formulation of the research problem, statistical processing and interpretation of experimental data, manuscript preparation

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.03.2026; одобрена после рецензирования 11.03.2026; принята к публикации 13.03.2026.

The article was submitted 02.03.2026; approved after reviewing 11.03.2026; accepted for publication 13.03.2026.

Научная статья

УДК 664.953

DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-86-98

Влияние инулина пищевого и фукуса сушеного на микробиологическую стабильность пастеризованного рыбного паштета

Дмитрий Сергеевич Федоров^{1✉}, Наталия Юрьевна Ключко²

^{1, 2} Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹dima.e.02@inbox.ru[✉]

²natalya.kluchko@klgtu.ru

Аннотация. В статье приведены результаты микробиологического исследования, посвященного оценке стабильности нового пастеризованного рыбного паштета, обогащенного функциональными компонентами. В качестве последних были выбраны инулин пищевой, который вводился в виде порошка, и фукус пузырчатый сушеный измельченный (*Fucus vesiculosus*). Исследованы микробиологические показатели компонентов рецептуры паштета, представляющих повышенный риск, – треска мороженая и фукус пузырчатый. В ходе эксперимента, который длился 75 суток, проводился сравнительный мониторинг трех образцов пастеризованного продукта: контрольный образец – пастеризованный рыбный паштет без функциональных компонентов, хранившийся в оптимальных условиях при температуре 4 ± 2 °C; опытный образец 1 – пастеризованный рыбный паштет с функциональными компонентами, хранившийся в оптимальных условиях при температуре 4 ± 2 °C; опытный образец 2 – пастеризованный рыбный паштет с функциональными компонентами, хранившийся в экстремальных условиях при температуре 22 ± 2 °C. Стабильность рыбных паштетов в процессе хранения обуславливалась комплексным влиянием двух факторов – рецептурным составом (наличие/отсутствие функциональных компонентов) и соблюдением температурного режима. Было установлено, что компоненты рецептуры рыбного паштета, а также готовые образцы, с функциональными компонентами и без них, хранившиеся в оптимальных условиях на протяжении всего эксперимента, соответствовали всем показателям (КМАФАнМ, БГКП, плесени, *S. aureus*, *V. parahaemolyticus*, *B. cereus*, сульфитредуцирующие клостридии) ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции». Для сравнения был проведен микробиологический анализ аналогового продукта, купленного в супермаркете со схожей рецептурой на конец срока годности.

Ключевые слова: рыбный паштет, пищевые волокна, пребиотики, микробиологическая безопасность.

Благодарности: авторы выражают благодарность кандидату биологических наук, доценту кафедры водных биоресурсов и аквакультуры Калининградского государственного технического университета Казимирченко Оксане Владимировне, под руководством которой проводились микробиологические исследования.

Финансирование: работа выполнена в соответствии с утвержденным планом тематик научных исследований ФГБОУ ВО «КГТУ», осуществляемых за счет средств федерального бюджета (бюджетный цикл 2025–2027, регистрационный номер карты ЕГИСУ НИОКТР 1124072300009-1 от 23.07.2024 г.), а также в соответствии с соглашением о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ).

Для цитирования: Федоров Д. С., Ключко Н. Ю. Влияние инулина пищевого и фукуса сушеного на микробиологическую стабильность пастеризованного рыбного паштета // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 86–98. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-86-98.

Original article

The effect of food inulin and dried fucus on the microbiological stability of pasteurized fish paste

Dmitriy S. Fedorov^{1✉}, Nataliya Yu. Klyuchko²

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹dima.e.02@inbox.ru[✉]

²natalya.kluchko@klgtu.ru

Abstract. The article presents the results of a microbiological study devoted to assessing the stability of a new pasteurized fish paste enriched with functional components. The following functional ingredients have been selected: food grade inulin, which has been introduced as a powder, and dried crushed *Fucus vesiculosus*. The microbiological parameters of the components of the paste formulation that pose an increased risk have been studied: frozen cod and bubbly fucus. During the experiment, which lasted 75 days, comparative monitoring of three samples of the pasteurized product was carried out: control sample – pasteurized fish paste without functional components, stored in optimal conditions at a temperature of 4 ± 2 °C; prototype 1 – pasteurized fish paste with functional components, stored in optimal conditions at a temperature of 4 ± 2 °C; prototype 2 – pasteurized fish paste with functional components, stored in extreme conditions at a temperature of 22 ± 2 °C. The stability of fish pastes during storage has been determined by the complex influence of two factors: the formulation (presence / absence of functional components) and compliance with the temperature regime. It has been found that the components of the fish paste formulation, as well as the finished samples, with and without functional components, stored in optimal conditions throughout the experiment corresponded to all indicators (TAMC, coliforms, molds, *S. aureus*, *V. parahaemolyticus*, *B. cereus*, sulfite-reducing clostridia) EAEU Technical Regulation 040/2016 "On the safety of fish and fish products". For comparison, a microbiological analysis of an analog product purchased at a supermarket with a similar formulation at the end of the shelf life has been carried out.

Keywords: fish paste, dietary fiber, prebiotics, microbiological safety.

Acknowledgements: the authors would like to thank Oksana Vladimirovna Kazimirchenko, PhD, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources

and Aquaculture at KSTU, under whose leadership microbiological studies were conducted.

Funding: the work was carried out in accordance with the approved plan of scientific research topics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «KSTU», carried out at the expense of the federal budget (budget cycle 2025–2027, registration number of the EGISU R&D card 1124072300009-1 dated 07/23/2024), as well as in accordance with the agreement on the provision of subsidies from the federal budget for the financial support of the state task for the provision of public services (performance of works).

For citation: Fedorov D. S., Klyuchko N. Yu. The effect of food inulin and dried fucus on the microbiological stability of pasteurized fish paste. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):86–98. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-86-98.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат) Российская Федерация продолжает активно добывать водные биологические ресурсы из океанов и морей, омывающих ее берега. Так, в 2023 г. было выловлено 5369 тыс. т, в 2024 – 4913 тыс. т, в 2025 – 4639 тыс. т. Во внутренних водах добыча в эти годы составила 153, 143 и 160 тыс. т гидробионтов соответственно.

По предварительным прогнозам, как отмечает глава Росрыболовства Илья Шестаков, к концу 2026 г. вылов водных биологических ресурсов может составить порядка 4,8 млн т. Основными районами промысла в последние годы являются Тихий и Атлантический океаны – соответственно 76 и 19,7 % от общего вылова.

В 2023 и 2024 гг. выработано свыше 856 и 841 тыс. т морской свежей или охлажденной рыбы. Согласно данным, которые озвучил глава Росрыболовства, внутреннее производство рыбы и морепродуктов в России демонстрирует устойчивый рост и успешно покрывает внутренний спрос населения. По итогам за 2024 г. показатель самообеспечения составил 138,4 %, также вырос показатель потребления рыбы на душу населения и теперь он составляет 23,5 кг.

Рыбные продукты в нашей стране занимают значительную долю в рационе питания среди всех слоев населения [1–3]. Как известно, рыбное сырье отличается более высокой питательной ценностью в сравнении с белками животных [4]. Рыбные белки легче и быстрее усваиваются, содержат все незаменимые аминокислоты в оптимальном соотношении, а также более приближены к эталонному. Липидный профиль данного сырья характеризуется высокой концентрацией полиненасыщенных жирных кислот – линолевой, линоленовой и арахидоновой, а также содержанием двух уникальных кислот – эйкозопентаеновой и докозогексаеновой [5, 6].

Одним из наиболее актуальных решений переработки рыбного сырья являются пастеризованные и стерилизованные консервы [7], при этом термическая обработка продукции методом пастеризации позволяет лучше сохранять макро- и микронутриенты в готовом изделии [8–11]. Помимо этого, актуальной проблемой в питании является критически низкое потребление пищевых волокон. Последние способны замедлить эвакуацию пищи из желудка, так как стимулируют моторную функцию кишечника, предотвращают быструю потерю влаги в кишечнике, сорбируют жирные кислоты и снижают уровень холестерина, способствуют нормализа-

ции углеводного обмена, тем самым предотвращая диабет [12]. Последствия нарушения рекомендуемых норм могут приводить к серьезным заболеваниям желудочно-кишечного тракта – дисбактериозу, запорам и онкологии [13].

Одними из наиболее перспективных источников пищевых волокон являются инулин и фукоидан. Первый полимер представляет собой растворимое соединение, мономером которого является фруктоза, ферментируется исключительно микрофлорой кишечника человека и является пребиотиком. Доказано, что инулин способствует росту лакто- и бифидобактерий [14]. Фукоидан – сульфатированный гетерополисахарид, основным мономером которого является L-фукоза, обладает целым спектром биологически активных свойств, в том числе и пребиотическим [15, 16].

Цель работы – определение микробиологических аспектов безопасности пастеризованного рыбного паштета. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены основные задачи: исследовать микробиологические показатели сырья; провести микробиологический анализ образцов паштетов и исследовать динамику накопления микробиологических показателей; установить микробиологическую стабильность готового продукта в экстремальных условиях хранения; установить влияние функциональных компонентов на микробиологическую стабильность готового продукта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выступил рыбный пастеризованный паштет. Микробиологические испытания проводились для двух рецептов готового продукта – без функциональных компонентов (так называемый контрольный образец) и с функциональными (экспериментальный образец) (табл. 1.) [13].

Таблица 1. Рецептуры рыбных паштетов [13]

Table 1. Recipes of fish pastes [13]

Компонент рецептуры	Рецептура рыбного паштета, количество ингредиентов, г/100 г	
	без функциональных компонентов	с функциональными компонентами
Треска бланшированная	41,7	41,7
Крупа рисовая нешлифованная отварная	20,0	18,3
Морковь столовая пассерованная	13,2	11,6
Лук репчатый пассерованный	11,3	9,7
Масло подсолнечное рафинированное дезодорированное	6,7	6,7
Вода питьевая	6,0	6,0
Инулин пищевой	–	2,9
Фукус пузырчатый сушеный измельченный	–	2,0
Соль пищевая	1,1	1,1

Отбор проб для микробиологических исследований проводился в соответствии с ГОСТ 31904-2012 «Продукты пищевые. Методы отбора проб для микробиологических испытаний».

Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) определяли в соответствии с ГОСТ 10444.15-94 «Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов», количество бактерий группы кишечных палочек (колиформы) (БГКП) – в соответствии с ГОСТ 31747-2012 «Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий)».

Наличие золотистого стафилококка (лат. *Staphylococcus aureus*) и других коагулазо-положительных стафилококков определяли согласно ГОСТ 31746-2012 «Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества коагулазоположительных стафилококков и *Staphylococcus aureus*».

Парагемолитический вибрион (лат. *Vibrio parahaemolyticus*) выявляли в соответствии с ГОСТ ISO/TS 21872-1-2013 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Горизонтальный метод обнаружения потенциально энтеропатогенных *Vibrio* spp. Часть 1. Обнаружение бактерий *Vibrio parahaemolyticus* и *Vibrio cholerae*», плесневые грибы – в соответствии с ГОСТ 10444.12-2013 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых грибов».

Bacillus cereus определяли согласно ГОСТ 10444.8-2013 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Горизонтальный метод подсчета presumptivных бактерий *Bacillus cereus*. Метод подсчета колоний при температуре 30 °С», сульфитредуцирующие клостридии – согласно ГОСТ 29185-2014 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета сульфитредуцирующих бактерий, растущих в анаэробных условиях».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пастеризованный рыбный паштет хранился в стеклянной таре объемом 100 мл с крышками твист-офф.

На основании МУК 4.2.1847-04 «Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов» для пастеризованных рыбных паштетов был установлен ориентировочный срок годности – 180 суток.

Микробиологические исследования готовых образцов проводили на 0-е сутки (день приготовления), 15-е, 30-е, 45-е, 60-е и 75-е сутки. Изучая микробный фон продукта в каждой точке контроля, описывали культуральные и морфологические признаки разнотипных колоний, выросших на питательных средах.

Для комплексной оценки сроков годности рыбных паштетов были выбраны оптимальные условия хранения при температуре 4±2 °С и экстремальные – при температуре 22±2 °С.

В данном исследовании анализ показателей качества на патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы и *Listeria monocytogenes*, не проводился, так как он был выполнен поставщиком на этапе выпуска продукции.

В табл. 2 приведены результаты микробиологического анализа ключевых компонентов рецептуры с точки зрения повышенного микробиологического риска – трески мороженой и фукуса пузырчатого сушеного измельченного.

Таблица 2. Результаты микробиологического анализа сырья

Table 2. Results of microbiological analysis of raw materials

Наименование показателя	Треска мороженая тихоокеанская		Фукус пузырчатый сушеный	
	Нормативные значения ТР ЕАЭС 040/2016	Экспериментальные значения	Нормативные значения ТР ЕАЭС 040/2016	Экспериментальные значения
КМАФАнМ	не более 1×10^5 КОЕ/г	менее $1,5 \times 10^2$ КОЕ/г	не более 1×10^4 КОЕ/г	менее $1,5 \times 10^2$ КОЕ/г
БГКП	не допускаются в 0,001 г	не обнаружено в 0,001 г	не допускаются в 1 г	не обнаружено в 1 г
<i>S. aureus</i>	не допускаются в 0,01 г	не обнаружено в 0,01 г	не нормируются	не нормируются
<i>V. parahaemolyticus</i>	не допускаются	не обнаружено в 100 г	не нормируются	не нормируются
Плесени	не нормируется	не нормируется	не допускаются в 100 г	81 КОЕ/г

Микробный фон мороженой трески и фукуса пузырчатого был представлен преимущественно грамположительными кокками, включая микрококки, диплококки и стрептококки. На плотных питательных средах они образовывали колонии с общими культуральными признаками: круглая форма, гладкая и глянцевая поверхность. Цвет колоний варьировал от белого до желтого.

