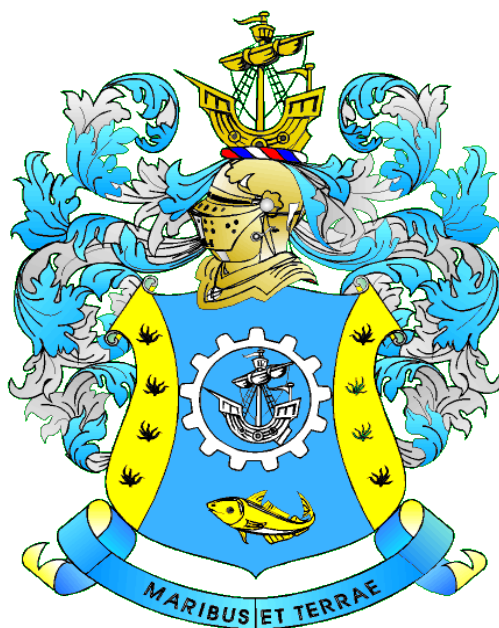


ИЗВЕСТИЯ КГТУ

2025
№ 78

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Научный журнал



Индексирование журнала, включение в базы данных

*Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть
опубликованы основные научные результаты диссертаций 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. Бабич, 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. Нанопотоника», 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., заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской 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. Дышлок, д-р техн. наук, доц., старший научный сотрудник, Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград, Россия;

С. В. Дятченко, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры судостроения, судоремонта и морской 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., Калининградский институт переподготовки кадров агробизнеса, г. Калининград, Россия;

Е. Н. Наumenко, 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;

С. В. Супрунова, выпускающий редактор;

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, доц., заместитель директора Института агроинженерии и пищевых систем по научной и международной деятельности, 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 имени 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»,
2025



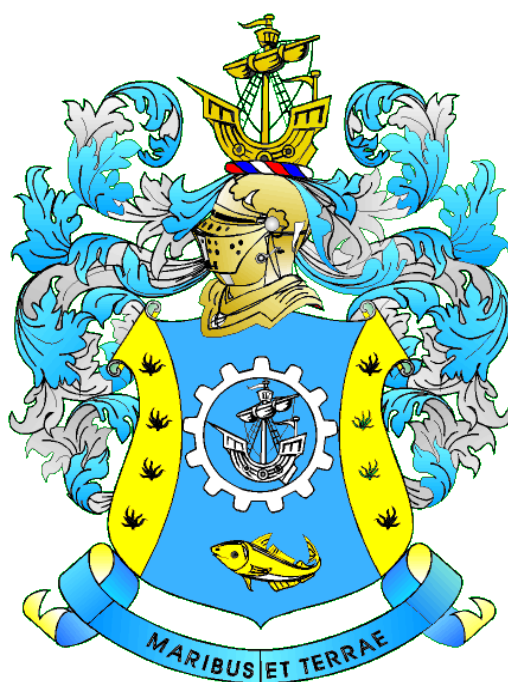
KSTU NEWS

2025

№ 78

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

Ермаков С. А., Хусаинова И. В., Белоусова П. С. Состояние двух интродукционных популяций <i>Larix decidua</i> Mill. на территории Полесского района Калининградской области	11
Ковалева О. В. Экологическая оценка качества производственных стоков молокоперерабатывающих предприятий	26
Колесникова А. Д., Судник С. А. Анализ состава пищи антарктического криля (<i>Euphausia superba</i>) Антарктической части Атлантики	38
Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Аккумуляция кадмия в зеленой массе кукурузы на удобряемых навозом почвах	53

Техника и технология пищевых производств

Наумов В. А., Левичева О. И. Сравнительный анализ производительности пищевых коловратных насосов при подаче высоковязких сред	67
Чернега О. П., Курыжко А. И. Применение зеленого чая «Матча» в производстве булочек «Синнабон»	81

Судостроение, машиностроение и энергетика

Довгополик Д. Д., Гришин П. Р., Великанов Н. Л., Мушенков А. А. Адаптация модели искусственного интеллекта для определения проектных характеристик судна	99
Корнева И. П., Виноградов С. Н. Исследование возможности определения загрязнения дизельных топлив оптическими методами	115

CONTENT

Biology, ecology and fisheries

<i>Ermakov S. A., Khusainova I. V., Belousova P. S.</i> The status of two introduced populations of <i>Larix decidua</i> Mill. in the territory of the Polesk district of the Kaliningrad region	11
<i>Kovaleva O. V.</i> Environmental assessment of the quality of industrial effluents	26
<i>Kolesnikova A. D., Sudnik S. A.</i> Food composition analysis of Antarctic krill (<i>Euphausia superba</i>) from the Antarctic part of the Atlantics	38
<i>Pilip L. V., Syrchina N. V.</i> Accumulation of cadmium in green mass of corn on soils fertilized with manure	53

Processes and technology of food manufacturing

<i>Naumov V. A., Levicheva O. I.</i> Comparative analysis of the performance of food rotary lobe pumps when delivering highly viscous media	67
<i>Chernega O. P., Kuryzhko A. I.</i> Use of «Matcha» green tea in the production of «Cinnabon» buns	81

Shipbuilding, machine manufacturing and power engineering

<i>Dovgopolik D. D., Grishin P. R., Velikanov N. L., Mushenkov A. A.</i> AI Model Adjustment for Determination of Ship Design Characteristics	99
<i>Korneva I. P., Vinogradov S. N.</i> Study of the possibility of determining contamination of diesel fuels using optical methods	115

БИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ И РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья

УДК 582.475.2, 630*232.11

DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-11-25

**Состояние двух интродукционных популяций *Larix decidua* Mill.
на территории Полесского района Калининградской области**

Сергей Анатольевич Ермаков¹✉, Ирина Викторовна Хусаинова², Полина Сергеевна Белоусова³

^{1,2}Калининградский филиал Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, Полесск, Россия

³Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹sergej.ermakov.1964@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3800-9858>

²fhusi@yandex.ru

³polj12@rambler.ru

Аннотация. *Larix decidua* Mill. является породой, высаженной на первичное интродукционное испытание более 120 лет назад на территории Восточной Пруссии, ныне Калининградской области. Данные посадки представляют значительный интерес с точки зрения успешности интродукции. Проведена оценка таксационных показателей с уточнением возраста отдельных деревьев, ярусности насаждения, его санитарного состояния, видового состава сопутствующих пород, состава подлеска, наличия подроста и его состояния, присутствия и обилия самосева. Также дана характеристика напочвенного покрова. На изучаемой территории тип лесорастительных условий – D₂, тип леса – лиственничник липовый. Насаждения развиваются по I классу бонитета, в составе древостоя лиственницы европейской от 6 до 10 единиц, запас древесины 322–386 м³/га. Сравнение с таксационными показателями 2013 г. показало, что выделы мало отличаются по составу насаждения и полноте древостоя на момент исследования. Заметное отличие наблюдается в запасе древесины. Санитарное состояние обследуемых пробных площадей определялось по шкале категорий состояния деревьев и отнесено к категориям жизненного состояния, различающимся в двух кварталах: в квартале 32 состояние древостоя относится к категории «ослабленные», в квартале 171 – к категории «здоровые». В Калининградской области лиственница европейская успешно прошла акклиматизацию и хорошо приспособилась к местным условиям, однако в квартале 32 из-за старения и сильной густоты деревьев популяция становится менее устойчивой, появляются вредители, повреждающие стволы, и возрастает риск ветровалов. Подроста и самосева основной породы – лиственницы европейской – на пробных площадях и смежных выделах не обнаружено.

Ключевые слова: возобновление, *Larix decidua*, интродуцент, Калининградская область, хвойно-широколиственные леса, бонитет.

Для цитирования: Ермаков С. А., Хусаинова И. В., Белоусова П. С. Состояние двух интродукционных популяций *Larix decidua* Mill. на территории Поlessкого района Калининградской области // Известия КГТУ. 2025. № 78. С.11–25. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-11-25.

Original article

The status of two introduced populations of *Larix decidua* Mill. in the territory of the Polessk district of the Kaliningrad region

Sergey A. Ermakov¹, Irina V. Khusainova², Polina S. Belousova³

^{1,2} Kaliningrad branch of St. Petersburg State Agrarian University, Polessk, Russia

³ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ sergej.ermakov.1964@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3800-9858>

² fhusi@yandex.u

³ polj12@rambler.ru

Abstract. *Larix decidua* Mill. is a breed planted for initial introduction testing more than 120 years ago on the territory of East Prussia, now the Kaliningrad region. These plantings are of considerable interest in terms of the success of the introduction. An assessment of the taxation indicators has been carried out, specifying the age of individual trees, the number of plantings, its sanitary condition, the species composition of related species, the composition of the undergrowth, the presence of undergrowth and its condition, the presence and abundance of self-seeding. The characteristics of the soil cover are also given. In the studied area, the type of forest conditions is D2, and the type of forest is linden larch. Plantations are developing according to the I growth class, as part of the European larch stand from 6 to 10 units, the wood stock is 322–386 m³/ha. A comparison with the 2013 taxation figures showed that the allotments differ little in terms of the composition of the plantation and the stand density at the time of the study. A noticeable difference is observed in standing crop. The sanitary condition of the surveyed sample areas has been determined on a scale of tree condition categories and classified into categories of living conditions that differ in two quarters: in quarter 32, the state of the stand is classified as "weakened", in quarter 171 – as "healthy". In the Kaliningrad region, European larch has successfully acclimatized and adapted well to local conditions. However, in block 32, due to the aging and high density of trees, the population becomes less stable, pests appear that damage the trunks, and the risk of windstorms increases. Undergrowth or self-seeding of the main breed, European larch, have not been found in the test areas and on the neighboring allotments.

Keywords: renewal, *Larix decidua*, introduced, Kaliningrad region, coniferous-deciduous forests, bonus.

For citation: Ermakov S. A., Khusainova I. V., Belousova P. S. The status of two introduced populations of *Larix decidua* Mill. in the territory of the Polessk district of the Kaliningrad region. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(78):11–25. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-11-25.

ВВЕДЕНИЕ

Интродукция (от лат. *introductio* – введение) в биологии – преднамеренное или случайное переселение человеком особей какого-либо вида животных и растений за пределы естественного ареала в новые для них места обитания. Интродукция является процессом введения в некую экосистему чужеродных для нее видов [1]. Под интродукцией растений понимают целенаправленную деятельность человека по введению в культуру новых видов, форм и сортов путем разведения их за пределами естественного ареала (виды, подвиды, разновидности) или продвижения в новые районы сортов [2].

Для дендрофлоры Восточной Пруссии характерен богатый ассортимент интродукционных деревьев и кустарников. В Пруссии в 1872 г. была создана Прусская лесная опытная станция и сеть из 11 опытных лесничеств, три из которых находятся на территории нашей области. Это ознаменовало начало качественно нового этапа в истории здешнего лесоводства – широкое внедрение в практику передовых методов формирования и ухода за лесом в дополнение к массовому – индивидуальный селекционный отбор, а также интродукцию большого числа лесообразующих пород, в первую очередь северо-американского происхождения. Результаты интродукции некоторых из них оказались настолько удачными, что теперь эти породы следует рассматривать как весьма перспективные для лесного хозяйства области и занимаемые ими площади необходимо неуклонно увеличивать. К таким породам в первую очередь следует отнести псевдотсугу (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco), сосну Веймутова (*Pinus strobus* L.), пихту белую (*Abies alba* Mill.), тую складчатую (*Thuja plicata* Donn ex D. Don), лиственницу европейскую (*Larix decidua* Mill.), дуб красный (*Quercus rubra* L.) и ряд других пород [3]. В насаждениях, заложенных еще до Второй мировой войны, сохранилось около 450 наименований древесных растений. Старые зеленые насаждения представляют ценнейший источник исходного материала для озеленения и формирования ландшафта, очевидна и научная ценность крупномерных плодоносящих зимостойких устойчивых экземпляров для получения информации по интродукционной перспективности пород с целью продвижения их в новые регионы. Например, для интродукции в лесах юго-западной части Литвы самым перспективным видом лиственницы является *L. decidua* [4]. Естественный ареал этой породы охватывает Австрию, Чехию, Францию, Германию, Италию, Польшу, Румынию, Швейцарию, Украину, Словению.

Лиственница европейская (*Larix decidua*) культивируется как декоративная и лесная порода по всей Европе с XVII века, с конца XVIII века она появилась в Балтийском регионе [5]. В России культивируется как декоративное растение с середины XVIII века, как лесное – с середины XIX века. *Larix decidua* – дерево, достигающее в высоту 30–40 м (отдельные экземпляры до 50 м) при диаметре ствола 80–100 см (иногда до 150 см). Оно отличается долговечностью, доживает до 500 и более лет. Крона конусовидной или неправильной формы, корневая система глубинная, обеспечивающая полную ветроустойчивость, на молодых тонких корнях часто присутствует эктотрофная микориза. Лиственница европейская распространена в хвойных и смешанных лесах Западной и Центральной Европы, доходя на востоке до Карпат. В пределах естественного ареала она занимает в основном местообитания в горных областях Альп и Карпат, располагаясь, как пра-

вило, на высотах между 1000 и 2500 м над уровнем моря, в предгорьях местами спускается до 300 м, поднимается в альпийский пояс, доходя до альпийских кри-волесий. В верхней зоне с 1500 до 2500 м встречается в смеси с европейским ке-дром (*Pinus cembra* L.) и сосной горной (*Pinus mugo* Turra), ниже – с елью обык-новенной (*Picea abies* (L.) H. Karst.), пихтой белой (*Abies alba* Mill.), буком лесным (*Fagus sylvatica* L.) и другими породами.

В условиях Калининградской области лиственница европейская является интродукционной культурой, высаженной с целью первичного изучения в разных районах области небольшими участками в конце XIX – начале XX века. Сведения о состоянии *L. decidua* как объекта интродукции недостаточны и весьма разроз-ненны, поэтому представляет немалый интерес собрать и проанализировать дан-ные по испытанию этой ценной хвойной породы. Например, жители населенного пункта Кляйн Гни (ныне посёлок Мозырь в Правдинском городском округе) по праву гордились великолепной лиственничной рощей, деревья которой к сороко-вым годам XX века имели возраст около 150 лет, а сама роща – статус памятника природы [6, 7].

Цель работы – изучить состояние интродукционной старовозрастной попу-ляции *L. decidua*. Основные задачи – оценить состояние биоценозов, в которых произрастает *L. decidua*, возрастной, породный состав, наличие подлеска, опреде-лить санитарное состояние основной и сопутствующих пород, качественное и ко-личественное состояние подроста, подлеска, самосева.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Нами обследованы интродукционные популяции лиственницы европейской (*Larix decidua*) на примере двух участков: 1) в квартале 32 площадью 1 га на тер-ритории Полесского участкового лесничества, координаты участка 54°87'53"N 21°14'71"E; 2) в квартале 171 площадью 0,62 га на территории Саранского участ-кового лесничества Полесского государственного лесничества, координаты уча-стка 54°77'12"N 21°27'87"E. Основная порода – лиственница европейская (*L. deci-dua* Mill.). При оценке древостоев для каждого дерева определяли породу дерева, ярус, санитарное состояние. Диаметр ствола измеряли на высоте 1,3 м с помощью мерной вилки, для измерения высоты ствола и протяженности кроны использова-ли высотомер. При таксации древостоев применяли стандартную методику для пробных площадей [8, 9]. Возраст определяли с помощью приростного бурава Naglof у корневой шейки деревьев, санитарное состояние – по шкале категорий состояния деревьев [10]: 1 – без признаков ослабления, 2 – ослабленные, 3 – силь-но ослабленные, 4 – усыхающие, 5 – свежий сухостой, 6 – старый сухостой. Расчет индексов состояния древостоев производился по формуле: $ИС = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / (100 \cdot N)$, где ИС – индекс жизненного состояния древостоя; n_1 – количество здоровых (без признаков ослабления) деревьев, n_2 – ослаблен-ных, n_3 – сильно ослабленных, n_4 – усыхающих; N – общее количество деревьев (включая свежий сухостой). Отнесение насаждений к категориям жизненного со-стояния осуществлялось на основе модифицированной шкалы Алексеева [11] (Алексеев, 1997). Древостои с индексом состояния 0,90–1,00 относятся к катего-рии «здоровые», 0,80–0,89 – «здоровые с признаками ослабления», 0,70–0,79 – «ослабленные», 0,50–0,69 – «поврежденные», 0,20–0,49 – «сильно поврежден-

ные», менее 0,20 – «разрушенные». Учет подроста и самосева осуществлялся на 20 площадках размером 2х2 м, равномерно размещенных по пробной площади. Тип лесорастительных условий (ТЛУ) принимался нами на основе данных лесоустройства, которые выполнялись в Полесском лесничестве в 2013 г. Северо-Западным филиалом Рослесинфорга, и состава живого напочвенного покрова, выявленного на пробных площадях. Исследования велись во время вегетации 2025 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Территория Калининградской области относится к лесной зоне, подзоне смешанных хвойно-широколиственных лесов. Лесистость области достигает 22 %.

Нами выявлен видовой и количественный состав подроста, подлеска и самосева на пробных площадях (табл. 3, 6).

Квартал 32. В таксационном описании лесоустройства 2013 г. указаны следующие данные: выдел 3, площадь 1,9 га, состав и возраст 4Дч150)5Лц(е)(150)1Л(150)+Пх(б)(90), высота пород – дуб (ч) 31 м, диаметры составляющих пород – дуб (ч) 48 см, лиственница (е) 48 см, липа 40 см. ТЛУ – лиственничник липняковый, D₂ (по классификационной (эдафической) сетке Алексеева–Погребняка: D – по подтипу богатства почв – богатые, по подтипу влажности – свежие. Полнота 0,8, запас на 1 га 400 м³, на выделе 780 м³. Подрост 5Д(ч)5Е, возраст 30 лет, высота 3 м, 1500 шт./га. Подлесок – рябина, лещина, средней густоты. Состояние лесных культур удовлетворительное, имеется одно плюсовое дерево лиственницы. В табл. 1 показана таксационная характеристика пробной площади в квартале 32 Полесского участкового лесничества площадью 1,0 га по данным нашего исследования. Возраст лиственницы европейской 135 лет.

Таблица 1. Таксационная характеристика пробной площади в квартале 32 Полесского участкового лесничества

Table 1. Taxation characteristics of the sample plot in sq. 32 of the Polessk district forestry

Ярус	Состав	Полнота относит./ абс., м ²	Ср. высота/ осн. ошибка, м	Ср. диаметр/ осн. ошибка, см	Запас, м ³ /га	Тип леса	ТЛУ (ТУМ)	Бонитет
1	6Лц(е) 4Д(ч)	1,11 44,4	30,9	63,7	602,3	Лиственнич- ник липовый	D ₂	
Состав- ляю- щие по- роды	Лц (е)		32,5±0,8	68±0,9	385,6			
	Д(ч)		30±0,8	56±0,6	216,7			

2	10Лп+ Е+Пх (б)+ Бк+Кл (п)		21,7	34	113			
Состав- ляющие породы	Лп	<u>0,27</u> 11,6	21,7	34	89,9			
	Е		13	21	8,1			
	Пх(б)		12	15	4,5			
	Бк		17	27	6			
	Кл(п)		21	25,3	4,5			
Итого		<u>1,38</u> 56			715,3			

При проведении мероприятий по таксации древостоя было обнаружено, что насаждение сложное, состоит из двух ярусов, так как высота второго яруса отличается более чем на 20 % от высоты первого яруса [8]. Состав насаждения на момент исследования мало отличается от таксационных показателей 2013 г. Имеется отличие в запасе древесины, он довольно высокий – 715 м³/га. Следует заметить, исследования в Центральной России показали, что лиственница европейская может быть успешно там интродуцирована. Например, в Тверской области она образует высокопроизводительные искусственные насаждения с запасом стволовой древесины до 1000 м³/га [12]. Обращает на себя внимание очень высокая полнота – 1,38, она на 38 % превышает нормальную для этого возраста полноту лиственничного древостоя. Оба этих показателя увеличились за счет наличия 4 единиц дуба в составе древостоя.

Был проведен статистический анализ диаметров и высот 1 яруса древостоя. Для дуба коэффициент вариации диаметров большой (59,9 % > 30 %), точность опыта 0,84 % – высокая (< 5%); коэффициент вариации высот средний – 11,5 % > 10,1 %, точность опыта 3,08 % – высокая (< 5 %). Для лиственницы коэффициент вариации диаметров большой – 87,2 % > 30 %, точность опыта 1,23 % – высокая (< 5 %); коэффициент вариации высот средний – 10,2 % > 10,1 %, точность опыта 2,6 % – высокая (< 5 %). Исходя из полученных данных, можно прийти к выводу, что точность опыта для высот и диаметров не превышает 5 % и полученные результаты можно использовать для исследования. В табл. 2 показано санитарное состояние деревьев на пробной площади в квартале 32.

Таблица 2. Санитарное состояние деревьев на пробной площади в квартале 32
Table 2. Sanitary condition of trees in the trial area in quarter 32

Распределение деревьев по категориям состояния						Индекс состояния древостоя	Состояние древостоя
Без признаков ослабления	Ослабленные	Сильно ослабленные	Усыхающие	Свежий сухой	Старый сухой		
122	48	141	50	10		0,74	Категория «ослабленные»

Санитарное состояние древостоя относится к категории «ослабленные», имеется большое количество сильно ослабленных деревьев лиственницы европейской вследствие поражения вредителями (рис. 2).



Рис 2. Экземпляр лиственницы европейской со следами наличия стволовых вредителей в квартале 32

Fig. 2. European larch tree with traces of stem pests in quarter 32

В табл. 3 показан состав подроста, подлеска и самосева на пробной площади в квартале 32.