В табл. 3 приведены результаты микробиологического анализа трех готовых образцов рыбных паштетов: с функциональными компонентами и без них при оптимальных условиях хранения, с функциональными компонентами при экстремальных условиях хранения.

Таблица 3. Результаты микробиологического анализа готовых образцов

Table 3. Results of microbiological analysis of finished samples

Точки анализа	Микробиологические показатели					
	КМАФАнМ	БГКП	<i>S. aureus</i>	<i>B. cereus</i>	Сульфитредуцирующие клостридии	Плесени
1	2	3	4	5	6	7
Нормативные значения ТР ЕАЭС 040/2016						
	не более $2,0 \times 10^2$ КОЕ/г	не допускаются в 1 г	не допускаются в 1 г	не допускаются в 1 г	не допускаются в 1 г	Не нормируются

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
Рыбный паштет с функциональными компонентами, оптимальные условия хранения (Т=4±2 °С)						
0-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
15-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
30-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
45-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
60-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
75-е сутки	менее 10 ¹ КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
Рыбный паштет без функциональных компонентов, оптимальные условия хранения (Т=4±2 °С)						
0-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
15-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
30-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
45-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
60-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г
75-е сутки	менее 1,5х10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5х10 ¹ КОЕ/г

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
Рыбный паштет с функциональными компонентами, экстремальные условия хранения (T=22±2 °C)						
0-е сутки	менее 1,5x10 ² КОЕ/г	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	не обнаружены в 1 г продукции	менее 5x10 ¹ КОЕ/г
15-е сутки	7,0x10 ² КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5x10 ¹ КОЕ/г
30-е сутки	5,7x10 ³ КОЕ/г	то же	то же	то же	то же	менее 5x10 ¹ КОЕ/г

Как видно из табл. 3, показатели КМАФАнМ для двух рецептур пастеризованных паштетов, хранившихся при оптимальных условиях, оставались на стабильном уровне (менее 1,5x10² КОЕ/г) и не превышали требования ТР ЕАЭС 040/2016. БГКП, *S. aureus*, *B. cereus* и сульфитредуцирующие клостридии не были обнаружены ни в одной из проб. Таким образом, экспериментально подтверждено, что обогащение рецептуры рыбного паштета функциональными компонентами не оказало отрицательного влияния на сохранность продукта.

Микробный фон рыбных паштетов при оптимальных условиях хранения был представлен преимущественно грамположительными кокками, включая микрококки, диплококки и стрептококки. На плотных питательных средах они образовывали колонии с общими культуральными признаками: круглая форма, гладкая и глянцевая поверхность. Цвет колоний варьировал от белого до желтого и оранжевого.

Микробный фон рыбного паштета, хранившегося при экстремальных условиях, был представлен преимущественно грамположительными монобактериями без спор. На плотных питательных средах они образовывали колонии с общими культуральными признаками: круглая форма, гладкая и глянцевая поверхность. Цвет колоний варьировал от белого до оранжевого.

В образцах, хранившихся в оптимальных условиях, органолептический профиль (цвет, вкус, запах, консистенцию и внешний вид) оставался стабильным на протяжении 75 суток хранения.

Паштет, хранившийся в экстремальных условиях, проявил значительное ухудшение органолептических качеств, включая неприятный запах, вкус, изменение цвета и текстуры.

Дополнительно был проведен микробиологический анализ аналогового образца, имеющего схожую рецептуру, купленного в супермаркете. Микробиологические испытания аналогового паштета с заявленным сроком годности 120 суток были проведены на пределе этого периода – за 14 суток до его истечения. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты микробиологического анализа аналогового образца
Table 4. Results of microbiological analysis of an analog sample

Наименование показателя	Нормативные значения ТР ЕАЭС 040/2016	Результаты испытаний
КМАФАнМ	не более $2,0 \times 10^2$ КОЕ/г	менее $1,5 \times 10^2$ КОЕ/г
БГКП	не допускаются в 1 г	не обнаружены в 1 г продукции
<i>S. aureus</i>	не допускаются в 1 г	не обнаружены в 1 г продукции
<i>B. cereus</i>	не допускаются в 1 г	не обнаружены в 1 г продукции
Сульфитредуцирующие клостридии	не допускаются в 1 г	не обнаружены в 1 г продукции
Плесени	не нормируются	менее 5×10^1 КОЕ/г

Микрофлора была представлена грамположительными и грамотрицательными кокками, включая диплококки и стрептококки. На питательной среде они образуют круглые, гладкие, блестящие колонии с ровными краями; цвет колоний варьировал от оранжевого до желтого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Треска мороженая и фукус пузырчатый сушеный измельченный, используемые для производства пастеризованного рыбного паштета, полностью соответствовали нормативам ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции».

Образцы пастеризованных паштетов с функциональными компонентами и без них, хранившиеся в оптимальных условиях при температуре 4 ± 2 °С, сохраняли микробиологическую стабильность на протяжении всего эксперимента – 75 дней. Все исследованные показатели соответствовали нормативам ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции». Сохранение органолептических характеристик также подтверждает стабильность продукции при хранении.

У образца паштета, хранившегося при температуре 22 ± 2 °С, отмечался рост показателя КМАФАнМ с 15-х суток эксперимента, к 30-м суткам у продукта наблюдалась выраженная органолептическая порча.

Введение функциональных компонентов – инулина пищевого и фукуса сушеного (*Fucus vesiculosus*) – в рецептуру рыбного паштета не оказало негативного влияния на микробиологическую стабильность и сохранность органолептических показателей продукции в ходе эксперимента.

Список источников

1. Колончин, К. В. Возможные направления решения проблемы обеспечения новых требований потребления рыбной продукции / К. В. Колончин, С. Н. Серегин, М. А. Горбунова. – DOI: 10.36038/2307-3497-2022-187-170-179 // Труды ВНИРО. – 2022. – № 187. – С. 170–179.

2. Цибизова, М. Е. К вопросу получения рыбных паштетов повышенной биологической ценности / М. Е. Цибизова. – DOI: 10.24143/2073-5529-2020-3-134-143 // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2020. – № 3. – С. 134–143.
3. Федоров, Д. С. Анализ рынка рыбных паштетов в Калининградской области и пути повышения их биологической ценности / Д. С. Федоров, Н. Ю. Ключко. – DOI: 10.46845/2541-8254-2024-1(43)-15-15. – Текст: электронный // Вестник молодежной науки: электронный научный журнал. – 2024. – № 1. – URL: https://vestnikmolnauki.ru/wp-content/uploads/2024/03/Statya-15-Fedorov-D.-Klyuchko-1_red.pdf (дата обращения: 11.01.2026).
4. Цибизова, М. Е. Использование рыбного белка в сбалансированном питании / М. Е. Цибизова, Н. Д. Аверьянова // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2009. – № 1. – С. 166–169.
5. Забегалова, Г. Н. Разработка технологии кулинарного рыбного полуфабриката с высоким содержанием белка / Г. Н. Забегалова, А. Л. Новокшанова, Т. Ю. Бурмагина. – DOI: 0.52231/2225-4269_2023_4_166 // Молочнохозяйственный вестник. – 2023. – № 4. – С. 166–179.
6. Полиненасыщенные жирные кислоты семейства омега-3 в продукции из дальневосточных рыб / Л. В. Шульгина, Е. В. Якуш, Т. А. Давлетшина [и др.]. – DOI: 10.5281/zenodo.1115456 // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2017. – № 5. – С. 42–45.
7. Корниенко, Н. Л. Научное обоснование и разработка технологии рыбных паштетов на основе рационального использования наваги и красноперки: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.18.04 / Корниенко Надежда Леонидовна: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет. – Владивосток, 2021. – 24 с.
8. Создание новых деликатесных пастеризованных рыбных консервов с экзотическими фруктами и оливковым маслом / А. В. Демид, В. А. Гроховский, Л. К. Куранова, В. И. Волченко. – DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-3-460-470 // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2018. – № 3. – С. 460–470.
9. Гусева, Л. Б. Технология пастеризованных паштетов пролонгированного хранения из дальневосточных рыб / Л. Б. Гусева, Н. Л. Корниенко. – DOI: 10.48612/dalrybvtuz/2024-69-02 // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. – 2024. – № 3. – С. 18–27.
10. Куприй, А. С. Разработка технологии рыбного паштета с функциональными ингредиентами: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 4.3.3 / Куприй Анастасия Сергеевна: Российский государственный аграрный университет. – Москва, 2025. – 22 с.
11. Мышалов, Я. Д. Разработка рыбной продукции с пребиотическими свойствами / Я. Д. Мышалов, Д. С. Федоров, Н. Ю. Ключко. – DOI: 10.46845/2541-8254-2024-1(48)-8-8. – Текст: электронный // Вестник молодежной науки: электронный научный журнал. – 2025. – № 1. – URL: https://vestnikmolnauki.ru/wp-content/uploads/2025/04/Statya-8-MyshalovFedorov_red.pdf (дата обращения: 11.01.2026).

12. Пырьева, Е. А. Роль и место пищевых волокон в структуре питания населения / Е. А. Пырьева, А. И. Сафронова. – DOI: 10.24411/0042-8833-2019-10059 // Вопросы питания. – 2019. – № 6. – С. 5–11.

13. Федоров, Д. С. Исследования по совершенствованию рецептуры рыбного паштета / Д. С. Федоров, Н. Ю. Ключко. – DOI: 10.46845/2541-8254-2024-5(47)-8-8. – Текст: электронный // Вестник молодежной науки: электронный научный журнал. – 2024. – № 5. – URL: <https://vestnikmolnauki.ru/wp-content/uploads/2025/02/8-Fedorov-Klyuchko.pdf> (дата обращения: 11.01.2026).

14. Галушина, П. С. Инулин-содержащее сырье при производстве продуктов питания / П. С. Галушина // Сельскохозяйственные науки: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 15 авг. 2022 г.) / АНО «НИИ ДПО». – Ростов-на-Дону: Изд-во: Научные решения, 2022. – С. 127–130.

15. Пребиотический потенциал полисахаридов из бурой водоросли *Fucus evanescens* и значение для клинического использования / Т. А. Кузнецова, Т. С. Запорожец, И. Д. Макаренкова [и др.] // Тихоокеанский медицинский журнал. – 2012. – № 1. – С. 37–40.

16. Микроструктурирование пищевых ингредиентов для обеспечения их биодоступности в составе пищевых систем / А. В. Паймулина, И. Ю. Потороко, Н. В. Наumenко, Е. Е. Наumenко. – DOI: 10.14529/food210102 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2021. – № 1. – С. 15–23.

References

1. Kolonchin, K. V. Possible ways to solve the problem of ensuring new requirements for the consumption of fish products / K. V. Kolonchin, S. N. Seregin, M. A. Gorbunova. – DOI: 10.36038/2307-3497-2022-187-170-179 // Trudy VNIRO. – 2022. – № 187. – P. 170–179.

2. Tsibizova, M. E. On the issue of obtaining fish pastes of increased biological value / M. E. Tsibizova. – DOI: 10.24143/2073-5529-2020-3-134-143 // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. – 2020. – № 3. – P. 134–143.

3. Fedorov, D. S. Analysis of the fish paste market in the Kaliningrad region and ways to increase their biological value / D. S. Fedorov, N. Y. Klyuchko. – DOI: 10.46845/2541-8254-2024-1(43)-15-15. – Text: electronic // Bulletin of Youth Science: Electronic resource. – 2024. – № 1. – URL: https://vestnikmolnauki.ru/wp-content/uploads/2024/03/Statya-15-Fedorov-D.-Klyuchko-1_red.pdf (date of treatment: 11.01.2026).

4. Tsibizova, M. E. The use of fish protein in a balanced diet / M. E. Tsibizova, N. D. Averyanova // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. – 2009. – № 1. – P. 166–169.

5. Zabegalova, G. N. Development of technology for culinary fish semi-finished products with high protein content / G. N. Zabegalova, A. L. Novokshanova, T. Yu. Burmagina. – DOI: 0.52231/2225-4269_2023_4_166 // Molochnokhozyaistvennyi vestnik. – 2023. – № 4. – P. 166–179.

6. Polyunsaturated fatty acids of the omega-3 family in products from Far Eastern fish / L. V. Shulgina, E. V. Yakush, T. A. Davletshina [et al.]. – DOI: 10.5281/zenodo.1115456 // Health. Medical ecology. Science. – 2017. – № 5. – P. 42–45.

7. Kornienko, N. L. Scientific substantiation and development of fish paste technology based on the rational use of navaga and rudd: autoabstract of a dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.18.04 / Kornienko Nadezhda Leonidovna: Far Eastern State Technical Fisheries University. – Vladivostok, 2021. – 24 p.
8. Creation of new delicatessen pasteurized canned fish with exotic fruits and olive oil / A. V. Demid, V. A. Grokhovsky, L. K. Kuranova, V. I. Volchenko. – DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-3-460-470 // Bulletin of the Murmansk State Technical University. – 2018. – № 3. – P. 460–470.
9. Guseva, L. B. Technology of pasteurized pastes of prolonged storage from Far Eastern fish / L. B. Guseva, N. L. Kornienko. – DOI: 10.48612/dalrybvtuz/2024-69-02 // Scientific papers of the Far Eastern State Technical Fisheries University. – 2024. – № 3. – P. 18–27.
10. Kupriy, A. S. Development of fish paste technology with functional ingredients: autoabstract of a dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 4.3.3 / Kupriy Anastasia Sergeevna: Russian State Agrarian University. – Moscow. – 2025. – 22 p.
11. Myshalov, Ya. D. Development of fish products with prebiotic properties / Ya. D. Myshalov, D. S. Fedorov, N. Y. Klyuchko. – DOI: 10.46845/2541-8254-2024-1(48)-8-8. – Text: electronic // Bulletin of Youth Science: electronic resource. – 2025. – № 1. – URL: https://vestnikmolnauki.ru/wp-content/uploads/2025/04/Statya-8-Myshalov-Fedorov_red.pdf (date of treatment: 11.01.2026).
12. Pyrieva, E. A. The role and place of dietary fiber in the structure of nutrition of the population / E. A. Pyrieva, A. I. Safronova. – DOI: 10.24411/0042-8833-2019-10059 // Nutrition issues. – 2019. – № 6. – P. 5–11.
13. Fedorov, D. S. Research on improving the formulation of fish paste / D. S. Fedorov, N. Y. Klyuchko. – DOI: 10.46845/2541-8254-2024-5 (47)-8-8 – Text: electronic // Bulletin of Youth Science: electronic resource. – 2024. – № 5. – URL: <https://vestnikmolnauki.ru/wp-content/uploads/2025/02/8-Fedorov-Klyuchko.pdf> (date of treatment: 11.01.2026).
14. Galushina, P. S. Inulin-containing raw materials in food production / P. S. Galushina // Agricultural sciences: materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference (Rostov-on-Don, Aug. 15, 2022) / ANO "Research Institute of Higher Professional Education". – Rostov-on-Don: Publishing House: Scientific Solutions. – 2022. – P. 127–130.
15. The prebiotic potential of polysaccharides from brown algae *Fucus evanescens* and their significance for clinical use / T. A. Kuznetsova, T. S. Zaporozhets, I. D. Makarenkova [et al.] // Pacific Medical Journal. – 2012. – № 1. – P. 37–40.
16. Microstructuring of food ingredients to ensure their bioavailability in food systems / A. V. Paimulina, I. Yu. Potoroko, N. V. Naumenko, E. E. Naumenko. – DOI: 10.14529/food210102 // Bulletin of the South Ural State University. – 2021. – № 1. – P. 15–23.

Информация об авторах

Д. С. Федоров – магистрант кафедры пищевой биотехнологии

Н. Ю. Ключко – кандидат технических наук, доцент кафедры пищевой биотехнологии

Information about the authors

D. S. Fedorov – Master degree student at the Department of Food Biotechnology
N. Yu. Klyuchko – Candidate of Technical sciences, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article
The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 17.03.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 16.04.2026.
The article was submitted 17.03.2026; approved after reviewing 12.03.2026; accepted for publication 16.04.2026.

СУДОСТРОЕНИЕ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 629.5.015.2
DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-101-113

Исследование интерференции корабельных волн асимметричного катамарана

Алексей Сергеевич Ариенчук^{1✉}, Евгений Андреевич Чуреев²

^{1, 2}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ aleksej.arienchuk@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0009-9413-6227>

² e.chureev@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3504-4957>

Аннотация. Работа посвящена решению задачи гидродинамической оптимизации пассажирского катамарана, проектируемого для организации паромной переправы в акватории Куршского залива с целью развития внутреннего туризма. Основное внимание уделено сравнительному анализу асимметричных конфигураций корпусов, известных как «IF» (с плоской внутренней стенкой) и «OF» (с плоской наружной стенкой), которые потенциально обеспечивают выигрыш в сопротивлении по сравнению с традиционными симметричными обводами. Теоретической основой проекта послужил анализ литературных источников, который выявил противоречивые данные о превосходстве той или иной асимметричной схемы, что обусловило необходимость экспериментального исследования. В качестве базовой была выбрана проверенная серия обводов Schwetz (M5-CH), обеспечивающая хорошие мореходные качества, на следующем этапе проведены модельные испытания в опытовом бассейне. Испытуемая масштабная модель (1:16) позволяла варьировать относительный поперечный клиренс ($s/L = 0,20; 0,30; 0,35$). Испытания двух конфигураций («IF» и «OF») выполнялись в диапазоне чисел Фруда, соответствующих скоростям 12–20 узлов для натурного судна. Ключевыми измеряемыми параметрами были буксировочное сопротивление и картина волнообразования, а основным критерием оценки – интерференционный коэффициент остаточного сопротивления. Результаты испытаний показали, что конфигурация «OF» с максимальным относительным поперечным клиренсом ($s/L = 0,35$) является оптимальной для целевого высокоскоростного режима (17–20 узлов). Данная схема продемонстрировала наименьшее остаточное сопротивление и наиболее благоприятную интерференцию волновых систем, что выразилось в практическом отсутствии заметного волнообразования во внутреннем пространстве между корпусами. Это свидетельствует о минимальном взаимном негативном влиянии корпусов. Таким образом, асимметричный катамаран с корпусами типа «OF» и максимальным поперечным клиренсом рекомендован для дальнейшего проектирования пассажирского парома для Куршского залива.

Ключевые слова: асимметричный катамаран, интерференция корабельных волн, модельные испытания.

Для цитирования: Ариенчук А. С., Чуреєв Е. А. Исследование интерференции корабельных волн асимметричного катамарана // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 101–113. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-101-113.

Original article

Study of the interference of ship waves of an asymmetric catamaran

Aleksey S. Arienchuk^{1✉}, Evgeniy A. Chureev²

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹aleksej.arienchuk@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0009-9413-6227>

²e.chureev@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3504-4957>

Abstract. The paper is devoted to solving the problem of hydrodynamic optimization of a passenger catamaran designed to organize a ferry crossing in the Curonian Lagoon in order to develop domestic tourism. The main attention is paid to the comparative analysis of asymmetric body configurations known as "IF" (with a flat inner wall) and "OF" (with a flat outer wall), which potentially provide a gain in resistance compared to traditional symmetrical contours. The theoretical basis of the project was the analysis of literature sources, which revealed contradictory data on the superiority of one or another asymmetric scheme, which necessitated an experimental study. The proven Schwetz series (M5-CH) was chosen as the base, providing good seaworthiness. At the next stage, model tests were conducted in an experimental pool. The scale model under test (1:16) made it possible to vary the relative transverse clearance ($s/L = 0.20; 0.30; 0.35$). The tests of two configurations ("IF" and "OF") were performed in the range of Froude numbers corresponding to speeds of 12–20 knots for a full-scale vessel. The key measured parameters were the towing resistance and wave pattern, and the main evaluation criterion was the interference coefficient of residual resistance. The test results showed that the "OF" configuration with the maximum relative lateral clearance ($s/L = 0.35$) is optimal for the target high-speed mode (17–20 knots). This scheme demonstrated the lowest residual resistance and the most favorable interference of wave systems, which resulted in the practical absence of noticeable wave formation in the internal space between the housings. This indicates a minimal mutual negative impact of the buildings. Thus, an asymmetric catamaran with "OF" type hulls and maximum transverse clearance is recommended for further design of a passenger ferry for the Curonian Lagoon.

Keywords: asymmetric catamaran, interference of ship waves, model tests.

For citation: Arienchuk A. S., Chureev E. A. Study of the interference of ship waves of an asymmetric catamaran. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):101–113. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-101-113.

ВВЕДЕНИЕ

Правительство Калининградской области заинтересовано в развитии внутреннего туризма, а также в том, чтобы сделать отдых на берегу Куршской косы как достопримечательности области доступным для жителей восточной части региона. Один из путей решения данной проблемы – создание пассажирской паромной переправы. Оценка целесообразности организации переправы была выполнена в [1].

Для пассажирских паромных переправ нередко используют суда типа катамаран. Катамараны чаще всего имеют симметричные (относительно диаметральной плоскости – ДП) ватерлинии, как и однокорпусные суда, однако в последнее время появились катамараны с асимметричными корпусами. Данное решение принимается в основном из соображений топливной экономичности.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В источнике [2] представлен анализ испытаний в опытовом бассейне моделей катамаранов с формой корпуса типов «плоский внутри» («IF») и «плоский снаружи» («OF»). В ходе испытаний регистрировались буксировочное сопротивление и высота волн, создаваемых при движении модели. Испытуемая модель катамарана представлена на рис. 1. Согласно приведенной информации, корпуса типа «IF» испытывались при трех различных поперечных клиренсах, а корпус типа «OF» – при одном значении поперечного клиренса.



Рис. 1. Модель катамарана
Fig. 1. Catamaran model

Из приведенных результатов испытаний следует, что лучшие (минимальные) значения буксировочного сопротивления выявлены у корпусов типа «IF» с наименьшим поперечным клиренсом.

В источнике [3] описывается проведение испытаний в опытовом бассейне катамарана с корпусами типов «OF», «IF» и симметричным корпусом, в качестве исходной использовалась модель Wigley. Проекция «корпус» данного судна представлена на рис. 2.

Катамаран с корпусом типа «OF» – это двухкорпусное судно, у которого внешние (бортовые) поверхности корпусов представляют собой практически вертикальные плоскости. Катамаран с корпусом типа «IF» – двухкорпусное судно, у которого внутренние (бортовые) поверхности корпусов также представляют собой практически вертикальные плоскости.

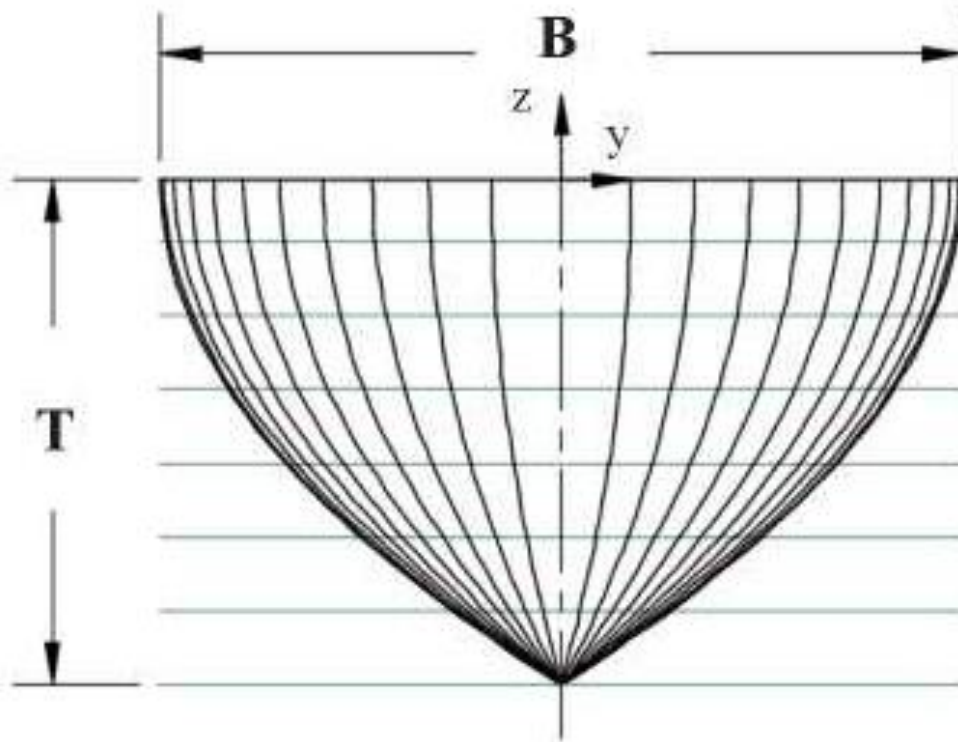


Рис. 2. Проекция «корпус» модели Wigley
Fig. 2. «Bodyplan» projection of Wigley model

Результаты исследований показывают, что корпус типа «IF» демонстрирует более низкое сопротивление как при низких, так и при высоких числах Фруда по сравнению с корпусом типа «OF», однако, различия в сопротивлении уменьшаются при увеличении расстояния между корпусами. Кроме того, обнаружено, что у корпуса типа «IF» при максимальном поперечном клиренсе почти отсутствуют корабельные волны, формирующиеся между корпусами судна, что свидетельствует о минимальном взаимном влиянии корпусов катамарана при данной конфигурации.

В источнике [4] представлены результаты исследований, проведенных путем расчетов численными методами гидродинамики (CFD) для корпусов с обводами типа «OF», «IF» и симметричных. Исходная форма корпуса судна основана на серии S-NPL с закругленной скулой, проекция «корпус» представлена на рис. 3. Форма корпуса типа «OF» показана на рис. 4, а корпус типа «IF» – на рис. 5. В табл. 1 приведены значения общего коэффициента сопротивления для трех типов корпусов при различных значениях относительного поперечного клиренса, отношение расстояния между корпусами (s) к длине судна по ватерлинии (L). В табл. 2 показаны значения относительной разницы между коэффициентами общего сопротивления судов типа «OF» и «IF» и соответствующим коэффициентом общего сопротивления симметричного судна.