Таблица 3. Видовой и количественный состав подроста, подлеска и самосева на пробной площади в квартале 32

Table 3. Species and quantitative composition of undergrowth, undergrowth and self-seeding in the trial plot in quarter 32

Вид	Возраст, лет	Высота, м	Количество, шт./га
Подрост			
<i>Acer platanoides</i> L.	8	3,9	1428
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	5	1,9	1072
<i>Tilia cordata</i> Mill.	5	0,5	715
<i>Carpinus betulus</i> L.	6	0,6	357
<i>Fagus sylvatica</i> L.	6	1,8	375

Подлесок			
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	–	1,95	3280
<i>Corylus avellana</i> L.	–	3,1	780
<i>Padus avium</i> Mill.	–	0,7	2340
Самосев			
<i>Quercus robur</i> L.	–	0,15	1390
<i>Acer platanoides</i> L.	–	0,15	280
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	–	0,15	560
<i>Fagus sylvatica</i> L.	–	0,15	280
<i>Abies alba</i> Mill.	–	0,15	280

Общее количество подроста составляет почти 4000 шт./га. В подросте преобладает клен остролистный (36 %), на втором месте клен ложноплатановый (27 %), далее липа мелколистная (18 %), на долю граба и бука приходится 9 и 10 % соответственно (табл. 3). Коэффициент встречаемости – 35 %, распределение по площади неравномерное. Классификация подроста по густоте: подрост средней густоты [13]. В подлеске на изучаемой территории преобладает рябина обыкновенная (50 % растений), черемуха обыкновенная составляет 37 %, лещина обыкновенная – 13 %. Лещина является индикатором плодородия. Самосев – молодое поколение древесных растений, образующееся из семян, рассеянных естественным путем, в возрасте до 3–5 лет. Нами отмечено отсутствие самосева и подроста основной породы. На нашей территории преобладают сеянцы дуба черешчатого (50 % от общего количества), клен остролистный составляет 10 %, клен ложноплатановый – 20 %, пихта белая – 20 % (семена заносятся из квартала 18). Нужно заметить, что в подросте отсутствуют деревца дуба черешчатого, хотя в самосеве они есть. Вероятно, самосев этого вида не выдерживает конкуренции с другими породами. Общее проективное покрытие напочвенного покрова на площадках варьирует от <1 % до 25 %. В напочвенном покрове на всех площадках доминирует (Ср., %): *Oxalis acetosella* L. – 17,3; *Poa trivialis* L. – 9,4; *Dryopteris dilatata* (Hoffm.) A. Gray и *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt – 7,5; *Pseudoscleropodium purum* (Hedw.) M. Fleisch. ex Broth. – 2,3; *Rubus caesius* L. – 2,0; *Vaccinium myrtillus* L. – 1,9; *Stellaria holostea* L. – 1,6; мертвопокровный – 58. Поверхность почвы скрыта под обильным листовым опадом. Распределение травянистых видов на учетных площадках неравномерное.

Квартал 171. В таксационном описании лесоустройства 2013 г. указаны следующие данные: выдел 3, площадь 0,3 га. Состав и возраст: 7Л(е)(120)1С(100)1Д(80)1Гр(80)+1Б(70). Высота пород: лиственница – 30 м, сосна – 28 м, дуб (ч) – 22 м, граб – 19 м, береза – 23 м. Диаметры пород: лиственница – 52 см, сосна – 44 см, дуб (ч) – 32 см, граб – 36 см, береза – 26 см. ТЛУ – лиственничник липняковый, D₂ (по классификационной (эдафической) сетке Алексеева–Погребняка; по подтипу богатства почв – богатые; по подтипу влажности – свежие). Полнота – 0,8, запас – 380 м³/га, на выделе 110 м³/га. Подрост – 10Е, возраст – 15 лет, высота – 1,5 м, 500 шт./га. Состояние лесных культур – удовлетворительное. Площадь, занятая лиственницей и сопутствующими породами, при натурном обследовании оказалась в два раза больше, чем в таксационном описании. Насаждение – сложное, так как имеется два яруса. Диаметры и высоты составляющих пород в основном соот-

ветствуют таксационному описанию. Масса древесины на 1 га при натурном обследовании выше, чем указано в таксационном описании (рис. 3).



Рис. 3. Древостой лиственницы европейской в квартале 171 Саранского участкового лесничества

Fig. 3. European larch stand in quarter 171 of the Saransk district forestry

Был проведен статистический анализ диаметров и высот 1 яруса древостоя. Для лиственницы: коэффициент вариации диаметров большой – 98,5 % >30 %, точность опыта 9,8 % – удовлетворительная (<10 %); коэффициент вариации высот малый – 5,7 % <10,1 %, точность опыта 1,9 % – высокая (<5 %). Учитывая полученные данные, можно прийти к выводу, что точность опыта для высот удовлетворительная, для диаметров – не превышает 5 % и полученные результаты можно использовать для исследования. Данные нашего описания представлены в табл. 4. Полнота практически соответствует данным таксационного описания 2013 г. Сосна не вошла в пределы пробной площади, ее древостой находится отдельной куртиной. Возраст лиственницы европейской 120 лет.

Таблица 4. Таксационная характеристика пробной площади в квартале 171 Саранского участкового лесничества площадью 0,62 га

Table 4. Taxation characteristics of the sample area in quater 171 of the Saransk district forestry

Ярус	Состав	Полнота отно- сит./ абс., м ²	Ср. вы- сота/ осн. ошиб- ка, м	Ср. диа- метр/ осн. ошиб- ка, см	Запас, м ³ /га	Тип леса	ТЛУ, ТУМ	Бони- тет
1	10Лц(е) +Б	<u>0,63</u> 13,7	32	60,7	333	Лл	D2	I

Составляющие породы	Лп(е)		32± 0,6	60,7± 1,22	322			
	Б		28	36,3	11			
2	3,9Д2,2 Г1,9Лп	<u>0,21</u> 6,5	21,4	31,6	104			
Составляющие породы	Д		21	35,3	62			
	Г		20	19,2	22			
	Лп		24	34,6	20			
Итого		<u>0,84</u> 20,2			437			

В табл. 5 показано санитарное состояние деревьев на пробной площади в кв. 171.

Таблица 5. Санитарное состояние деревьев на пробной площади в квартале 171
Table 5. Sanitary condition of trees in the trial area in quarter 171

Распределение деревьев по категориям состояния						Индекс состояния древос- тоя	Состо- яние древос- тоя
Без призна- ков ослаб- ления	Ослаб- лен- ные	Сильно ослаб- ленные	Усыхаю- щие	Све- жий сухо- стой	Старый сухо- стой		
119	25	8	—	—	—	0,92	Кате- гория «здоро- вые»

Санитарное состояние древос-тоя относится к категории «здоровые». На участке имеется несколько ослабленных деревьев лиственницы европейской, которые были обнаружены во время взятия проб с помощью приростного бурава, примерно 2/3 диаметра на высоте груди составляет гниль. В табл. 6 показан видовой и количественный состав подроста, подлеска и самосева на пробной площади в квартале 171.

Таблица 6. Видовой и количественный состав подроста, подлеска и самосева на пробной площади в квартале 171
Table 6. Species and quantitative composition of undergrowth and self-seeding in the trial plot in quarter 171

Вид	Возраст, лет	Высота, м	Количество, шт./га
Подрост			
<i>Acer platanoides</i> L.	9	1,0	2500
<i>Tilia cordata</i> Mill.	8	2,0	300
<i>Carpinus betulus</i> L.	6	0,78	4070
<i>Picea abies</i> L.	20	1,8	640

Подлесок			
<i>Crataegus sanguinea</i> Pall.	5	0,6	310
Самосев			
<i>Quercus rubra</i> L.	3	0,15	480
<i>Acer platanoides</i> L.	3	0,15	560

Общее количество подроста составляет 7500 шт./га, однако подроста лиственницы европейской на пробной площади нет. В подросте преобладает граб обыкновенный (54 %), на втором месте клен остролистный (33,5 %), на долю ели европейской и липы мелколистной приходится 8,5 и 14 % соответственно (табл. 6).

Коэффициент встречаемости подроста – 88 %, распределение по площади равномерное. Классификация подроста по густоте: подрост средней густоты [12]. Распределение подроста по категориям состояния – жизнеспособный (100 %). Распределение подроста по группам высот: мелкий (до 0,5 м) – 37 %, средний (от 0,5 до 1,5 м) – 50 %, крупный (более 1,5 м) – 12 %. На пробной площади в подлеске имеется небольшое количество боярышника кроваво-красного. Самосева лиственницы европейской на пробной площади нет. Сеянцы дуба черешчатого составляют 46 %, клена остролистного – 54 %. В напочвенном покрове на всех площадках встречаются (Ср., %): *Oxalis acetosella* – 0,5; *Dryopteris dilatata* – 1,4; *Pseudoscleropodium purum* – 2,8; *Stellaria holostea* – 0,8; *Lamium luteum* Huds. – 7,1; *Asarum europaeum* L. – 0,3; доминирует мертвопокровный – 87,1. Выявленное отсутствие самосева и подроста основной породы лиственницы европейской на пробных площадях и в пределах прилегающих лесных кварталов вызывает вопросы о причинах этого явления. Естественное возобновление леса – процесс образования нового поколения леса естественным путем. Процессы возобновления способствуют поддержанию биологического равновесия в лесу, обеспечивают постоянство его существования и, соответственно, непрерывность пользования его ресурсами. Возобновление породы также зависит от возраста, освещенности, размера кроны и условий местопроизрастания [14–17]. Самые высокие показатели установлены у лиственниц в возрасте 90–160 лет [18]. Оба изученных участка являются опушечными и прилегают к дорогам, одинаково расположены по отношению к господствующим ветрам. В первом квартале основная порода старше на 15 лет, вероятно, с возрастными изменениями связана ее подверженность ветровалу и заселение вторичными стволовыми вредителями. В общем, на пробной площади квартала 32 большее количество самосева, большая полнота, присутствует много ослабленных деревьев дуба черешчатого возрастом более 150 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях Калининградской области на обследуемых площадях лиственница европейская *Larix decidua* Mill. успешно прошла первичное интродукционное испытание и хорошо приспособилась к новым для нее условиям. Насаждения развиваются по I классу бонитета, в составе древостоя лиственницы европейской от 6 до 10 единиц, запас древесины достигает 322–386 м³/га.

Санитарное состояние двух обследуемых пробных площадей оказалось различным, в квартале 32 состояние древостоя относится к категории «ослаблен-

ные», в квартале 171 – к категории «здоровые». По причине старения и загущенности древостой в квартале 32 утрачивает пластичность, появляются стволовые вредители и ветровальные деревья. Подроста и самосева основной породы – лиственницы европейской – на пробных площадях и смежных выделах не обнаружено. Для выяснения причин этого явления требуется проведение дополнительных исследований.

Список источников

1. Негроров, С. О. Экологический словарь / С. О. Негроров, Ю. Я. Филоненко. – Липецк: Липец. эколого-гуманитар. ун-т, 2001. – 125 с. – ISBN 5-900037-26-6.
2. Булыгин, Н. Е. Дендрология / Н. Е. Булыгин. – Ленинград: Агропромиздат, 1991. – 352 с. – ISBN 5-10-001679-5.
3. Федоров, Е. А. Особенности селекционного фонда пород лесобразователей и перспективы генетического улучшения лесов Калининградской области / Е. А. Федоров, В. А. Титов, Е. Б. Любимцев // Интродукция, акклиматизация и культивация растений: сб. науч. тр. / Калинингр. гос. ун-т. – Калининград: Изд-во Калинингр. гос. ун-та, 1998. – С. 31–35. – ISBN 5-88874-098-5.
4. Снешкене, В. Болезни лиственницы (*Larix Mill.*) в Литве / В. Снешкене // Проблемы лесной фитопатологии и микологии: материалы IX Междунар. конф., посвященной 90-летию со дня рождения проф. Н. И. Федорова (Минск, 19–24 октября 2015 г.) / Минск: Москва: Петрозаводск: Изд-во БелГТУ, 2015. – С. 198–201.
5. Sander, V. H. History and results of the introduction of alien coniferous trees to the Forestry of Russian Baltic Provinces Estland and Livonia up to 1918 / V. H. Sander, T. Meikar // Allgemeine Forst und Jagdzeitung. – 2007. – P. 189–196.
6. Природа Калининградской области. Старые парки и растения – региональные памятники природы / сост. В. А. Медведев. – Калининград: Исток, 2017. – 104 с. – ISBN 978-609-8180-28-2.
7. Борисов, В. А. Охраняемые природные территории мира: Национальные парки, заповедники, резерваты / В. А. Борисов, Л. С. Белоусова, А. А. Винокуров. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 310 с.
8. Моисеев, В. С. Таксация леса / В. С. Моисеев. – Ленинград: ЛТА, 1970. – 259 с.
9. Никифорчин, И. В. Таксация леса: учеб. пособие для студентов лесных вузов / И. В. Никифорчин, Л. С. Ветров, С. В. Вавилов. – Санкт-Петербург: Изд-во Политех. ун-та, 2011. – 240 с.
10. Мозолевская, Е. Г. Методы лесопатологического обследования очагов стволовых вредителей и болезней леса / Е. Г. Мозолевская, О. А. Катаев, Э. С. Соколова. – Москва: Лесная промышленность, 1984. – 152 с.
11. Алексеев, В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев / В. А. Алексеев // Лесоведение. – 1989. – № 4. – С. 51–57.
12. Мерзленко, М. Д. Лесокультурно-лесоводственные особенности уникального типа лесных культур лиственницы европейской / М. Д. Мерзленко, А. А. Коженкова, В. А. Брынцев. – Текст: электронный // Вестник АГАУ. – 2016. – № 12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lesokulturno-lesovodstvennye>

osobennosti-unikalnogo-tipa-lesnyh-kultur-listvennitsy-evropeyskoy (дата обращения: 26.03.2025).

13. Об утверждении Правил лесовосстановления: Приказ М-ва природных ресурсов Российской Федерации от 16 июля 2007 г. № 183 (последняя ред. от 05 ноября 2013 г.) // КонтурНорматив: офиц. сайт. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=224952> (дата обращения: 11.05.2025).

14. Molla, I. Investigation of post-fire natural regeneration in forest plantations of *Pinus sylvestris* and *Larix decidua* on the Northern slopes of Rila mountain / I. Molla, E. Velizarova // J. BioSci. Biotechnol. – 2017. – P. 89–95.

15. Tiebel, K. Global warming could shorten the seed lifespan of pioneer tree species and thus natural regeneration window of damaged areas / K. Tiebel, J. Dahlmann, A. Karge // European Journal of Forest Research. – 2024. – V. 143. – P. 437–450.

16. Land-use history and succession of *Larix decidua* in the Southern Alps of Italy—An essay based on a cultural history study of Roswitha Asche / S. E. Detlef, E.-D. Schulze, G. Mischì [et al.] // Flora. – 2007. – V. 202. – N 8. – P. 705–713.

17. Investigations on spatial heterogeneity of humus forms and natural regeneration of Larch (*Larix decidua* Mill.) and Swiss Stone Pine (*Pinus cembra* L.) in an alpine timberline ecotone / B. Hiller, A. Mütterthies, F.-L. Holtmeier, G. Broll // Geographica Helvetica. – 2002. – P. 81–90.

18. Качанова, Ю. П. Исследование особенностей семеношения лиственниц в условиях Северо-Запада России / Ю. П. Качанова. – Текст: электронный // Современные научные исследования и инновации: электронный научный журнал. – 2017. – № 5. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2017/05/82548> (дата обращения: 13.05.2025).

References

1. Negrobov S. O., Filoneko Yu. Ya. *Ekologicheskiy slovar'* [Ecological dictionary]. Lipetsk, Lipets. ekologo-gumanitar. un-t, 2001, 125 p.

2. Bulygin N. E. *Dendrologiya* [Dendrology]. Leningrad, Agropromizdat Publ., 1991, 352 p.

3. Fedorov E. A., Titov V. A., Lyubimtsev E. B. Osobennosti selektsionnogo fonda porod lesoobrazovateley i perspektivy geneticheskogo uluchsheniya lesov Kaliningradskoy oblasti [Features of the breeding stock of forest-forming breeds and prospects for genetic improvement of forests in the Kaliningrad region]. *Introduktsiya, akklimatizatsiya i kul'tivatsiya rasteniy: sb. nauch. tr.* Kaliningr. gos. un-t, Kaliningrad, Kaliningr. gos. un-t Publ., 1998. pp. 31–35.

4. Sneshkene V. Bolezni listvennitsy (*Larix* Mill.) v Litve [Diseases of larch (*Larix* Mill.) in Lithuania]. *Problemy lesnoy fitopatologii i mikologii: materialy IX Mezhdunar. konf., posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya prof. N. I. Fedorova (Minsk, 19–24 oktyabrya 2015 g.)* [Problems of forest phytopathology and mycology: proc. IX Intern. conf., dedicated to the 90th anniversary of the birth of Professor N. I. Fedorov (Minsk, 19–24 October 2015)]. Minsk, Moscow, Petrozavodsk, BelGTU Publ., 2015, pp. 198–201.

5. Sander V. H., Meikar T. History and results of the introduction of alien coniferous trees to the Forestry of Russian Baltic Provinces Estland and Livonia up to 1918. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*. 2007. P. 189–196.
6. *Priroda Kaliningradskoy oblasti. Starye parki i rasteniya – regional'nye pamyatniki prirody* [Nature of the Kaliningrad region. Old parks and plants are regional natural monuments]. Sost. V. A. Medvedev. Kaliningrad, Istok Publ., 2017, 104 p.
7. Borisov V. A., Belousova L. S., Vinokurov A. A. *Okhranyaemye prirodnye territorii mira. Natsional'nye parki, zapovedniki, rezervaty* [Protected natural areas of the world: National parks, nature reserves, reserves]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985, 310 p.
8. Moiseev V. S. *Taksatsiya lesa* [Forest taxation]. Leningrad, LTA Publ., 1970, 259 p.
9. Nikiforchin I. V., Vetrov L. S., Vavilov S. V. *Taksatsiya lesa: ucheb. posobie dlya studentov lesnykh vuzov* [Forest taxation: ucheb. posobie dlya studentov lesnykh vuzov]. Saint-Petersburg, Politekh. un-t Publ., 2011, 240 p.
10. Mozolevskaya E. G., Kataev O. A., Sokolova E. S. *Metody lesopatologicheskogo obsledovaniya ochagov stvolovykh vrediteley i bolezney lesa* [Methods of forest pathology examination of foci of stem pests and forest diseases]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984, 152 p.
11. Alekseev V. A. Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev [Diagnostics of the vital condition of trees and stands]. *Lesovedenie*. 1989, no. 4, pp. 51–57.
12. Merzlenko M. D., Kozhenkova A. A., Bryntsev V. A. Lesokul'turno-lesovodstvennye osobennosti unikal'nogo tipa lesnykh kul'tur listvennitsy evropeyskoy [Forest cultural and forestry features of the unique type of European larch forest crops]. *Vestnik AGAU*, 2016, no. 12, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/lesokulturno-lesovodstvennye-osobennosti-unikalnogo-tipa-lesnykh-kulturn-listvennitsy-evropeyskoy> (accessed 26 March 2025).
13. Ob utverzhdenii Pravil lesovosstanovleniya: Prikaz M-va prirodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii ot 16 iyul'ya 2007 g. № 183 (poslednyaya red. ot 05 noyabrya 2013 g.) [On approval of the Rules of reforestation: Order of the dated 16 July 2007 N 183 (last revised on November 05, 2013)]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=224952> (accessed: 11 May 2025).
14. Molla I., Velizarova E. Investigation of post-fire natural regeneration in forest plantations of *Pinus sylvestris* and *Larix decidua* on the Northern slopes of Rila mountain. *J. BioSci. Biotechnol.* 2017. P. 89–95.
15. Tiebel K., Dahlmann J., Karge A. Global warming could shorten the seed lifespan of pioneer tree species and thus natural regeneration window of damaged areas. *European Journal of Forest Research*. 2024. V. 143. P. 437–450.
16. Detlef S. E., Schulze E.-D, Mischì G., Asche G., Börner A. Land-use history and succession of *Larix decidua* in the Southern Alps of Italy—An essay based on a cultural history study of Roswitha Asche. *Flora*. 2007. V. 202. N 8. P. 705–713.
17. Hiller B., Mütterthies A., Holtmeier F.-L., Broll G. Investigations on spatial heterogeneity of humus forms and natural regeneration of Larch (*Larix decidua* Mill.) and Swiss Stone Pine (*Pinus cembra* L.) in an alpine timberline ecotone. *Geographica Helvetica*. 2002. P. 81–90.

18. Kachanova Yu. P. Issledovanie osobennostey semenosheniya listvennits v usloviyakh Severo-Zapada Rossii [Investigation of the peculiarities of larch seed production in the conditions of the North-West of Russia]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2017, no. 5, available at: <https://web.snauka.ru/issues/2017/05/82548> (accessed: 13 May 2025).

Информация об авторах

С. А. Ермаков – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Агрономия»

И. В. Хусаинова – кандидат биологических наук, доцент кафедры «Агрономия»

П. С. Белоусова – аспирант кафедры «Агрономия и агроэкология»

Information about the authors

S. A. Ermakov – PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Agronomy

I. V. Khusainova – PhD in Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Agronomy

P. S. Belousova – postgraduate student of the Department of Agronomy and Agroecology

Статья поступила в редакцию 06.06.2025; одобрена после рецензирования 16.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

The article was submitted 06.06.2025; approved after reviewing 16.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.