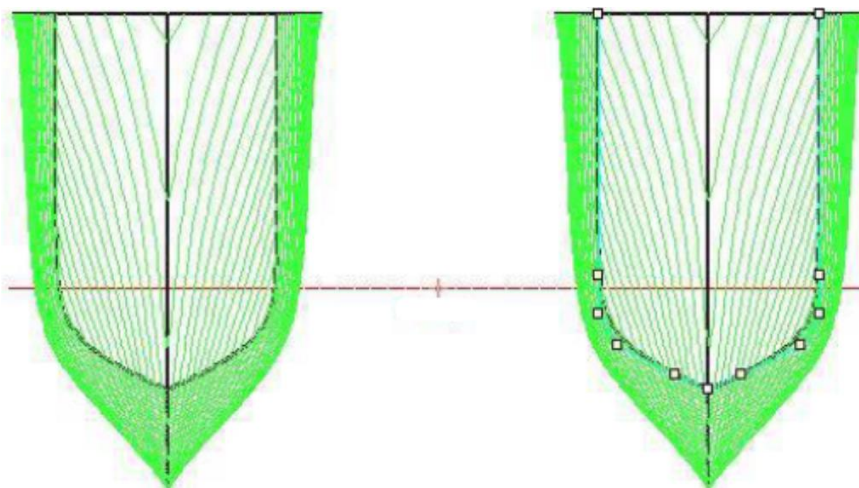


Рис. 3. Проекция «корпус» симметричного катамарана серии S-NPL
Fig. 3. «Bodyplan» projection of a symmetric catamaran

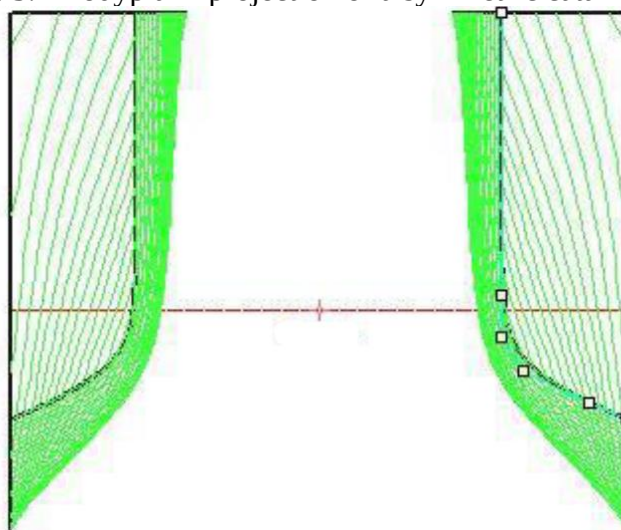


Рис. 4. Проекция «корпус» «OF»
Fig. 4. «Bodyplan» «OF» projection

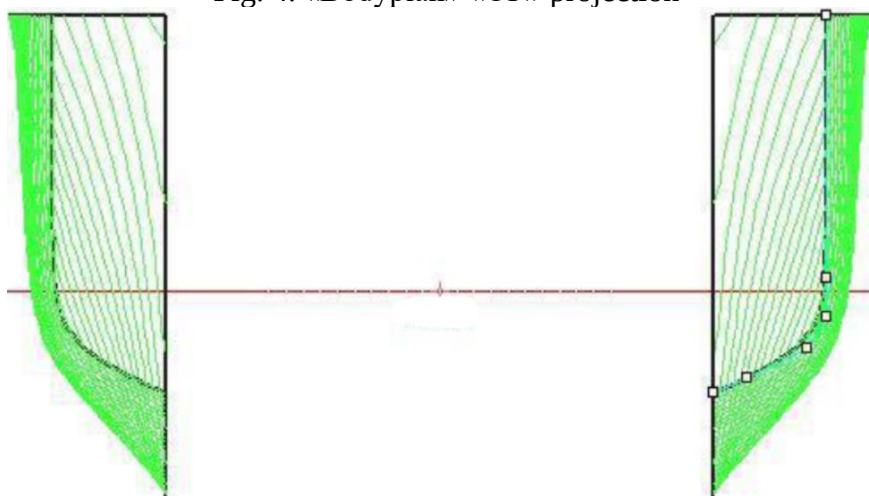


Рис. 5. Проекция «корпус» «IF»
Fig. 5. «Bodyplan» «IF» projection

Таблица 1. Значение коэффициента общего сопротивления катамаранов
Table 1. The value of the coefficient of total drag of catamarans

Fr	Коэффициент общего сопротивления судна в зависимости от числа Фруда при различных типах корпуса катамарана					
	s/L=0,3			s/L=0,4		
	Симметричный	«OF»	«IF»	Симметричный	«OF»	«IF»
0,25	8,190	7,511	7,272	8,403	7,900	7,655
0,30	8,508	8,17	7,89	8,800	8,357	8,068
0,60	9,636	10,211	9,489	9,83	10,313	9,603
0,80	7,476	7,988	7,766	7,570	8,022	7,559
1,00	6,109	6,876	6,769	6,455	7,042	6,831

Примечание: Fr – число Фруда; C_T – коэффициент общего сопротивления судна.

Таблица 2. Относительная разница коэффициентов общего сопротивления судна относительно коэффициента общего сопротивления симметричного судна
Table 2. The relative difference in the coefficients of the total resistance of a vessel relative to the coefficient of the total resistance of a symmetrical vessel

Fr	Относительная разница коэффициента общего сопротивления судна в зависимости от относительного поперечного клиренса			
	s/L=0,3		s/L=0,4	
	ΔC_T^{OF}	ΔC_T^{IF}	ΔC_T^{OF}	ΔC_T^{IF}
0,25	–8,29 %	–11,21 %	–5,99 %	–8,90 %
0,30	–3,97 %	–7,26 %	–5,03 %	–8,32 %
0,60	5,97 %	–1,53 %	4,91 %	–2,31 %
0,80	6,85 %	3,88 %	5,97 %	–0,15 %
1,00	12,56 %	10,80 %	9,09 %	5,82 %

Примечание: ΔC_T^{OF} – относительная разница между коэффициентом общего сопротивления для судна типа «OF», вычисляемая по формуле (1); ΔC_T^{IF} – относительная разница между коэффициентом общего сопротивления для судна типа «IF», вычисляемая по формуле (2).

$$\Delta C_T^{IF} = \frac{C_T^{OF} - C_T^{sym}}{C_T^{sym}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\Delta C_T^{IF} = \frac{C_T^{IF} - C_T^{sym}}{C_T^{sym}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где C_T^{sym} – коэффициент общего сопротивления симметричного судна.

Анализ вышеприведенных источников показывает, что за счет использования асимметричной формы корпуса судна-катамарана можно получить выигрыш по коэффициенту общего сопротивления порядка 10 %, однако однозначно определить оптимальную конфигурацию корпусов судна (типа «OF» или «IF») на данном этапе не представляется возможным. На основании вышеизложенного было принято решение о подготовке и проведении модельных испытаний асимметричного проектируемого катамарана с целью определения лучшей конфигурации корпусов с точки зрения гидродинамики.

ВЫБОР ФОРМЫ КОРПУСА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

В источнике [5] были проанализированы четыре наиболее распространенные формы корпуса, характерные для судов катамаранного типа и хорошо изученные в судостроительной практике. Результаты анализа показывают, что обводы типа Schwetz (плоско-килеватые) демонстрируют лучшие характеристики для пассажирских катамаранов по следующим причинам:

1. Обводы Schwetz обеспечивают баланс между сопротивлением воды и устойчивостью на волнении. Обводы снижают волновое сопротивление и улучшают ходовые качества судна, что подтверждается расчетами коэффициента волнового сопротивления C_w (формулы 2.50–2.53 [5]);

2. Результаты оптимизации, выполненные автором в исследовании, показали, что катамараны с данными обводами требуют меньшей мощности энергетической установки при заданной скорости, это снижает затраты на топливо и эксплуатацию (формулы 2.112, 2.119 [5]).

Таким образом, было принято решение об использовании обвода Schwetz в качестве исходного при проектировании пассажирского судна-катамарана и выбран корпус М5-СН из серии обводов Schwetz (рис. 6).

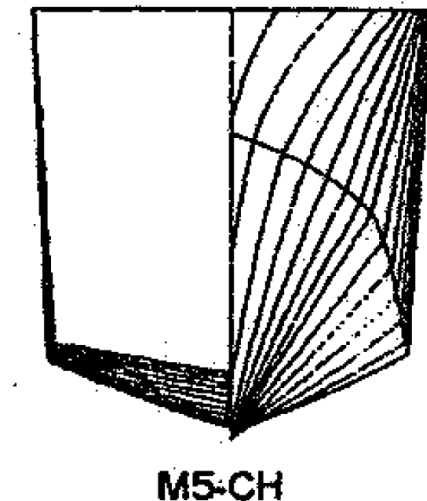


Рис. 6. Проекция «корпус» модели М5-СН
Fig. 6. «Bodyplan» projection of model M5-CN

На основании представленных обводов был разработан теоретический чертеж судна с асимметричными, разделенными по ДП корпуса, обводами. Проекция «корпус» испытуемой модели судна представлена на рис. 7, а геометрические характеристики модели приведены в табл. 2.

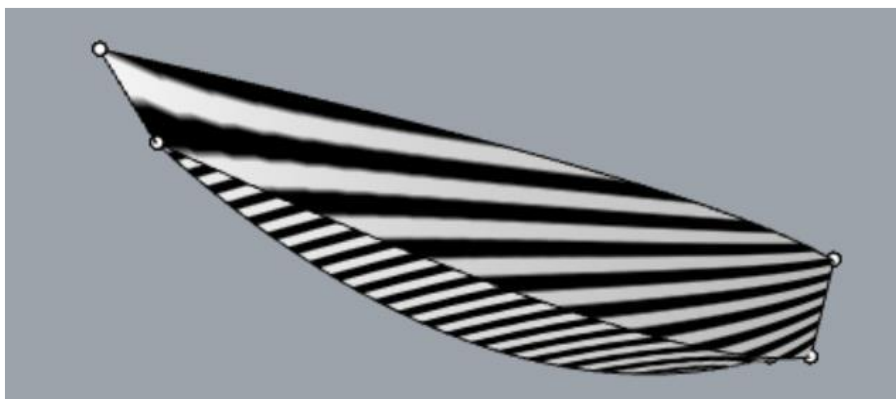


Рис. 7. 3D-модель судна
Fig. 7. 3D-model of a ship

Таблица 3. Геометрические характеристики испытываемой модели
Table 3. Geometric characteristics of the test model

Геометрические характеристики	Значение
Линейный масштаб модели	1/16
Длина по конструктивную ватерлинию, м	1,54
Длина между перпендикулярами, м	1,54
Ширина наибольшая по главной палубе одного корпуса, м	0,114
Ширина по конструктивной ватерлинии на миделе одного корпуса, м	0,093
Осадка по конструктивную ватерлинию на миделе, м	0,090
Высота борта на миделе, м	0,169
Теоретическая шпация, м	0,154
Коэффициент полноты площади мидель-шпангоута	0,753
Коэффициент полноты площади ватерлинии	0,772
Коэффициент общей полноты	0,478

Модель изготовлена с учетом возможности изменения горизонтального клиренса в диапазоне от 308 до 539 мм, что составляет s/L от 0,20 до 0,35. Данный диапазон выбран исходя из условий того, что натурное судно будет проходить под Орлиным мостом в г. Полесске, ширина которого между опорами 13,2 м; в случае, если судно будет иметь $s/L=0,35$, то его ширина составит 11,6 м. Значение $s/L=0,20$ является стандартным при проведении испытаний судов такого типа.

ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводились в лаборатории мореходных качеств судов Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники (НОЦ СМИТ) ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» по соответствующим утвержденным методикам проведения буксировочных испытаний.

Размеры опытового бассейна 50 м × 7 м × 4 м (длина, ширина и глубина), скорость движения модели во время испытаний может достигать 2,7 м/с.

Диапазон скоростей для проектируемого судна определен до 20 узлов, что составляет $Fr=0,661$. Поскольку модель судна небольшая, в водоизмещающем режиме абсолютные значения сопротивления будут в районе погрешности измерительного оборудования. Следовательно, было принято решение ограничить проведение модельных испытаний в диапазоне от 12 до 20 узлов натурального судна. С учетом обеспечения равенства чисел Фруда скорости испытаний модели были от 1,542 до 2,57 м/с с шагом 0,129 м/с, каждая из двух конфигураций корпусов испытана при трех различных относительных поперечных клиренсах (0,20; 0,30 и 0,35).

Испытания проводились в одном случае нагрузки судна – посадка на ровный киль по конструктивной ватерлинии, определенной на первом этапе проектирования судна. В процессе испытаний регистрировалось буксировочное сопротивление, а также фото и видеосъемка системы корабельных волн, образующихся в процессе движения модели судна.

Оценка эффективности использования той или иной конфигурации корпусов катамарана производится по интерференционному коэффициенту (3). Если значение данного коэффициента меньше нуля, то это свидетельствует о том, что на рассматриваемой скорости интерференция корабельных волн положительно сказывается на сопротивлении судна.

$$I_F = \frac{C_R^{cat} - C_R^{mon}}{C_R^{mon}}, \quad (3)$$

где C_R^{cat} – коэффициент остаточного сопротивления катамарана; C_R^{mon} – коэффициент остаточного сопротивления одного корпуса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обработки данных модельных испытаний представлены на рис. 8, 9. В легенде рисунков «IF» обозначает корпус асимметричного катамарана с плоскими стенками внутри, «OF» – корпус асимметричного катамарана с плоскими стенками наружу, «S/L» – поперечный клиренс катамарана. Коэффициенты сопротивления модели катамаранов представлены в табл. 3. В табл. 4 приведены значения интерференционного коэффициента, в таблице 5 – относительная разница между интерференционным коэффициентом «OF» и «IF». Относительная разница вычисляется по формуле (4). Рассматривается диапазон чисел Фруда от 0,562 до 0,661, что соответствует скоростям от 17 до 20 узлов натурального судна. Выбор данного диапазона скоростей обоснован в источнике [1].

$$\Delta I_F = \frac{I_F^{OF} - I_F^{IF}}{I_F^{IF}} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где I_F^{OF} – интерференционный коэффициент для корпуса типа «OF», I_F^{IF} – интерференционный коэффициент для корпуса типа «IF».