Научная статья

УДК 504.064.2.001.18

DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-26-37

Экологическая оценка качества производственных стоков молокоперерабатывающих предприятий

Ольга Викторовна Ковалева

Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия
kovalevaov@gaus.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6833-4715>

Аннотация. На каждом производстве, занимающемся обработкой или переработкой материалов, необходимо предусматривать многоступенчатую очистку сточных вод. Это требование обусловлено тем, что неочищенные стоки, сбрасываемые в водоемы, наносят значительный вред экосистемам. В процессе сброса таких вод происходит резкое увеличение потребления кислорода, который необходим для биохимического окисления органических соединений, содержащихся в сточных водах. Многие из этих органических веществ находятся в связанном состоянии, что делает их расщепление сложным и трудоемким процессом. В данной работе на основе мониторинга сточных вод проведена экологическая оценка качества производственных стоков, которая поможет специалистам в принятии решений по намечаемой деятельности или выбора способов очистки сточных вод предприятия. В результате работы выявлена неоднородность сбрасываемых сточных вод в течение суток. В образующихся сточных водах при их транспортировании сетями водоотведения в поля и фильтрации протекают анаэробные, окислительно-деструктивные микробиологические и химические процессы, в результате которых происходит значительное превышение показателей по основным загрязняющим веществам. На изучаемых предприятиях отношение биохимического потребления кислорода за 5 суток к его химическому потреблению находится в пределах 0,40–0,56. Это говорит о том, что в воде содержатся вещества, которые легко поддаются биохимическому окислению, поэтому необходимо совершенствовать систему очистки сточных вод на предприятиях молокоперерабатывающей промышленности. При этом могут быть использованы биологические способы согласно справочника по наилучшим доступным технологиям, которые включают в себя дозированное введение микробиологических препаратов и дополнительную аэрацию, что позволит использовать поля фильтрации в качестве локальных очистных сооружений без больших капитальных вложений.

Ключевые слова: экологическая оценка, загрязняющие вещества, обработка молока, сточные воды, поля фильтрации, норматив качества.

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по заказу предприятия.

© Ковалева О. В., 2025

Для цитирования: Ковалева О. В. Экологическая оценка качества производственных стоков молокоперерабатывающих предприятий // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 26–37. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-26-37.

Original article

Environmental assessment of the quality of industrial effluents

Ol'ga V. Kovaleva

Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen', Russia

e-mail: kovalevaov@gaus.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6833-4715>

Abstract. At each production facility engaged in the processing or recycling of materials, it is necessary to provide for multi-stage wastewater treatment. This requirement is due to the fact that untreated wastewater discharged into water bodies causes significant harm to ecosystems. In the process of discharging such water, there is a sharp increase in oxygen consumption, which is necessary for the biochemical oxidation of organic compounds contained in wastewater. Many of these organic substances are in a bound state, which makes their decomposition a complex and labor-intensive process. In this work, based on wastewater monitoring, an environmental assessment of the quality of industrial wastewater has been carried out, which will help specialists in making decisions on the planned activity or choosing methods for treating enterprise wastewater. As a result of the work, heterogeneity of discharged wastewater during the day has been revealed. In the resulting wastewater, when they are transported through drainage networks to filtration fields, anaerobic processes, oxidative-destructive microbiological and chemical processes occur, resulting in a significant excess of the main pollutants. At the enterprises under study, the ratio of biochemical oxygen consumption for 5 days to chemical oxygen consumption is within 0.40–0.56, which indicates that the water contains easily oxidizable substances that are subject to biochemical oxidation. Therefore, it is necessary to improve the wastewater treatment system at enterprises of the milk processing industry. In this case, biological methods can be used, according to the reference book on the best available technologies, which include the metered introduction of microbiological preparations and additional aeration, which will allow the use of filtration fields as local treatment facilities without large capital investments.

Keywords: environmental assessment, pollutants, milk treatment, wastewater, filtration fields, quality standard.

Funding: the work has been carried out as part of the implementation of research and development work commissioned by the enterprise.

For citation: Kovaleva O. V. Environmental assessment of the quality of industrial effluents. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025; (78):26–37. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-26-37.

ВВЕДЕНИЕ

Негативное воздействие агропромышленного комплекса (АПК) на окружающую среду – сложная проблема, определяемая множеством взаимосвязанных факторов. Ключевыми из них являются, во-первых, прямое вытеснение природ-

ных экосистем в результате расширения сельскохозяйственных угодий, строительства инфраструктуры и прокладки коммуникаций. Это приводит к утрате биоразнообразия, фрагментации местообитаний и нарушению естественных природных процессов. Во-вторых, значительное воздействие оказывают антропогенные загрязнения, связанные с деятельностью АПК. Выбросы парниковых газов (метан от животноводства, закись азота от применения удобрений) также существенно влияют на изменение климата. Загрязнение поверхностных и подземных вод сточными водами с предприятий, содержащими органические вещества, нитраты и фосфаты, приводит к эвтрофикации водоемов, гибели водных организмов и ухудшению качества питьевой воды [1].

Постановление Правительства РФ № 2398 от 31 декабря 2020 г. ввело категорирование объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (НВОС), разделив их на четыре класса в зависимости от степени и масштаба воздействия. Эта классификация позволяет Росприроднадзору эффективнее распределять ресурсы контроля и надзора. Объекты I категории, характеризующиеся наибольшим уровнем НВОС (например, крупные животноводческие комплексы, заводы по производству удобрений), подвергаются самым строгим экологическим ограничениям и подлежат более частому и тщательному мониторингу. К объектам IV категории относятся предприятия с минимальным негативным воздействием на окружающую среду, для которых требования значительно смягчены.

Однако даже для таких объектов существуют определенные экологические нормативы, соблюдение которых обязательно, сброс же на рельеф строго запрещен законодательством. Важно отметить, что эффективное снижение негативного воздействия предприятий агропромышленного комплекса на окружающую среду требует комплексного подхода, включающего внедрение экологических технологий, применение биопрепаратов вместо химических пестицидов и гербицидов, рациональное использование земель, а также повышение экологической грамотности сельхозпроизводителей. Только совместными усилиями государственных органов, бизнеса и общественности можно добиться существенного улучшения экологической ситуации в агропромышленном секторе. Ситуация постоянно анализируется и корректируется, что требует постоянного совершенствования законодательства и внедрения новых технологий в сельском хозяйстве [2, 3]

Согласно статистическим данным, в некоторых отраслях пищевой и перерабатывающей промышленности сброс сточных вод достаточно велик. Так, например, наибольшая доля сбросов (млн м³) принадлежит предприятиям пивоваренной промышленности (33,7), молочной (25–30), мясной (18–30), масложировой (22,2), хлебопекарной (14,8).

На каждом производстве, занимающемся обработкой или переработкой материалов, необходимо предусматривать многоступенчатую очистку сточных вод. Это требование обусловлено тем, что неочищенные стоки, сбрасываемые в водоемы, наносят значительный вред экосистемам. В процессе сброса таких вод происходит резкое увеличение потребления кислорода, который необходим для биохимического окисления органических соединений, содержащихся в сточных водах. Многие из этих органических веществ находятся в связанном состоянии, что делает их расщепление сложным и трудоемким процессом. В результате, если сточные воды не проходят должную очистку, это может привести к гипоксии во-

доемов, что негативно сказывается на жизни водных организмов. Например, рыбы и другие водные существа начинают испытывать недостаток кислорода, что может привести к их гибели и нарушению экосистемы в целом. Кроме того, сточные воды могут содержать опасные химические вещества, такие как тяжелые металлы, пестициды и другие токсичные соединения, которые могут накапливаться в организмах водных животных, что в конечном итоге отражается на пищевой цепи и может негативно сказаться на здоровье человека. По этой причине важно внедрять современные технологии очистки сточных вод, такие как биологические и физико-химические методы, которые позволяют эффективно удалять как органические, так и неорганические загрязнители. Например, использование биореакторов может значительно повысить степень очистки, позволяя микроорганизмам эффективно разлагать сложные органические молекулы. Таким образом, многоступенчатая очистка сточных вод не только защищает водные ресурсы, но и способствует устойчивому развитию производств, минимизируя их негативное влияние на окружающую среду. Важно, чтобы все предприятия, особенно те, которые имеют дело с потенциально опасными отходами, следовали строгим экологическим стандартам и активно внедряли инновационные решения для очистки сточных вод [4, 5].

В сфере обработки молочных продуктов обычно образуются 2 категории отходов, причем примерно 2/3 части из них представляют собой производственные остатки, появляющиеся во время превращения сырого молока с высокой концентрацией протеина и липидов, а оставшаяся 1/3 приходится на коммунальные и бытовые отходы. Помимо прочего, в канализационных водах выявляются хлориды, искусственные моющие средства и соединения фосфора. Эти компоненты присутствуют в чистящих и антисептических препаратах.

Чем больше мощность работы молокоперерабатывающего завода, тем ниже удельное потребление воды, но концентрация загрязняющих веществ (ЗВ) выше. Так, в среднем на 1 тонну полученной продукции удельная норма расхода воды составляет 3,5–5 м³. Согласно технологическим нормативам водоотведения, на обработку 1 т молока-сырья степень загрязнения по химическому потреблению кислорода (ХПК) составит 10–15 кг. Более точные данные содержания ЗВ будут зависеть от конкретного производителя и вида производимых продуктов [6, 7, 8]. В настоящее время предприятия не проводят предварительную оценку качества производственных сточных вод и, приобретая, монтируя стандартные решения локальных очистных сооружений в процессе эксплуатации, не справляются с функцией очистки.

Целью данной работы является экологическая оценка качества производственных стоков на примере молокоперерабатывающих предприятий.

Экологическую оценку (ЭО) с подробной характеристикой видов и объемов загрязняющих веществ проводят для выбора способа обработки стоков, поскольку выбор того или иного решения по очистке сточных вод требует точных расчетов и обоснования для дальнейшего беспрепятственного прохождения государственной экологической экспертизы [9, 10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Для проведения экологической оценки сточных вод были выбраны очистные сооружения (поля фильтрации) сточных вод молокоперерабатывающих предприятий Тюменской области, расположенных в разных районах. В ходе их производственной деятельности образуются сточные воды, которые проходят очистку в полях фильтрации. Оценка проводилась на основании данных мониторинга предприятий в период с 2017 по 2024 гг.

Для ЭО проводился систематический анализ только тех показателей, информация о которых необходима для принятия решений на производстве (рис. 1). Для этого был разработан и утвержден ежегодный календарный план-график проведения работ (места отбора проб, точки отбора, даты, основные параметры, порядок документирования и др.). Лабораторные исследования проводились на базе Агробιοтехнологического центра Института фундаментальных и прикладных агробιοтехнологий ИФиПА ГАУ Северного Зауралья по стандартным методикам.

Оценочные показатели качества вод были взяты согласно ГОСТ Р 58556-2019 «Оценка качества воды водных объектов с экологических позиций».



Рис. 1. Перечень показателей, подлежащих экологической оценке

Fig. 1. The list of indicators subject to environmental assessment

Пробы отбирались непосредственно в накопителях на территории предприятий (септик, канализационные насосные станции) и в полях фильтрации согласно ГОСТ Р 59024-2020. Для проведения оценки в данной работе были выбра-

ны максимальные значения данных мониторинга за 6 лет по аналогичным периодам двух молокоперерабатывающих предприятий.

Выбор предприятий был основан на однотипности стоков и использования полей фильтрации в качестве биологических очистных сооружений.

На предприятии № 1 отведение сточных вод производится по заглубленной системе канализации в подземные железобетонные отстойники (септик 1 и септик 2) и далее в поля фильтрации (состоящие из отдельно расположенных карт с обваловкой) вывозится ассенизаторскими машинами. Сброс осуществляется круглый год.

На предприятии № 2 отведение сточных вод производится в канализационные насосные станции (КНС 1, КНС 2) круглогодично. От каждой КНС проложено по одной трубе, по которой происходит сброс воды в приемную емкость очистных сооружений на расстояние 1500 м, расположенную перед полями фильтрации (рис. 2).

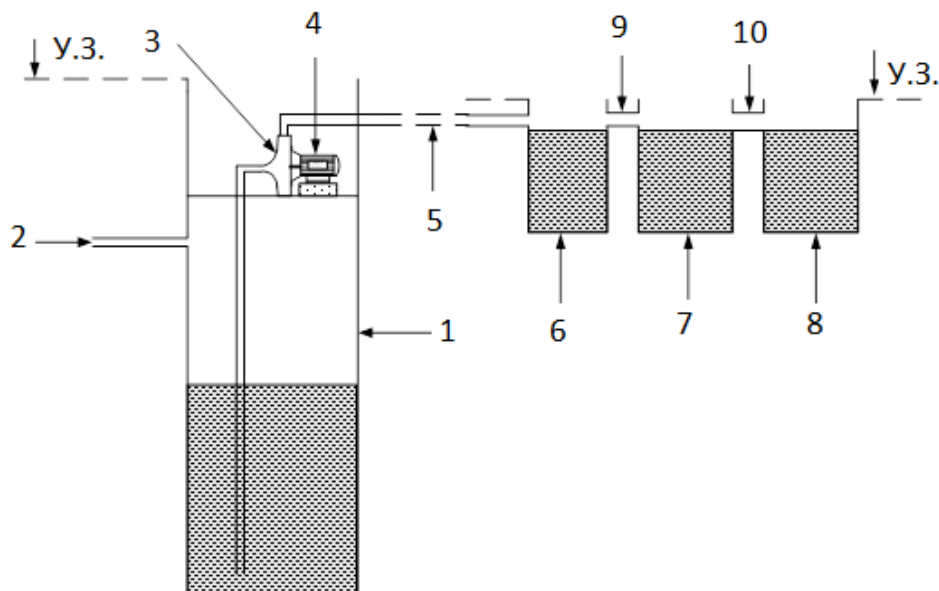


Рис. 2. Схема сбора и сбрасывания отработанных сточных вод предприятия № 2

1 – канализационная насосная станция; 2 – трубопровод слива отработанной воды с молокоперерабатывающих цехов; 3 – насос; 4 – электродвигатель; 5 – трубопровод сброса сточных вод в приемную емкость; 6 – приемная емкость; 7, 8 – карты полей фильтрации; 9, 10 – трубы перелива между картами

Fig. 2. Scheme of collection and discharge of waste water from the enterprise No. 2
1 – sewage pumping station; 2 – waste water discharge pipeline from milk processing plants; 3 – pump; 4 – electric motor; 5 – sewage discharge pipeline to the receiving tank; 6 – receiving tank; 7, 8 – maps of filtration fields; 9, 10 – overflow pipes between maps

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Контроль загрязнения водных объектов достаточно затруднителен, поскольку оценка ведется, как правило, по нескольким точкам сброса в разные временные промежутки, достаточно сильно отличающиеся по происхождению, составу и формам загрязнителей [11, 12]. Помимо этого в последовательности от «точки загрязнения до водного объекта» существуют дополнительные элементы разнообразной функциональной структуры, обычно представляющие собой местные системы очистки, такие как поля фильтрации, которые могут как способствовать распаду загрязнителей с их последующей фильтрацией или рассеянием, так и служить дополнительным источником вторичных загрязнений [13, 14, 15].

На основании проведенного анализа, исходя из неравномерной суточной нагрузки по обработке молока, коэффициент отношения максимального к среднему часовому расходу воды выдерживается на уровне 1,5–2,5, при этом показатели содержания загрязняющих веществ значительно разнятся (табл. 1).

Таблица 1. Состав сточных вод молокоперерабатывающих предприятий
Table 1. Composition of wastewater from milk processing plants

Показатель	Предприятие № 1		Предприятие № 2		Норматив качества ГОСТ Р 58556-2019
	проба № 1 септик 1	проба № 2 септик 2	проба № 3 КНС 1	проба № 4 КНС 2	
Массовая доля сульфатов, мг/дм ³	935,5	1423,6	441,7	212,4	–
Массовая доля жира, мг/дм ³	22,5	66,35	35,4	9,15	–
ХПК, мгО/дм ³	2777	5020	604	1148	71–100
БПК ₅ , мг/дм ³	1204	1985	337	540	16–25
Фосфаты, мг/дм ³	90,65	147,25	609,9	767,2	1,1–2,0
Взвешенные вещества, мг/дм ³	662,6	1143	239	2685,5	5,1–10
Аммонийный азот, мг/дм ³	20,9	12,69	10,42	19,07	3,0–5,0
Нитраты, мг/дм ³	634,8	765,9	153,6	484,1	11–20
Хлориды, мг/дм ³	835,6	956,5	751,9	656,2	–
ХПК : БПК ₅	2,3	2,5	1,8	2,1	–
БПК ₅ : ХПК	0,43	0,40	0,56	0,47	–

Примечание: при знаке «–» значение не нормируется данным документом.

Учитывая ассортимент конкретных молочных заводов, по фактическому содержанию в сточной воде определили соотношение биохимического потребления кислорода за 5 сут (БПК₅) к химическому потреблению кислорода (ХПК). Как правило, по справочным данным средний показатель составляет от 1,2 до 1,55. Норма соотношения, установленная Постановлением Правительства РФ № 644, составляет не более 2,5; по всем пробам этот показатель не превышал норматив. На предприятиях № 1 и № 2 отношение БПК₅ : ХПК находится в пределах

0,40–0,56, это говорит о том, что в воде содержатся вещества, которые легко поддаются биохимическому окислению.

Сравнение с нормативами качества воды поверхностных водотоков с экологической точки зрения показало, что значительные превышения наблюдаются по всем без исключения показателям. Высокое содержание фосфатов, нитратов и хлоридов указывает на то, что сточные воды содержат значительное количество чистящих и дезинфицирующих средств.

При прохождении через очистные сооружения (поля фильтрации) в разные сезоны года показатели меняются (табл. 2).

Таблица 2. Показатели состава сточных вод полей фильтрации
Table 2. Indicators of the composition of wastewater from filtration fields

Показатель	Предприятие № 1		Предприятие № 2		Гигиенический норматив*
	май	ноябрь	май	ноябрь	
Массовая доля сульфатов, мг/л	435,2	468,6	310,5	153	500
Массовая доля жира, мг/дм ³	126,0	27,0	90	22,3	0
ХПК, мг/дм ³	1232,0	1986	814	2000	30,0
БПК ₅ , мг/дм ³	687,0	950	400	732	4,0
Фосфаты, мг/дм ³	6,53	69,8	87,6	102	0,2
Взвешенные вещества, мг/дм ³	462,5	754,7	422,4	112	0,75 (+0,25 к фону болота)
Аммонийный азот, мг/дм ³	6,4	68,6	13,2	65,1	1,5
Нитраты, мг/дм ³	11,0	9,8	1,04	1,8	45,0
Хлориды, мг/дм ³	0,46	1,9	69,5	61,1	350,0

Примечание. * Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, в воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, в воде плавательных бассейнов, аквапарков. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 28.01.2021 г. № 2.

Как свидетельствуют данные табл. 2, сточная вода, находящаяся на очистных сооружениях, также нестабильна. Это обусловлено преобладанием анаэробных процессов в сточных водах при их транспортировании сетями водоотведения и преобладанием окислительно-деструктивных микробиологических и химических процессов в биологических очистных сооружениях. Превышение в сравнении с гигиеническим нормативом наблюдается практически по всем показателям, кроме сульфатов, нитратов и хлоридов.

Так, содержание ХПК на предприятиях № 1 и № 2 превышало норматив в мае в 41 и 27 раз, в ноябре в 66,2 и 66,7 раза соответственно, биологическое потребление кислорода – в сотни раз. Аммонийный азот также превысил гигиениче-

ский норматив в мае в 4,3 и 8,8 раз, в ноябре в 45,7 и 43,4 раза соответственно на предприятии № 1 и № 2.

Сравнение сточных вод после прохождения очистки в полях фильтрации с водой природных водоемов представлено в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение сточных вод полей фильтрации («на выходе») с водой природных водных объектов

Table 3. Comparison of wastewater from filtration fields ("at the outlet") with water from natural water bodies

Показатель	Предприятие № 1	Предприятие № 2	Природный водоем
Массовая доля сульфатов, мг/дм ³	385,0	80,3	
Массовая доля жира, мг/дм ³	1,2	83,7	от сотых долей до нескольких мг
ХПК, мгО/дм ³	176	270,5	от долей до десятков мг
БПК ₅ , мг/дм ³	20,5	103,6	0,5–4
Фосфаты, мг/дм ³	65,3	394,7	0,005–0,2
Взвешенные вещества, мг/дм ³	79,0	250,2	3–14
Аммонийный азот, мг/дм ³	>50,0	35,4	0,28–0,3
Нитраты, мг/дм ³	8,9	1,9	–
Хлориды, мг/дм ³	1,6	64,4	–

При анализе представленных данных видим, что показатели сточных вод обоих предприятий значительно превышают содержание их в природных водоемах, а значит, необходимо использовать дополнительные способы доочистки, к тому же на сегодняшний день нет ни одного нормативного документа, который бы регламентировал работу полей фильтрации как очистных сооружений в том виде, в котором они существуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За весь период наблюдений в сточных водах молокоперерабатывающих предприятий было выявлено, что качество образуемых сточных вод нестабильно даже в пределах суток и зависит от вида производимой технологической операции. При этом отмечаются превышения нормативов, предъявляемых при проведении экологической оценки по специально выбранным оценочным показателям: взвешенные вещества, нитраты, БПК₅, ХПК, фосфаты, аммонийный азот.

Поэтому в целях совершенствования очистки сточных вод на предприятиях молокоперерабатывающей промышленности необходимо использовать биологические способы очистки согласно справочника по наилучшим доступным технологиям, которые включают в себя дозированное введение микробиологических препаратов и дополнительную аэрацию, что позволит использовать поля фильтрации в качестве локальных очистных сооружений без больших капитальных вложений. Эффективность использования подобных способов очистки подтвер-

ждается и отношением БПК₅ : ХПК, которое составляет 0,40–0,56. Это говорит о том, что биохимическое окисление органических соединений, находящихся в сточной воде, будет происходить быстрее.