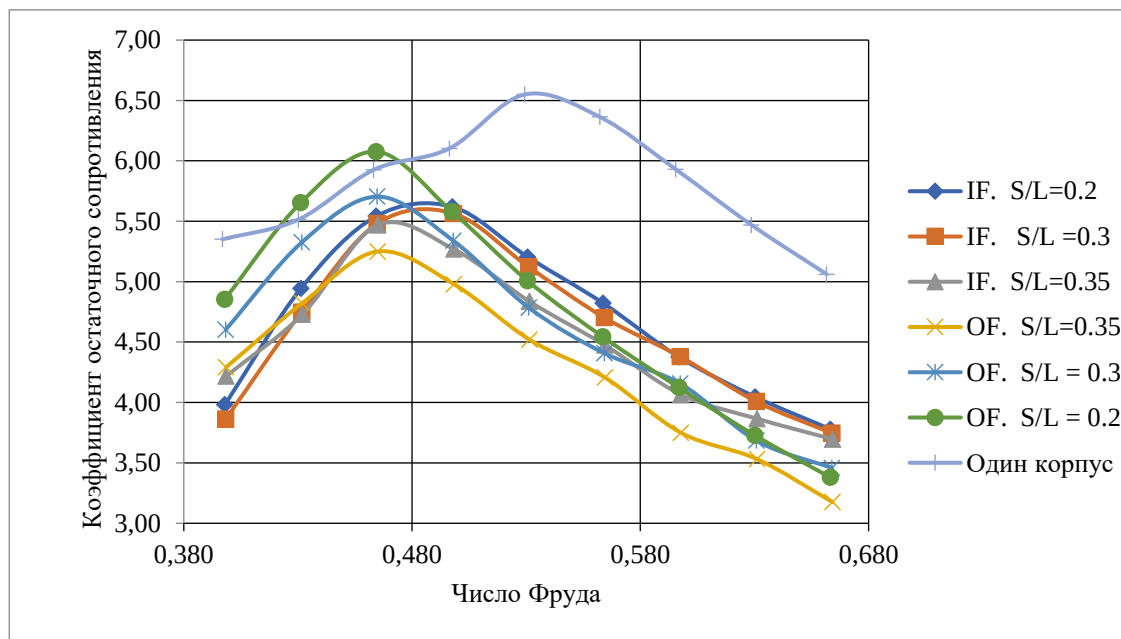


Рис. 8. Кривые изменения коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда

Fig. 8. Curves of the change in the coefficient of residual resistance from the Froude number

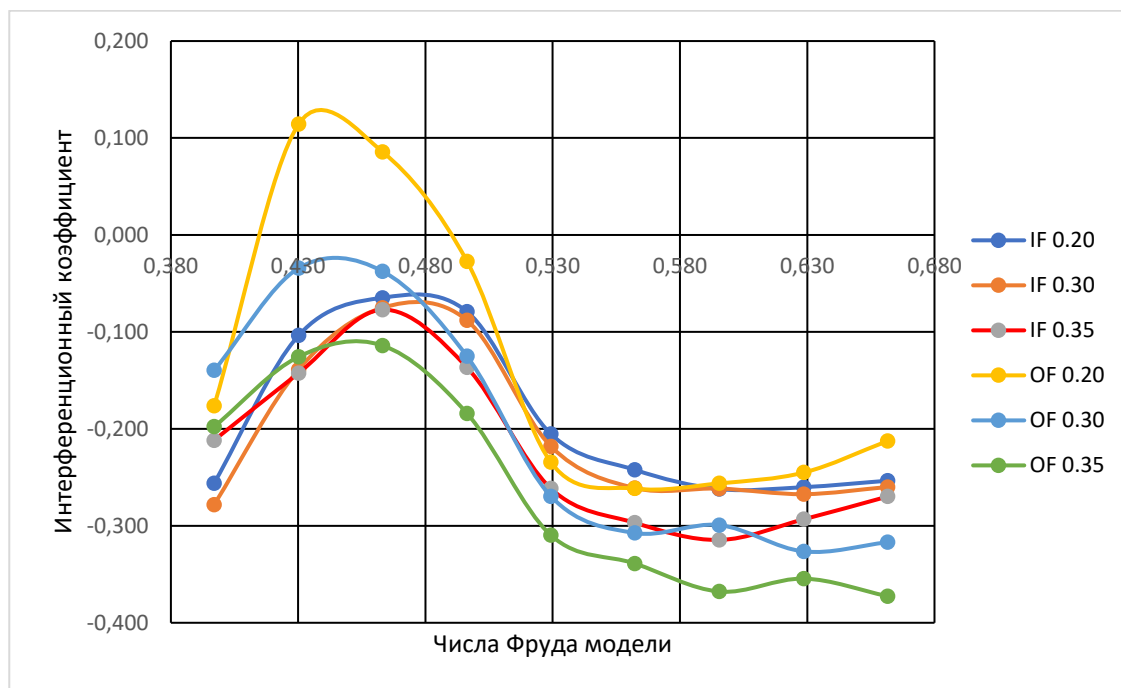


Рис. 9. Кривые изменения интерференционного коэффициента от числа Фруда модели

Fig. 9. Curves of the change in the interference coefficient from the Froude number of the model

Таблица 4. Значения остаточного коэффициента сопротивления катамаранов
Table 4. The values of the residual drag coefficient of catamarans

Варьируемая характеристика	Величина					
Число Фруда/скорость натурального судна, узел	Остаточный коэффициент для различных типов корпусов в зависимости от относительного поперечного клиренса					
	OF			IF		
	s/L=0,2	s/L=0,3	s/L=0,35	s/L=0,2	s/L=0,3	s/L=0,35
0,397 (12)	4,855	4,603	4,292	3,981	3,862	4,218
0,430 (13)	5,653	5,325	4,822	4,943	4,749	4,728
0,463 (14)	6,077	5,704	5,250	5,542	5,481	5,469
0,496 (15)	5,579	5,339	4,980	5,620	5,565	5,269
0,529 (16)	5,008	4,784	4,521	5,205	5,121	4,837
0,562 (17)	4,543	4,408	4,207	4,822	4,703	4,475
0,595 (18)	4,124	4,156	3,749	4,376	4,379	4,065
0,628 (19)	3,728	3,684	3,531	4,047	4,007	3,866
0,661 (20)	3,380	3,457	3,716	3,779	3,746	3,696

Таблица 5. Значения интерференционного коэффициента
Table 5. The values of the interference coefficient

Варьируемая характеристика	Величина					
Число Фруда/скорость натурального судна, уз.	Интерференционный коэффициент для различных типов корпусов в зависимости от относительного поперечного клиренса					
	OF			IF		
	s/L=0,2	s/L=0,3	s/L=0,35	s/L=0,2	s/L=0,3	s/L=0,35
0,397 (12)	-0,176	-0,140	-0,198	-0,256	-0,278	-0,212
0,430 (13)	0,114	-0,034	-0,126	-0,104	-0,139	-0,142
0,463 (14)	0,086	-0,037	-0,114	-0,065	-0,075	-0,077
0,496 (15)	-0,027	-0,125	-0,184	-0,079	-0,088	-0,137
0,529 (16)	-0,234	-0,270	-0,310	-0,205	-0,218	-0,262
0,562 (17)	-0,262	-0,307	-0,339	-0,242	-0,261	-0,297
0,595 (18)	-0,256	-0,299	-0,368	-0,262	-0,262	-0,315
0,628 (19)	-0,245	-0,326	-0,354	-0,260	-0,267	-0,293
0,661 (20)	-0,212	-0,317	-0,373	-0,253	-0,260	-0,270

Таблица 6. Относительная разница между интерференционными коэффициентами корпусов «OF» и «IF»

Table 6. The relative difference between the interference coefficients of the "OF" and "IF" hull

Варьируемая характеристика	Величина		
Число Фруда/скорость натурного судна, уз.	Относительное изменение интерференционного коэффициента от относительного поперечного клиренса		
	s/L=0,2	s/L=0,3	s/L=0,35
0,562 (17)	8,26 %	17,62 %	14,14 %
0,595 (18)	–2,29 %	14,12 %	16,83 %
0,628 (19)	–5,77 %	22,10 %	20,82 %
0,661 (20)	–16,21 %	21,92 %	38,15 %

Обработка данных модельных испытаний показывает, что наименьшее сопротивление обеспечивает конфигурация с максимальным расстоянием между корпусами. Корпус с плоскими стенками наружу, с наибольшим поперечным клиренсом дает наименьшее сопротивление. Для данной конфигурации наблюдается и наиболее благоприятная с гидродинамической точки зрения интерференция волн по сравнению с другими рассмотренными корпусами. Этот корпус был принят в качестве исходных данных для дальнейшей разработки проекта судна.

Список источников

1. Ариенчук, А. С. Оценка целесообразности проектирования пассажирского катамарана для района Куршского залива / А. С. Ариенчук, Е. А. Чуреев // Кораблестроение: материалы Национал. науч.-техн. конф. студентов и курсантов «Дни науки» (Калининград, 14–25 апреля 2025 г.) / Калининградский государственный технический университет. – С. 254–259.
2. Ikezoe, S. Experimental study on seakeeping performance of a catamaran with asymmetric demi-hulls / S. Ikezoe, N. Hirata, H. Yasukawa. – DOI: 10.11113/jt.v66.2494// Jurnal Teknologi. – 2014. – Vol. 66, № 2. – P. 107–111.
3. Zaraphonitis, G. Numerical and experimental study on the wave resistance of fast displacement asymmetric catamarans / G. Zaraphonitis, D. Spanos, A. Papanikolaou // High-Speed Craft: International Conference on High-Performance Marine Vehicles (Hamburg, 2–5 may 2001 г.) / National Technical University of Athens. – Hamburg: Publishing house HIPER, 2001. – P. 250–263.
4. Asapana, S. Resistance Prediction for Asymmetrical Configurations of High-Speed Catamaran Hull Forms: Master of Science thesis / S. Asapana. – Florida: Institute of Technology, 2015. – 82 p.
5. Ха Ван Зуи. Методика проектирования пассажирских катамаранов для Социалистической Республики Вьетнам: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.08.03 / Ха Ван Зуи: Дальневост. фед. ун-т. – Владивосток, 2021. – 180 с.

References

1. Arienchuk, A. S. Assessment of the feasibility of designing a passenger catamaran for the Curonian Lagoon area / A. S. Arienchuk, E. A. Chureev // Shipbuilding: proceedings of the National Scientific and Technical Conference of Students and cadets "Days of Science" (Kaliningrad, April 14–25, 2025) / Kaliningrad State Technical University. – P. 254–259.
2. Ikezoe, S. Experimental study on seakeeping performance of a catamaran with asymmetric demi-hulls / S. Ikezoe, N. Hirata, H. Yasukawa // Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). – 2014. – Vol. 66, № 2. – P. 107–111.
3. Zaraphonitis, G. Numerical and experimental study on the wave resistance of fast displacement asymmetric catamarans / G. Zaraphonitis, D. Spanos, A. Papanikolaou // High-Speed Craft: International Conference on High-Performance Marine Vehicles (Hamburg, 2–5 may 2001 г.) / National Technical University of Athens. – Hamburg: Publishing house HIPER, 2001. – P. 250–263.
4. Asapana, S. Resistance Prediction for Asymmetrical Configurations of High-Speed Catamaran Hull Forms: Master of Science thesis / S. Asapana. – Florida: Institute of Technology, 2015. – 82 p.
5. Kha Van Zui. Methodology for designing passenger catamarans for the Socialist Republic of Vietnam: Cand. of tech. sci. diss.: 05.08.03 / Kha Van Zui: Far Eastern Federal University. – Vladivostok, 2021. – 180 p.

Информация об авторах

А. С. Ариенчук – магистрант 2-года обучения

Е. А. Чуреев – кандидат технических наук, директор Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники

Information about the authors

A. S. Arienchuk – 2nd year Master degree student

E. A. Chureev – Candidate of Technical sciences, Director of the Scientific and Educational Center for Shipbuilding, Marine Infrastructure and Technology

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 26.12.2025; одобрена после рецензирования 13.01.2026; принята к публикации 18.02.2026.

The article was submitted 26.12.2025; approved after reviewing 13.01.2026; accepted for publication 18.02.2026.

Научная статья
УДК 543.429.23
DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-114-128

**Исследование стабильности водотопливной эмульсии
для дизельного двигателя**

**Оксана Владимировна Сынашенко¹✉, Николай Яковлевич Синявский²,
Наталья Анатольевна Кострикова³**

^{1,2,3} Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

¹oksanasynashenko@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Аннотация. Известно, что водотопливные эмульсии, используемые в дизельных двигателях, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными дизельными топливами, что существенно влияет на эффективность и экологичность работы двигателей. Использование водотопливных эмульсий может быть связано с рядом проблем, касающихся их стабильности, таких как разделение фаз, коалесценция и осаждение, качество компонентов и др. Данные вопросы побуждают исследователей подробно изучать свойства водотопливных эмульсий и совершенствовать методы их получения. В работе приводятся результаты исследования стабильности водотопливных эмульсий с помощью фотонной корреляционной спектроскопии и кинетики изменения времен спин-спиновой релаксации ЯМР T_2 в процессе седиментации капель воды эмульсии на примере системы «дизельное топливо Euro C + вода». Показано, что с течением времени может наблюдаться переход одномодального распределения гидродинамических радиусов капель воды в бимодальное. Это объясняется резким ростом агрегации капель и ослаблением этого процесса эмульгатором, концентрация которого в области рассеяния луча уменьшается. Измеренные времена релаксации ЯМР T_2 с помощью программы Niumag NMR Data Analysis Software V1.1 (Pore size distribution) позволили определить распределение размеров капель воды в эмульсии альтернативным методом. Установлено, что более длинный процесс расслаивания эмульсии наблюдается в образцах с большим временем эмульгирования. Эмульсия, полученная без эмульгатора, очень неустойчива из-за сильной коалесценции и быстро расслаивается. Для создания устойчивой мелкодисперсной эмульсии необходимо, главным образом, длительное взбивание смеси в присутствии эмульгатора. Представленные в данной работе результаты могут быть полезны для дисперсионного анализа любых органических эмульсий, содержащих микроразмерные капли несмешиваемой жидкости.

Ключевые слова: судовые дизельные топлива, водотопливные эмульсии, динамическое рассеяние света, ЯМР-релаксометрия.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Федерального агентства по рыболовству, рег. № 226020326858–4.

Для цитирования: Сынашенко О. В., Синявский Н. Я., Кострикова Н. А. Исследование стабильности водотопливной эмульсии для дизельного двигателя // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 114–128. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-114-128.