Список источников

1. Wang, Y. B. Probiotics in Aquaculture: Challenges and Outlook / Y. B. Wang, J. R. Li, J. Lin. – Florida Institute of Technology Aquaculture (Elsevier), 2008. – V. 281. – P. 1–4.
2. Экологическое состояние пруда Шенфлиз как пример характеристики водоема карьерного типа в условиях рекреационной нагрузки / Е. А. Севостьянова, А. С. Меньшенин, О. В. Казимирченко [и др.] // Известия КГТУ. – 2023. – № 71. – С. 56–70.
3. Ковалева, О. В. Влияние биопрепаратов на состав осадка сточных вод молокоперерабатывающих предприятий / О. В. Ковалева, Н. М. Костомахин, Е. Я. Лебедев // Аграрная наука. – 2020. – № 5. – С. 98–101.
4. Bioremediation of heavy metals by growing hyperaccumulaor endophytic bacterium Bacillus sp. L14 / H. Guo, L. Shenglian, C. Liang [et al.] // Bioresour. Technol. – 2010. – V. 101. – N 22. – P. 8599.
5. Защита водных экосистем от загрязнений с селитебных территорий / О. Р. Ильясов, О.В. Ковалева, О.П. Неверова [и др.] // Российский научный вестник. – 2025. – № 1. – С. 76–78.
6. Полетаева, М. А. Пути решения проблемы очистки сточных вод молочного предприятия / М. А. Полетаева, О. С. Осадчая, Н. А. Рузаева // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 273–275.
7. Патент № 2770056. Способ микробиологической очистки сточных вод прудов-накопителей сельскохозяйственных предприятий: № 2021100560: заявл. 13.01.2021 : опубл. 14.04.2022 / Ковалева О. В., Санникова Н. В., Шулепова О. В.; ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья». – 8 с. : ил. – Текст: непосредственный.
8. Богатырев, К. С. Экологическое состояние поверхностных водных объектов под воздействием комплексов тепличных хозяйств / К. С. Богатырев, А. Г. Корнилов // Геология, география и глобальная энергия. – 2020. – № 4 (79). – С. 143–150.
9. Демидова, С. Е. Устойчивое развитие и экологическая безопасность в аспекте «зеленой» проблематики / С. Е. Демидова, М. М. Балог, В. В. Троян // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. – 2020. – № 5. – С. 87–107.
10. База данных RU 2022623299. Данные количественного химического анализа водных объектов: № 2022622968: заявл. 15.11.2022; опубл. 08.12.2022 Бюл. № 12. / О. В. Ковалева, В. В. Пунегова; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья». – 1 с.
11. Natural and synthetic solid carriers in flow module for microbial sewage filtrate purification / O. V. Tashyrev, I. B. Sioma, G. O. Tashyreva, V. M. Novorukha // Biotechnologia Acta. – 2018. – V. 11. – N 6. – P. 73–81.
12. Рудский, В. В. Ресурсоведение: учебное пособие / В. В. Рудский. – Смоленск: Издательство СГУ, 2008. – 143 с. – ISBN 978-5-7389-1724-0.

13. Щур, А. В. Влияние различных уровней агроэкологических нагрузок на биохимические характеристики почвы / А. В. Щур, Д. В. Виноградов, В. П. Валько // Юг России: экология, развитие. – 2016. – Т. 11. – № 4. – С. 139–148.

14. Агроэкологическая эффективность использования осадка сточных вод и вермикомпостов в агроценозе овса посевного / Т. В. Хабарова, Д. В. Виноградов, Б. И. Кочуров [и др.] // Юг России: экология, развитие. – 2018. – Т. 13. – № 2. – С. 132–143.

15. Виноградов, Д. В. Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур / Д. В. Виноградов, М. П. Макарова, Т. В. Зубкова // Теоретическая и прикладная экология. – 2023. – № 1. – С. 93–100.

References

1. Wang Y. B., Li J. R., Lin J. Probiotics in Aquaculture: Challenges and Outlook. Florida Institute of Technology Aquaculture (Elsevier). 2008. V. 281. P. 1–4.

2. Sevost'yanova E. A., Men'shenin A. S., Kazimirchenko O. V. [i dr.] *Ekologicheskoe sostoyanie pruda SHenfliz kak primer kharakteristiki vodoema kar'ernogo tipa v usloviyakh rekreatsionnoy nagruzki* [The ecological state of the Schoenfleeze pond as an example of the characteristics of a quarry-type reservoir under conditions of recreational load]. *Izvestiya KGTU*, 2023, no. 71, pp. 56–70.

3. Kovaleva O. V., Kostomakhin N. M., Lebed'ko E. Ya. Vliyanie biopreparatov na sostav osadka stochnykh vod molokopererabatyvayushchikh predpriyatiy [The effect of biological products on the composition of sewage sludge from dairy processing plants]. *Agrarnaya nauka*, 2020, no. 5, pp. 98–101.

4. Guo H., Shenglian L., Liang C. [et al.] Bioremediation of heavy metals by growing hyperaccumulaor endophytic bacterium *Bacillus* sp. L14. *Bioresour. Technol.* 2010. V. 101. N 22. P. 8599.

5. Il'yasov O. R., Kovaleva O. V., Neverova O. P. [et al.] Zashchita vodnykh ekosistem ot zagryazneniy s selitebnykh territoriy [Protection of aquatic ecosystems from pollution from residential areas]. *Rossiyskiy nauchnyy vestnik*, 2025, no. 1, pp. 76–78.

6. Poletaeva M. A., Osadchaya O. S., Ruzaeva N. A. Puti resheniya problemy ochistki stochnykh vod molochnogo predpriyatiya [Ways to solve the problem of wastewater treatment at a dairy enterprise]. *Polzunovskiy vestnik*, 2013, no. 1, pp. 273–275.

7. Kovaleva O. V., Sannikova N. V., SHulepova O. V. Patent № 2770056. *Sposob mikrobiologicheskoy ochistki stochnykh vod prudov-nakopiteley sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy* [Method of microbiological wastewater treatment of storage ponds of agricultural enterprises]. № 2021100560, zayavl. 13.01.2021; opubl. 14.04.2022. Zayavitel' FGBOU VO "Gosudarstvennyy agrarnyy universitet Severnogo Zaural'ya". 8 p.

8. Bogatyrev K. S., Kornilov A. G. Ekologicheskoe sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov pod vozdeystviem kompleksov teplichnykh khozyaystv [Ecological condition of surface water bodies under the influence of greenhouse complexes]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, 2020, no. 4 (79), pp. 143–150.

9. Demidova S. E., Balog M. M., Troyan V. V. Ustoychivoe razvitie i ekologicheskaya bezopasnost' v aspekte "zelenoy" problematiki [Sustainable development and environmental safety in the aspect of "green" issues]. *ETAP: ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika*, 2020, no. 5, pp. 87–107.
10. Kovaleva O. V., Punegova V. V. Baza dannykh RU 2022623299. Dannye kolichestvennogo khimicheskogo analiza vodnykh ob"ektov [Quantitative chemical analysis data of water bodies: database]. № 2022622968, zayavl. 15.11.2022; opubl. 08.12.2022. Byul. № 12. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Gosudarstvennyy agrarnyy universitet Severnogo Zaural'ya". 1 p.
11. Tashyrev O. B., Sioma I. B., Tashyreva G. O., Hovorukha V. M. Natural and synthetic solid carriers in flow module for microbial sewage filtrate purification. *Biotechnologia Acta*. 2018. V. 11. N 6. P. 73–81.
12. Rudskiy V. V. *Resursovedenie: uchebnoe posobie* [Resource science: a textbook]. Smolensk, Izdatel'stvo SGU, 2008, 143 p. ISBN 978-5-7389-1724-0.
13. Shchur A. V., Vinogradov D. V., Val'ko V. P. Vliyanie razlichnykh urovney agroekologicheskikh nagruzok na biokhimicheskie kharakteristiki pochvy [The influence of various levels of agroecological loads on the biochemical characteristics of the soil]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 139–148.
14. Khabarova T. V., Vinogradov D. V., Kochurov B. I. [et al.]. Agroekologicheskaya effektivnost' ispol'zovaniya osadka stochnykh vod i vermikompostov v agrotsenoze ovsa posevnogo [Agroecological efficiency of the use of sewage sludge and vermicompost in the agrocenosis of oats]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 132–143.
15. Vinogradov D. V., Makarova M. P., Zubkova T. V. Primenenie udobritel'nykh smesey na osnove osadkov stochnykh vod i tseolita v agrotsenozakh maslichnykh kul'tur [Application of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in agrocenoses of oilseeds]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2023, no. 1, pp. 93–100.

Информация об авторе

О. В. Ковалева – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры экологии и рационального природопользования, директор Института фундаментальных и прикладных агробиотехнологий

Information about the author

O. V. Kovaleva – PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Ecology and Rational Nature Management, Director of the Institute of Fundamental and Applied Agrobiotechnologies

Статья поступила в редакцию 21.05.2025; одобрена после рецензирования 22.05.2025; принята к публикации 30.05.2025.

The article was submitted 21.05.2025; approved after reviewing 22.05.2025; accepted for publication 30.05.2025.

Научная статья

УДК 574.2: 574.5: 595.36

DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-38-52

**Анализ состава пищи антарктического криля (*Euphausia superba*)
Антарктической части Атлантики**

Александра Дмитриевна Колесникова^{1□}, Светлана Александровна Судник²

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

¹kolesnikova_aleksasha@bk.ru

²svetlana.sudnik@klgtu.ru

Аннотация. В работе представлено комплексное исследование питания антарктического криля (*Euphausia superba*, Dana 1850), представляющего собой важный объект отечественного промысла в районах бассейна Пауэрла и пролива Брансфилд (Антарктического сектора Атлантического океана). В результате комплексного лабораторного анализа исследован материал, включающий 12 проб *E. superba*, общее количество особей составило 2128 экз. (из них 49 % – ювенильные особи, 22 % – самцы, 29 % – самки). На основе анализа 545 желудков криля (все желудки, в которых так или иначе присутствовала пища) летом 2020 г. выявлены основные компоненты рациона: перидиниевые (р. *Peridinium spp.*, частота встречаемости 78 %) и диатомовые (р. *Fragilaria*, р. *Fragilariopsis* и р. *Synedra*) водоросли, веслоногие раки (р. *Calanus sp.*) и планктонные фораминиферы (р. *Foramenifera*). Особое внимание уделено феномену сезонного каннибализма в период массовой линьки криля (у 17 % рачков обнаружены многочисленные остатки тел родственных особей). Первая оценка связи степени активности питания *E. superba*, стадии линьочного цикла, полового состава и репродуктивного состояния самцов и самок не выявила выраженной связи этих параметров, отмечена общая низкая активность питания особей вида. Исследование подтвердило полифагический характер питания *E. superba*, который активно потребляет доступные фитопланктонные водоросли, дополняя рацион высококалорийной животной пищей (зоопланктоном и родственными особями *E. superba*). Полученные данные расширяют понимание пищевых предпочтений антарктического криля в различные периоды его жизненного цикла.