Original article

Study of the stability of water-fuel emulsion for diesel engine

Oksana V. Synashenko^{1✉}, Nikolay Ya. Sinyavskiy², Natal'ya A. Kostrikova³

^{1,2,3} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹oksanasynashenko@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0009-0004-3149-0345>

²nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Abstract. It is known that water-fuel emulsions used in diesel engines have a number of advantages over traditional diesel fuels, which significantly affects the efficiency and environmental performance of the engines. The use of water-fuel emulsions can be associated with several problems related to their stability, such as phase separation, coalescence, and sedimentation, as well as the quality of the components and others. These issues encourage researchers to thoroughly study the properties of water-fuel emulsions and improve methods for their production. This paper presents the results of a study of the stability of water-fuel emulsions using photon correlation spectroscopy and the kinetics of changes in T_2 NMR relaxation times during the sedimentation of emulsion water droplets using the example of a Euro C diesel fuel + water system. It is shown that over time, a transition from a unimodal distribution of water droplet hydrodynamic radii to a bimodal distribution can be observed. This is explained by a sharp increase in droplet aggregation and the weakening of this process by the emulsifier, the concentration of which decreases in the beam scattering region. NMR T_2 relaxation times measured using Niumag NMR Data Analysis Software V1.1 (Pore Size Distribution) made it possible to determine the size distribution of water droplets in the emulsion using an alternative method. A longer emulsion separation process was found in samples with a longer emulsification time. An emulsion obtained without an emulsifier is very unstable due to strong coalescence and quickly separates. Prolonged whisking is essential for obtaining a stable, finely dispersed emulsion. The optimal emulsifier amount is no more than 1%. The results obtained in this study can be useful for dispersion analysis of any organic emulsions containing microscopic droplets of immiscible liquid.

Keywords: marine engine fuels, water-fuel emulsion, dynamic light scattering, NMR-relaxometry.

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Fisheries Agency, reg. N 226020326858–4.

For citation: Synashenko O. V., Sinyavsky N. Ya., Kostrikova N. A. Study of the stability of water-fuel emulsion for diesel engine. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):114–128. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-114-128.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на свои преимущества, дизельные двигатели являются одними из основных источников загрязнения окружающей среды, при этом выбрасываются загрязняющие вещества – твердые частицы, черный дым, оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x), несгоревшие углеводороды, оксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO_2).

Использование эмульсионных топлив имеет множество преимуществ, основное из которых – полное сгорание, что приводит к лучшей экономии топлива и чистому сгоранию топлива с меньшими выбросами. Водно-дизельная эмульсия – это альтернативное топливо для дизельных двигателей, которое может использоваться с существующей конфигурацией двигателя без дополнительной модернизации. Она обладает преимуществами одновременного снижения вредных выбросов и твердых частиц, а также способствует повышению эффективности сгорания, хотя это требует дальнейшего исследования.

В настоящее время важными задачами являются энергосбережение и обеспечение экологической безопасности при эксплуатации энергетических установок. В этом контексте водотопливные эмульсии (ВТЭ), т. е. смеси воды с мазутом, дизельным топливом, бензином и угольной пылью, представляют собой интересное решение для достижения этих целей [1–9]. Основные факторы для ВТЭ – содержание дисперсной фазы (вода, распределение капель воды по размерам (фракционность) и ее стабильность). Эти показатели зависят от способа приготовления эмульсий. Стабильность эмульсии состоит в постоянстве дисперсного состояния (размера капель) и способности капель не осаждаться и не соединяться.

Сложность использования воды в сочетании с легким топливом, таким как дизельное топливо (ДТ), обусловлена двумя факторами. Во-первых, это две несмешивающиеся жидкости, а во-вторых, в легких топливах отсутствуют естественные эмульгаторы, в отличие от тяжелых топлив (котельного и мазутного), в составе которых есть асфальтены и нефтяные смолы – природные поверхностно-активные вещества (ПАВ), обеспечивающие стабильность ВТЭ. Таким образом, для эмульсий типа «ДТ–вода» дополнительно применяют эмульгаторы, выполняющие функции снижения межфазного натяжения между двумя жидкостями и стабилизации дисперсной фазы для предотвращения расслоения эмульсии [3].

Об эффективности использования эмульгированного топлива свидетельствует изменение параметров процесса горения: в результате микровзрывов капель эмульсии в высокотемпературной камере сгорания факел увеличивается в объеме, равномерно заполняет камеру, что способствует выравниванию температурного поля цилиндровой втулки, увеличению средней температуры в камере сгорания и снижению недожога топлива [2]. Влияние свойств ВТЭ на состав выхлопных газов анализируется авторами работ [8] и [9].

Дорохов А. Ф., Патров Ф. В. и Кабылбекова В. В. в [4] обсуждают возможность оценки воспламеняемости топлива по значению расчетного углеродно-ароматического индекса (ССАИ) топлива. Авторами [4] обнаружена тенденция к улучшению воспламеняемости топлива вследствие изменения влагосодержания ВТЭ. Было показано, что эмульгированное топливо улучшает процессы смесеобразования и горения, позволяя на 15–25 % форсировать двигатель при сохранении его

экономичности и дымности, без заметного изменения динамических характеристик.

Многочисленные исследования показали, что стабильность эмульсии в значительной степени зависит от различных параметров обработки, типа и концентрации поверхностно-активного вещества, температуры, скорости перемешивания, времени перемешивания и др. Установлено, что увеличение скорости и продолжительности перемешивания может привести к уменьшению среднего размера частиц эмульсии и улучшению ее стабильности. Увеличение концентрации поверхностно-активного вещества, времени и скорости перемешивания, а также температуры приводит к улучшению стабильности эмульсии. Относительно высокая стабильность эмульсий при меньших размерах капель объясняется термодинамически невыгодным расслоением, или седиментацией, между мелкими каплями из-за молекулярного отталкивания.

В [10] на основе метода многократного рассеяния света изучалось влияние параметров процесса на значение индекса стабильности, также исследовалась взаимосвязь между стабильностью эмульсии и размером капель. Результаты показали, что дестабилизация эмульгированного дизельного топлива связана с гравитационной миграцией и увеличением размера капель.

В обзоре [11] рассматриваются типы эмульсий, явление микровзрыва, стабильность эмульсии и улучшение ее физико-химических свойств, а также влияние содержания воды на сгорание и выбросы топлива. В данном обзоре установлено, что топливный насос высокого давления и распылительная форсунка являются наиболее важными компонентами с точки зрения вторичного распыления, предложено сосредоточиться на дальнейшем исследовании влияния этих компонентов на микровзрыв эмульсии.

В [12] для решения проблем долговременной стабильности были разработаны методы получения эмульсии «вода в дизельном топливе без использования поверхностно-активных веществ». Метод основан на впрыскивании водяного пара в холодную порцию дизельного топлива и образовании эмульсии.

В исследовании [13] были получены наноэмульсии типа «вода в дизельном топливе с различными концентрациями поверхностно-активных веществ и воды». Размер капель наноэмульсий определяли методом динамического рассеяния света, а стабильность наноэмульсии оценивали путем измерения изменения размера капель в зависимости от времени. Результаты показали, что размер капель увеличивается с увеличением содержания воды, но, как правило, уменьшается с увеличением содержания поверхностно-активного вещества. При краткосрочном исследовании физической стабильности расслоения фаз не наблюдалось.

В публикации [14] показано, что в методе динамического рассеяния света (ДРС) при малых концентрациях частиц в растворе в распределении по размерам появляется артефактный пик, не соответствующий реально существующим частицам и обусловленный пересечением отдельными частицами границ объема рассеяния.

Целью работы [15] явилось исследование ряда свежих и отработанных масел методом ДРС для определения изменений, происходящих с маслом в процессе эксплуатации судового дизеля, и выяснения связи этих изменений с неисправностями двигателя. Установлено, что распределения гидродинамических радиусов частиц для свежих и отработанных масел существенно различаются. По характеру

распределений крупных частиц установлено, что в отработанных маслах понижается уровень агрегации, или мицеллообразования, полимера-модификатора вязкости.

В работе [16] описывается новый метод определения поверхностной релаксационности протонов на границе раздела «вода–топливо», основанный на кинетике седиментации частиц воды в поле силы тяжести и времени поперечной релаксации ЯМР-ядер ^1H в каплях воды эмульсии. Исследована кинетика изменения времен релаксации T_2 в процессе седиментации капель воды эмульсии. Для получения распределения частиц воды по размерам выполнялись преобразования массива данных $T_2(t)$. Возможности предлагаемого метода для высокодисперсных эмульсий «вода–топливо» ограничены очень медленным оседанием малоразмерных капель воды в гравитационном поле.

Анализ литературы свидетельствует об актуальности вышеперечисленных исследований как для определения стабильности топливных эмульсий, так и для энергосбережения и обеспечения экологической безопасности при эксплуатации энергетических установок.

Целью настоящей работы явилось исследование динамики деэмульгации водо-топливной смеси для дизельного двигателя и установление факторов, влияющих на стабильность эмульсии.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования стабильности эмульсий и измерения динамики изменения размеров капель воды в диапазоне нанометров использовался метод фотонной корреляционной спектроскопии. Для этой цели служил измеритель размера частиц Photocor Compact с погрешностью определения гидродинамических радиусов не более 10 %. Длина волны применяемого лазера составляла 638 нм, угол рассеяния – 90° , использованы стандартные прямоугольные кюветы. Измерения выполнялись при комнатной температуре.

Для приготовления образцов (эмульсий типа «ДТ–вода») применялись дизельное топливо Euro C и дистиллированная вода с массовым содержанием от 5 до 20 %, эмульгатором являлось поверхностно-активное вещество – моющее средство Ludwik. Процесс эмульгирования осуществлялся с применением минимиксера и занимал от 15 до 45 мин.

Для измерений средних эффективных радиусов капель воды в эмульсии как альтернатива использовались также методы седиментации и распределения времен ЯМР-релаксации T_2 [16]. Для этой цели служил ЯМР-релаксометр PQ001 Niumag Corporation Petroleum с магнитом 0,5 Тл, программное обеспечение релаксометра NMRAS (NMR Analyzing System Ver4.0) и программа Q-CPMG для определения времен релаксации T_2 . Инверсия спада сигнала намагниченности выполнялась с помощью алгоритма SIRT (Simultaneous Iterative Reconstructive Technique). Для инверсии T_2 при определении распределения размеров капель воды в эмульсии применялся метод BRD (Butler-Reeds-Dawson) с соответствующим параметром регуляризации α . Все эксперименты выполнялись при температуре 32°C (температура стабилизации магнитного поля ЯМР-релаксометра).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теоретически описание зависимости гидродинамического радиуса капель воды в эмульсии является достаточно сложной задачей, объединяющей коллоидную динамику и седиментацию. Идут два основных физических процесса:

1. Коалесценция капель воды, когда капли сталкиваются и сливаются, уменьшая общее количество капель и увеличивая их средний размер;
2. Седиментация в гравитационном поле, которая приводит к тому, что более крупные капли оседают быстрее. В результате увеличивается локальная концентрация капель у дна кюветы и эмульсия расслаивается.

Агрегация стремится увеличить размер, а гравитация «отсеивает» крупные частицы, заставляя мелкие дольше оставаться в объеме, что приводит к увеличению среднего радиуса и уменьшению концентрации крупных капель. Изменение среднего радиуса (r_h) можно разделить на 3 фазы:

1. Начальная фаза, когда r_h быстро увеличивается из-за агрегации крупных капель, которые тут же начинают оседать;
2. Промежуточная фаза, при которой радиус r_h продолжает расти, но темп роста замедляется; крупные капли уходят, мелкие – слипаются;
3. Конечная фаза, когда r_h стабилизируется или даже немного уменьшается, остается мало материала для агрегации, процесс седиментации «вычищает» систему, оставляя только мелкие, долгоживущие капли, количество которых сокращается.

На рис. 1 показано изменение во времени интенсивности рассеяния с образцом эмульсии типа «ДТ Euro C + 20 % H_2O + 0,4 % эмульгатора». Измерение радиусов капель воды в зависимости от времени выполнялось после эмульгирования мини-миксером в течение 30 мин. Изменения гидродинамических радиусов со временем иллюстрирует рис. 2. На начальном этапе при распределении наблюдается один пик, радиус капель растет за счет коалесценции от 0,3 до 1,0 мкм. Затем наблюдается второй пик, с радиусом капель около 200 мкм, обусловленный, по-видимому, резким ростом агрегации капель из-за ослабления этого процесса эмульгатором, концентрация которого в области рассеяния уменьшается. Плотность эмульгатора незначительно больше плотности воды, и процесс седиментации «вычищает» образец от эмульгатора. Радиус, соответствующий второму пику, со временем уменьшается и через 2 ч стабилизируется на уровне 20–39 мкм. Это объясняется недостатком материала для агрегации.

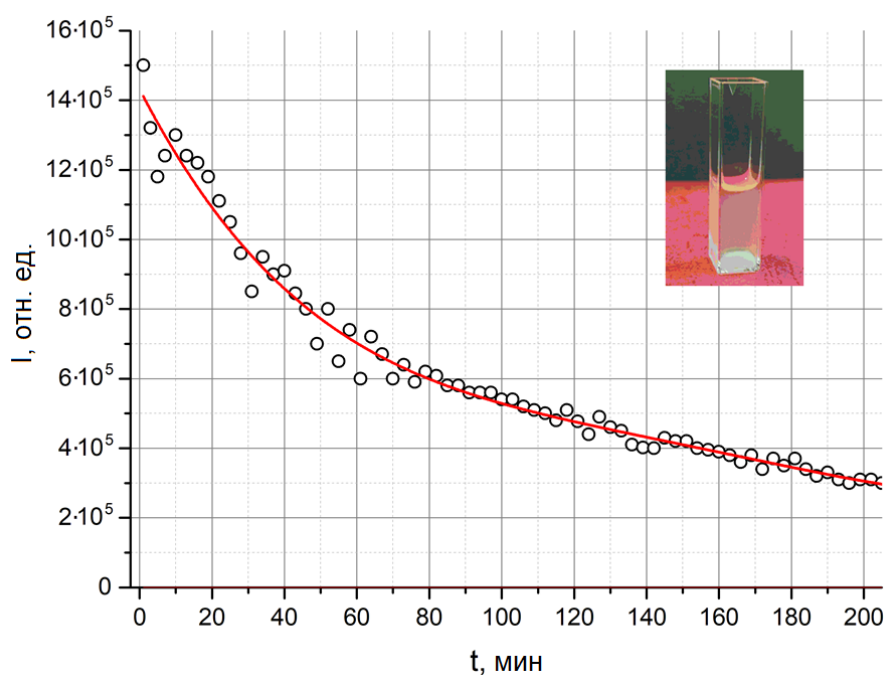


Рис. 1. Изменение интенсивности рассеяния света эмульсией типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 0,4 % эмульгатора»
 Fig. 1. Changing the intensity of light scattering by an emulsion diesel fuel Euro C + 20 % H₂O + 0.4 % emulsifier

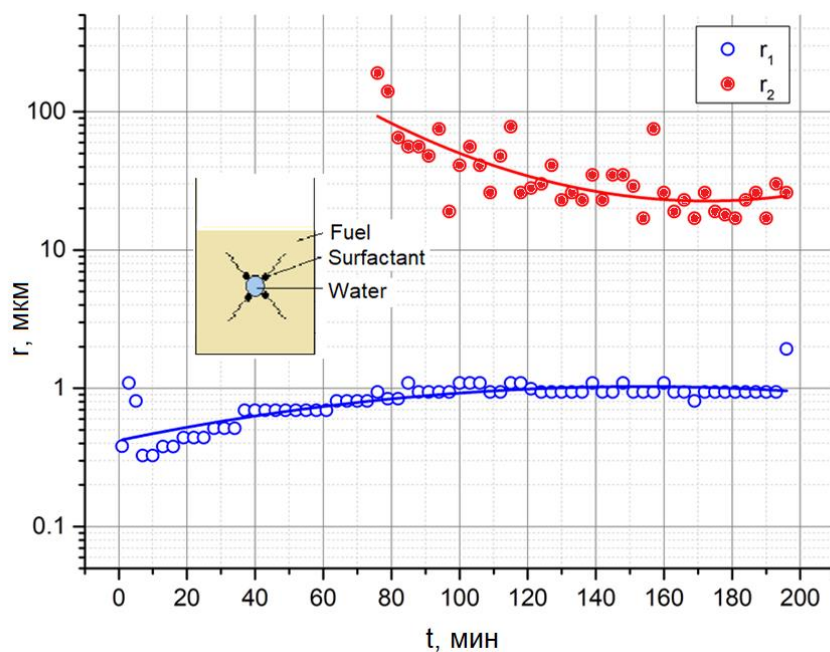


Рис. 2. Изменение распределения гидродинамических радиусов капель воды со временем в эмульсии типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 0,4 % эмульгатора»
 Fig. 2. Change in the distribution of hydrodynamic radii of water droplets over time in the emulsion diesel fuel Euro C + 20 % H₂O + 0.4 % emulsifier

Момент времени, когда одномодальное распределение гидродинамических радиусов становится бимодальным, иллюстрирует рис. 3.

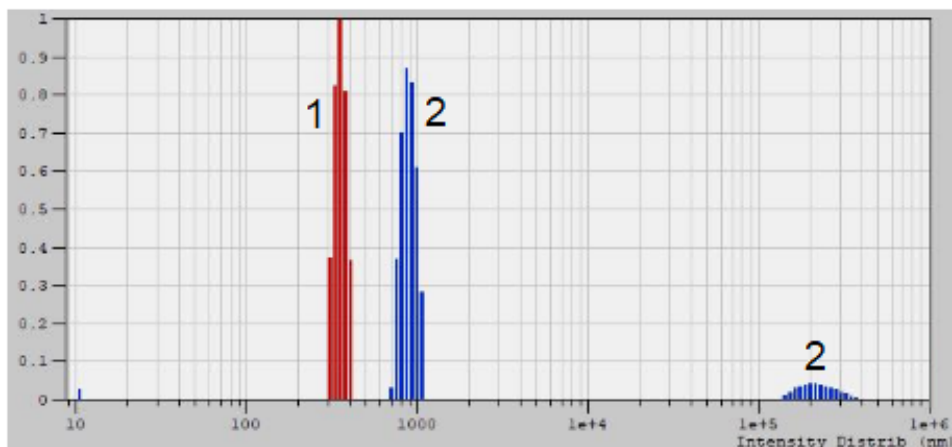


Рис. 3. Распределения размеров частиц воды в эмульсии типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 0,4 % ПАВ» ($t_{\text{mix}} = 30$ мин) при $t=1$ мин, $r_1=351$ нм (1) и при $t=76$ мин, $r_1=861$ нм и $r_2=200$ мкм (2)

Fig. 3. Distributed particle size of water in the emulsion diesel fuel Euro C + 20 % H₂O + 0.4 % surfactant ($t_{\text{mix}} = 30$ min) at $t=1$ min, $r_1=351$ nm (1) and at $t=76$ min, $r_1=861$ nm and $r_2=200$ mcm (2)

Взбивание миксером дизельного топлива «Euro C + 20 % H₂O без эмульгатора» приводит к неустойчивой эмульсии и быстрому уменьшению интенсивности рассеяния (рис. 4).

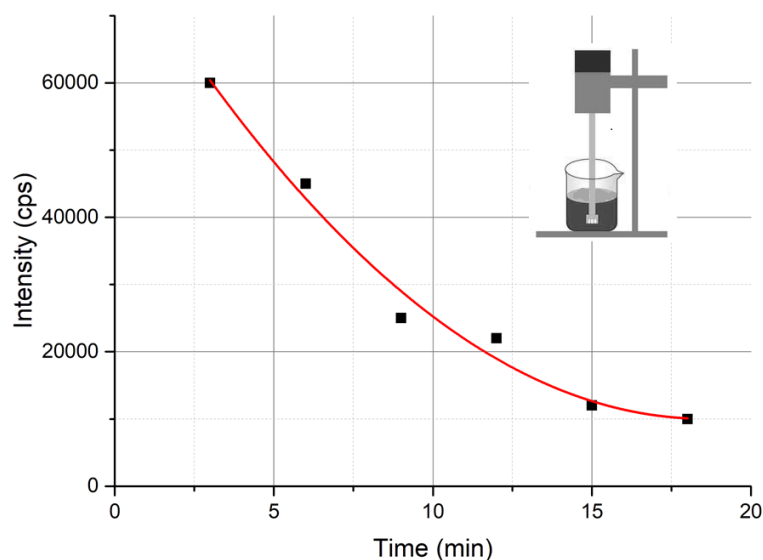


Рис. 4. Изменение со временем интенсивности рассеяния света эмульсией типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O (без эмульгатора)»

Fig. 4. Change over time in the intensity of light scattering by diesel fuel Euro C + 20 % H₂O emulsion (without emulsifier)

В этом случае распределение радиусов капель изначально является бимодальным (рис. 5) со средними радиусами 0,7 и 6,5 мкм, которые увеличиваются за счет агрегации и стабилизируются через 15 мин при 1,1 и 50 мкм.

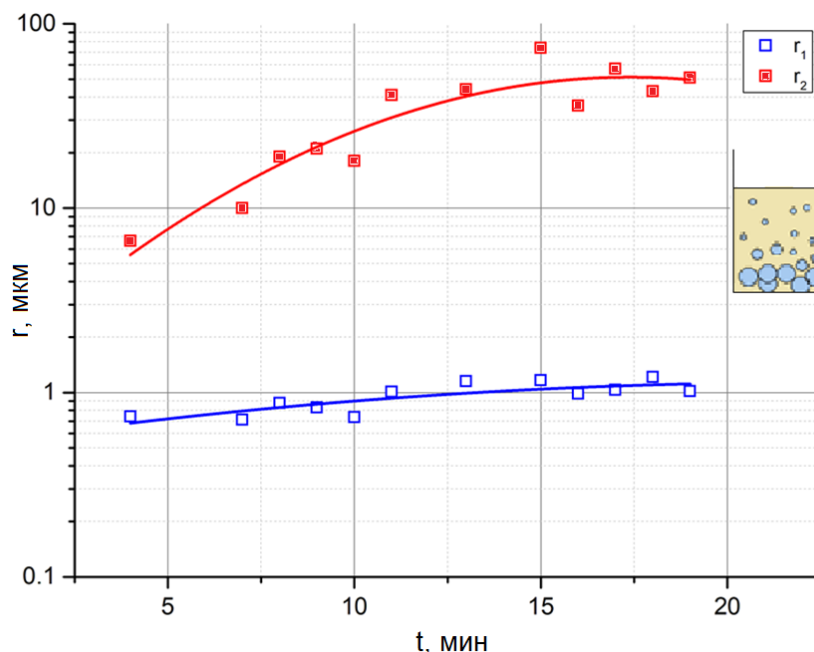


Рис. 5. Изменение со временем распределения гидродинамических радиусов капель воды в эмульсии типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O без эмульгатора»
Fig. 5. Change over time in the distribution of hydrodynamic radii of water droplets in an emulsion diesel fuel Euro C + 20% H₂O without emulsifier

Время релаксации ЯМР T_2 протонов воды в каплях эмульсии связано с размером капли и зависит от поверхностной релаксационности. Понимание поверхностной реактивности имеет большое значение при использовании T_2 -спектров в различных приложениях ЯМР. В [1] приведены наиболее вероятные радиусы капель r и поверхностные релаксационности ρ для разных значений времени эмульгирования t_{mix} , процентного содержания воды и эмульгатора (ПАВ) для водной эмульсии топлива Euro C. На рис. 6 показаны зависимости наиболее вероятных радиусов капель r от времени эмульгирования t_{mix} , полученные для эмульсий типа «ДТ EuroC + 20 % воды + 1 % ПАВ» двумя методами – с помощью программы Niumag NMR Data Analysis Software V1.1 (Pore size distribution) и седиментации. Измеренная методом седиментации поверхностная релаксационность ρ ($\mu\text{m/s}$) = 0,95 и 1,65 соответственно, «Porosity» (%) = 20, Pore Type = Sphere.

Как видно из рис. 6, форма сигнала после приготовления эмульсии существенно меняется. Во-первых, пик от ДТ (560 мс) и пик от воды (2624 мс) смещаются в область меньших времен релаксации. Во-вторых, заметно уменьшается интенсивность пика воды и проявляется его «набегание» на соседний пик топлива для образцов с большим временем микширования эмульсии. Этот факт, очевидно, коррелирует с уменьшением размера капель воды в топливе.

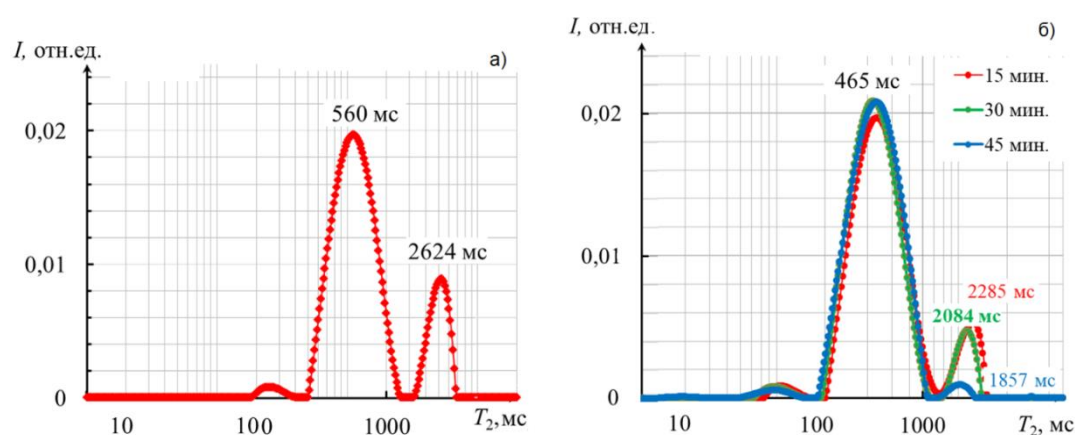


Рис. 6. Распределение времен релаксации T_2 для образцов: двухфазная система «ДТ Euro C + 20 % H₂O» (а) и эмульсия типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 1 % ПАВ» после эмульгирования (б)

Fig. 6. Distribution of relaxation times T_2 for samples: two-phase diesel fuel system Euro C + 20 % H₂O (a) and emulsion diesel fuel Euro C + 20 % H₂O + 1 % surfactant after emulsification (b)

Измерение времен релаксации T_2 через каждые 3 мин в течение 3-х ч сопровождается стремлением T_2 к своему значению в отслоившейся воде (рис. 7). Более длинный процесс расслаивания эмульсии наблюдается в образцах с большим временем эмульгирования.

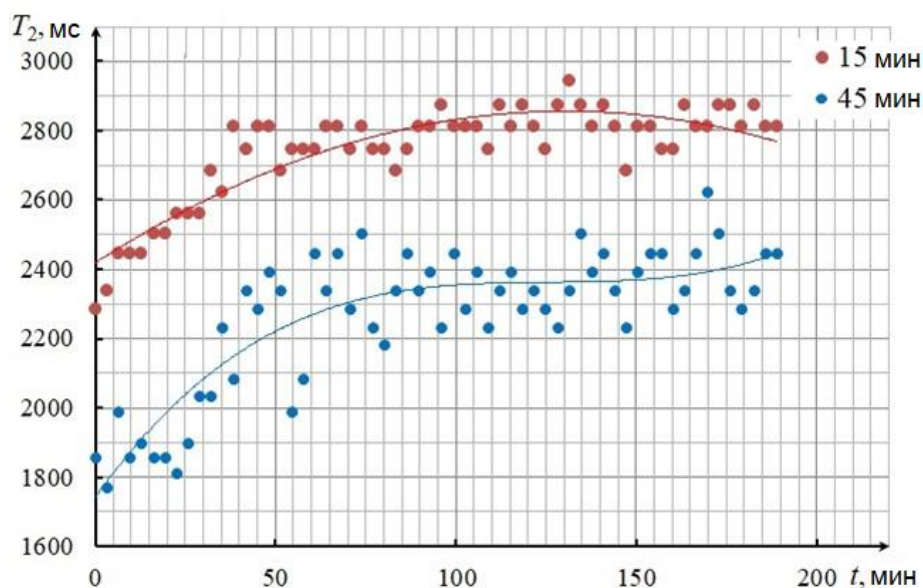


Рис. 7. График распределения времени релаксации T_2 для образцов эмульсий типа «ДТ Euro C + 20 % H₂O + 1 % ПАВ», полученных при разном времени эмульгирования

Fig. 7. Graph of the relaxation time distribution T_2 for samples of emulsions diesel fuel C + 20 % H₂O + 1 % surfactants obtained with different emulsification times

Зависимости наиболее вероятных радиусов капель r от времени эмульгирования t_{mix} , полученные двумя различными методами, для эмульсий типа «ДТ Euro C + 20 % воды + 1 % ПАВ» показаны на рис. 8.

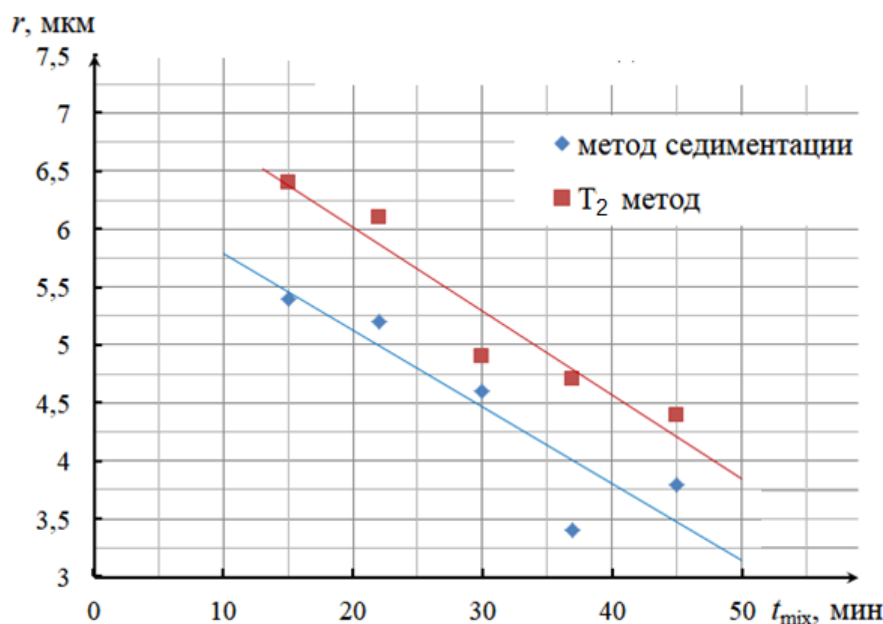


Рис. 8. Зависимости наиболее вероятных радиусов капель r от времени эмульгирования t_{mix} , полученные двумя методами, для эмульсий типа «ДТ Euro C + 20 % H_2O + 1 % ПАВ»

Fig. 8. Dependences of the most probable drop r on the t_{mix} emulsification time, obtained by two methods, for emulsions diesel fuel Euro C + 20% H_2O + 1% surfactant

Увеличение времени перемешивания эмульсии приводит к уменьшению наиболее вероятного радиуса капель воды, поверхностной релаксационности и увеличению устойчивости эмульсии. Исследования показали, что наиболее устойчивая эмульсия обеспечивается при 1%-м содержании эмульгатора. Основным параметром для оценки размеров капель в несмешивающихся жидкостях с применением явления ЯМР T_2 является поверхностная релаксационность. На сегодняшний день в научной литературе этот аспект изучается преимущественно в контексте твердых пористых матриц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе исследованы времена релаксации T_2 эмульсии на основе дизельного топлива Euro C, дистиллированной воды различной массовой концентрации и эмульгатора. Обнаружено, что стабильность эмульсии (ее существование до расслаивания на отдельные фазы) зависит от концентрации воды и ПАВ в эмульсии, а также от размера дисперсной фазы (радиуса частиц воды в топливе). Использован новый способ дисперсионного анализа частиц воды в водотопливных эмульсиях и определения поверхностной релаксационности на границе раз-

дела несмешиваемых жидкостей. Сущность метода заключается в регистрации времени поперечной релаксации ЯМР-протонов в процессе седиментации взвешенных частиц в поле силы тяжести.

Методика может быть использована для анализа грубодисперсных (10^{-6} – 10^{-4} м) капель в эмульсиях любых других органических жидкостей, результаты – в химической промышленности для разделения дисперсий «жидкость–жидкость», при проектировании оборудования для разделения фаз.

Необходим систематический подход к изучению оптимизации содержания воды в эмульсии для достижения наилучших характеристик двигателя и снижения выбросов как экспериментальными, так и численными методами, чтобы дать оптимальные рекомендации по коммерциализации водно-топливных эмульсий в качестве альтернативного источника энергии для будущих дизельных двигателей.

Список источников

1. Реологические свойства водотопливных эмульсий, приготовляемых методом впрыска воды в дизельное топливо / Л. С. Керученко, Е. И. Мальцева, С. П. Прокопов, А. С. Союнов . – DOI 10.48136/2222-0364_2022_1_129 // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2022. – № 1 (45). – С. 129–138.
2. Патров, Ф. В. Использование водотопливной эмульсии при эксплуатации судовых ДВС / Ф. В. Патров, О. С. Вахромеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. – 2009. – № 1. – С. 223–225.
3. Атия, А. М. А. Особенности подготовки водотопливных эмульсий на основе легких топлив / А. М. А. Атия // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 8. – С. 706–709.
4. Дорохов, А. Ф. Управление воспламеняемостью водотопливной эмульсии регулированием влагосодержания / А. Ф. Дорохов, Ф. В. Патров, В. В. Кабылбекова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. – 2014. – № 2. – С. 67–73.
5. Gopidesi, R. K. A review on emulsified fuels and their application in diesel engine / R. K. Gopidesi, P. S. Rajaram. – DOI: 10.1080/01430750.2019.1667435 // International Journal of Ambient Energy. – 2019. – P. 9.
6. Biplab, K. Debnath. A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines / K. Debnath Biplab, K. Saha Ujjwal, Sahoo Niranjan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – № 42. – P. 196 – 211.
7. Fuel properties of water emulsion fuel prepared using porous membrane method for low pollutant engine at various temperatures / W. Seungchul, K. Woongil, L. Jungkoo, L. Kihyung // Energy Reports. – 2021. – № 7. – P. 6638–6650.
8. The characteristic of spray using diesel water emulsified fuel in a diesel engine / P. Sangki, W. Seungchul, K. Hyungik, L. Kihyung // Applied Energy. – 2016. – № 176. – P. 209–220.
9. Osama, A. E. Experimental Investigation on a Diesel Engine Fueled by Diesel-Biodiesel Blends and their Emulsions at Various Engine Operating Conditions / A. E. Osama, M. R. Murari, S. S. Manpreet // Applied Energy. – 2017. – № 203. – P. 582–593.

10. Investigation into the influence of droplet size on the stability of diesel emulsions based on multiple light scattering / Liu Jincheng, Dai Shiqi, Bao Xicheng [et al.] // Journal of Molecular Liquids. – 2023. – Vol. 390 B. – Art. 123182.
11. Current trends in water-in-diesel emulsion as a fuel / M. Y. Khan, Z. A. A. Karim, F. Y. Hagos [et al.]. – DOI: 10.1155/2014/527472 // ScientificWorld Journal. – 2014. – № 1. – P. 1–15. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3916022> (дата обращения: 25.03.2026)
12. Diesel engine fuel consumption and emission analysis using steam generated non-surfactant water-in-diesel emulsion fuel / D. A. Sugeng, M.F.H.M. Zahari, A. M. Ithnin [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012036 // Conference Series Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 257, № 1. – P. 012036.
13. Water-in-diesel fuel nanoemulsions: Preparation, stability and physical properties / M. R. Noor El-Din, S. H. El-Hamouly, H. M. Mohamed [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012036 // Egyptian Journal of Petroleum. – 2013. – Vol. 22, № 4. – P. 517–530.
14. Кириченко, М. Н. Появление артефактного пика в распределении частиц по размерам, измеряемым методом ДРС при малых концентрациях / М. Н. Кириченко, А. Т. Саноева, Л. Л. Чайков // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2016. – № 8. – С. 32–38.
15. Исследование судовых моторных масел методом динамического рассеяния света / Н. Я. Синявский, И. П. Корнева, А. М. Иванов, Н. А. Кострикова. – DOI: 10.37220/МИТ.2020.50.4.014 // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4 (50), часть 1. – С. 103–108.
16. Sinyavsky, N. NMR relaxometry study of demulsification of diesel fuel / N. Sinyavsky, O. Synashenko, N. Kostrikova. – DOI: 10.1007/s00723-025-01820-w // Applied Magnetic Resonance. – 2026. – № 57.

References

1. Rheological properties of water-fuel emulsions prepared by injecting water into diesel fuel / L. S. Keruchenko, E. I. Maltseva, S. P. Prokopov, A. S. Soyunov. – DOI: 10.48136/2222-0364_2022_1_129 // Bulletin of Omsk State Agrarian University. – 2022. – № 1 (45). – P. 129–138.
2. Patrov, F. V. Use of water-fuel emulsion in the operation of marine internal combustion engines / F. V. Patrov, O. S. Vakhromeev // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. – 2009. – № 1. – P. 223–225.
3. Attia, A. M. A. Features of the preparation of water-fuel emulsions based on light fuels / A. M. A. Attia // Fundamental research. – 2011. – № 8. – P. 706–709.
4. Dorokhov, A. F. Control of flammability of water-fuel emulsion by regulation of moisture content / A. F. Dorokhov, F. V. Patrov, V. V. Kabylbekova // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. – 2014. – № 2. – P. 67–73.
5. Gopidesi, R. K. A review on emulsified fuels and their application in diesel engine / R. K. Gopidesi, P. S. Rajaram. – DOI: 10.1080/01430750.2019.1667435 // International Journal of Ambient Energy. – 2019. – P. 9.

6. Biplab, K. Debnath. A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines / K. Debnath Biplab, K. Saha Ujjwal, Sahoo Niranjan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – № 42. – P. 196 – 211.
7. Fuel properties of water emulsion fuel prepared using porous membrane method for low pollutant engine at various temperatures / W. Seungchul, K. Woongil, L. Jungkoo, L. Kihyung // *Energy Reports*. – 2021. – № 7. – P. 6638–6650.
8. The characteristic of spray using diesel water emulsified fuel in a diesel engine / P. Sangki, W. Seungchul, K. Hyungik, L. Kihyung // *Applied Energy*. – 2016. – № 176. – P. 209–220.
9. Osama, A. E. Experimental Investigation on a Diesel Engine Fueled by Diesel-Biodiesel Blends and their Emulsions at Various Engine Operating Conditions / A. E. Osama, M. R. Murari, S. S. Manpreet // *Applied Energy*. – 2017. – № 203. – P. 582–593.
10. Investigation into the influence of droplet size on the stability of diesel emulsions based on multiple light scattering / Liu Jincheng, Dai Shiqi, Bao Xicheng [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. – Vol. 390 B. – Art. 123182.
11. Current trends in water-in-diesel emulsion as a fuel. / M. Y. Khan, Z. A. A. Karim, F. Y. Hagos [et al.]. – DOI: 10.1155/2014/527472 // *ScientificWorld Journal*. – 2014. – № 1. – P. 1–15. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3916022> (date of treatment: 25.03.2026)
12. Diesel engine fuel consumption and emission analysis using steam generated non-surfactant water-in-diesel emulsion fuel / D. A. Sugeng, M. F. H. M. Zahari, A. M. Ithnin [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012036 // *Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 257, № 1. – P. 012036.
13. Water-in-diesel fuel nanoemulsions: Preparation, stability and physical properties / M. R. Noor El-Din, S. H. El-Hamouly, H. M. Mohamed [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/257/1/012036 // *Egyptian Journal of Petroleum*. – 2013. – Vol. 22, № 4. – P. 517–530.
14. Kirichenko, M. N. Appearance of an artifact peak in the particle size distribution measured by the DLS method at low concentrations / M. N. Kirichenko, A. T. Sanoeva, L. L. Chaikov // *Brief communications on physics of the Lebedev Physical Institute*. – 2016. – № 8. – P. 32–38.
15. Study of marine motor oils by dynamic light scattering method / N. Ya. Sinyavsky, I. P. Korneva, A. M. Ivanov, N. A. Kostrikova. – DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.014 // *Marine intelligent technologies*. – 2020. – № 4 (50), part 1. – P. 103–108.
16. Sinyavsky, N. NMR relaxometry study of demulsification of diesel fuel / N. Sinyavsky, O. Synashenko, N. Kostrikova. – DOI: 10.1007/s00723-025-01820-w // *Applied Magnetic Resonance*. – 2026. – № 57.

Информация об авторах

О. В. Сынашенко – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики

Н. Я. Синявский – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики

Н. А. Кострикова – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе

Information about the author

O. V. Synashenko – Candidate of Physical and Mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Physics

N. Ya. Sinyavsky – Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor, Head of the Department of Physics

N. A. Kostrikova – Candidate of Physical and Mathematical sciences, Associate professor, Vice-rector for research

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 20.03.2026; одобрена после рецензирования 06.04.2026; принята к публикации 16.04.2026.

The article was submitted 20.03.2026; approved after reviewing 06.04.2026; accepted for publication 16.04.2026.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-47915
от 22.12.2011 г.

Подписной индекс 83871 в Объединенном каталоге «Пресса России»,
цена свободная

Редактор С. В. Супрунова

Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
Лицензия № 05609 от 14.08.2001
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «КГТУ»
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
Подписано в печать 27.04.2026. Выход в свет 01.05.2026. Формат 60 x 88 (1/8).
Печ. л. 16,1. Уч.-изд. л. 10,3. Тираж 1000 экз. Заказ № 15.