Ключевые слова: антарктический криль, *Euphausia superba*, состав пищи, стратегии питания, бассейн Пауэрла, пролив Брансфилд, полифаг.

Благодарности: авторы искренне благодарят сотрудников Института океанологии имени П. П. Ширшова РАН за предоставленный материал. Особая благодарность профессору Калининградского государственного технического университета Рудольфу Николаевичу Буруковскому за поддержку в исследовании пищевого состава желудков антарктического криля *E. superba*.

Для цитирования: Колесникова А. Д., Судник С. А. Анализ состава пищи антарктического криля (*Euphausia superba*) Антарктической части Атлантики // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 38–52. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-38-52.

Original article

**Food composition analysis of Antarctic krill (*Euphausia superba*)
from the Antarctic part of the Atlantics**

Aleksandra D. Kolesnikova¹, Svetlana A. Sudnik²

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

¹kolesnikova_aleksasha@bk.ru

²svetlana.sudnik@klgtu.ru

Abstract. This paper presents a comprehensive study of Antarctic krill (*Euphausia superba*, Dana 1850) nutrition, which is an important object of domestic fishery in the areas of the Powell Basin and Bransfield Strait (Antarctic sector of the Atlantic Ocean). As a result of complex laboratory analysis, the material including 12 samples of *E. superba* was evaluated, the total number of individuals was 2128 (of which 49% were juveniles, 22% males and 29% females). Based on the analysis of 545 krill stomachs (all stomachs in which food was present in one way or another) in summer 2020, the main diet components were identified: peridinium (g. *Peridinium* spp., frequency of occurrence 78%) and diatom (g. *Fragilaria*, g. *Fragilariopsis* and g. *Synedra*) algae, paddlefish (g. *Calanus* sp.) and planktonic foraminifera (g. *Foramenifera*). Particular attention was paid to the phenomenon of seasonal cannibalism during the mass moult of krill (17% of the crustaceans were found to have numerous remains of the bodies of related individuals). The first assessment of the relationship between the degree of feeding activity of *E. superba*, larval cycle stage, sex composition and reproductive state of males and females did not reveal a pronounced relationship between these parameters, the overall low feeding activity of individuals of the species in the summer of 2020 was noted. The study confirmed the polyphagous nature of the diet of *E. superba*, which actively consumes available phytoplanktonic wo-weeds, supplementing the diet with high-calorie animal food (zooplankton and related individuals of *E. superba*). The data obtained expand the understanding of food preferences of Antarctic krill at different periods of its life cycle.

Keywords: Antarctic krill, *Euphausia superba*, food composition, feeding strategy, Powell Basin, Bransfield Strait, stomach, polyphagous.

Acknowledgments: The authors would like to express their sincere gratitude to the staff of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences for the material provided. Special thanks are expressed to Rudolf Nikolaevich Burukovsky, Professor of the KSTU, for support in the study of the food composition of the stomachs of Antarctic krill *E. superba*.

For citation: Kolesnikova A. D., Sudnik S. A. Food composition analysis of Antarctic krill (*Euphausia superba*) from the Antarctic part of the Atlantics. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025; (78): 38–52. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-38-52.

ВВЕДЕНИЕ

Эуфаузиевые раки представляют собой сравнительно небольшой отряд ракообразных, включающий всего 86 видов, однако они широко распространены в Мировом океане и играют важную роль в морских экосистемах. Среди эуфаузиид имеется значительное число массовых форм, представленных громадным количеством особей [1].

Антарктический криль (*Euphausia superba*, Dana 1850) – высокоценный ресурс Атлантики и один из самых экологически чистых высокобелковых пищевых продуктов на планете. По сочетанию потенциала вылова и потребительских свойств он считается крупнейшим (более 300 млн т) и самым перспективным биоресурсом Мирового океана. Возобновление масштабного промысла криля – одна из важных задач по расширению ресурсной базы отечественного рыболовства [2]. В настоящее время в вылове криля ежегодно участвуют 11–14 судов разных стран, фактический ежегодный вылов составляет менее 8 % от его общего допустимого вылова (5,61 млн. т) [3].

Представители *E. superba* дрейфуют в водах в форме массовых скоплений, плотность которых достигает 20–30 тыс. экз./м³. Чаще всего рачки встречаются на глубине 100–200 м, но в осенний сезон опускаются глубже [4].

Криль – незаменимое звено в пастбищных цепях питания, основной источник пищи для морских птиц и млекопитающих. Ввиду уникального химического состава, высокой питательной ценности и легкости добычи скоплений вид *E. superba* приобрел значимость в качестве сырьевого ресурса для пищевой промышленности, биотехнологических разработок, фармацевтики и аквакультуры.

E. superba отличается самой большой среди видов семейства Euphausiacea поверхностью фильтрующего аппарата, что позволяет ему эффективно питаться нано- и микропланктоном и достигать значительных темпов роста. Хотя фитопланктон (в частности диатомовые водоросли) – основной продукт питания, протейшие и мелкие веслоногие рачки потребляются крилем в пищу и представляют собой важный дополнительный источник энергии круглый год [1].

Несмотря на многочисленные исследования биологии антарктического криля как ценного и перспективного промыслового объекта, его питание в исследуемых важных промысловых районах не изучено. Основные литературные данные о составе пищи в желудках особей криля устарели и требуют современных уточнений и дополнений [1–7].

В настоящей статье представлены результаты исследований, посвященные изучению пищевого рациона антарктического криля *E. superba* в двух важных промысловых районах Южной Атлантики. В работе использована уникальная методика анализа питания гидробионтов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Проанализирован материал, включающий 12 проб *E. superba*, общее количество – 2128 особей. Материал был собран сотрудниками Института океанологии им. П. П. Ширшова в ходе 79-й экспедиции научно-исследовательского судна

«Академик Мстислав Келдыш» в январе–начале февраля 2020 г. Отбор проб осуществлялся в районе бассейна Пауэлла и пролива Брансфилд, разделяющего Южные Шетландские острова и Антарктический полуостров (табл. 1, рис. 1).

В ходе исследования были задействованы различные орудия лова, среди которых разноглубинные тралы Айзекса-Кидда в модификации Самышева и Асеева (РТАКСА), а также трал Сигсби. Для отлова значительного количества молоди применялись сети Бонго и Джели. Сбор материала осуществлялся с глубин от 200 до 50 м и от 50 до 0 м при использовании формальдегида (4–6 %).

Таблица 1. Материал для исследования питания антарктического криля, 2020 г.
Table 1. Material for the study of Antarctic krill nutrition, 2020

Место сбора	Дата	Станция	Орудие лова	Глубина, м	Фиксация	Количество особей, экз.
Пролив Брансфилд	21.01	6589	сеть Бонго	223	р-р формальдегида 4–6 %	250
		6591		237		78
	29.01	6614		265		60
	31.01	6618		235		107
Бассейн Пауэлла	23.01	6597	трал Айзекса-Кидда	220		82
	25.01	6601		234		54
		6602		219		132
	26.01	6604	трал Сигсби	242		30
	28.01	6607	сеть Джели	216		187
		6609	сеть Бонго	265		321
	31.01	6617		265		636
	01.02	6619	трал Айзекса-Кидда	269		191
ИТОГО						2128

До исследования содержимого желудков ракообразные подвергались лабораторному биологическому анализу по оригинальной методике [6, с коррекцией], включающему в том числе определение пола особей, их общей длины тела, стадии зрелости самцов и самок по первичным и вторичным половым признакам.

Оценка состояния экзоскелета особей (степени его твердости, соответствующей стадии линочного цикла) проводилась по 3-балльной шкале:

стадия 1 – линяющие особи, не имеющие панциря или с чрезвычайно тонким и мягким панцирем;

стадия 2 – особи, недавно совершившие линьку, с чистым, упругим панцирем, который легко прогибается при нажатии;

стадия 3 – межлиночные особи с утолщенным, негибким панцирем, на котором могут присутствовать эпибионты.

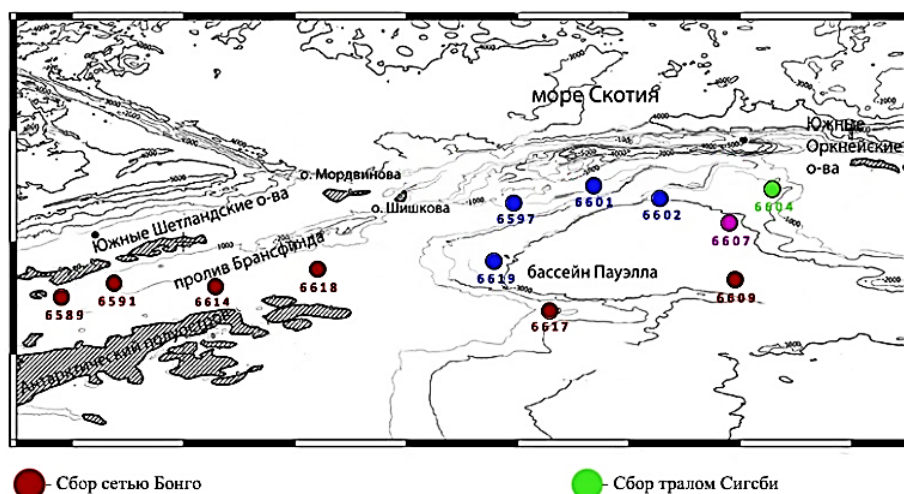


Рис. 1. Карта сбора проб антарктического криля *Euphausia superba* в Антарктическом секторе Атлантики (ориг.)

Fig. 1. Map of Antarctic krill *Euphausia superba* sample collection in the Antarctic sector of the Atlantic (orig.)

Степень наполнения желудка рачков определялась по 5-балльной шкале (табл. 2) [8, с ориг. дополнением]. В случаях низкого уровня наполнения (баллы 1 и 2) определялся исключительно состав потребленной пищи. В желудках, заполненных более чем наполовину (баллы 3 и 4), проводилась визуальная оценка объемных соотношений компонентов пищевого комка с точностью до 10 % [8].

Таблица 2. Шкала для определения степени наполнения желудка ракообразных
Table 2. Scale for determining the degree of stomach fullness in crustaceans.

Описание	Балл
Желудок пустой	0
Желудок наполнен пищей менее чем на 50 %	1
Желудок наполнен пищей примерно на 50 %	2
Желудок наполнен пищей более чем на 50 %	3
Желудок полностью наполнен пищей	4

При анализе состава пищи образец пищевого комка, выбранный из желудка особи, на чашке Петри помещался в каплю воды. Во всех желудках с содержимым, независимо от степени наполнения, рассчитывались следующие показатели: 1) частота обнаружения каждого компонента пищи (представленная в процентах от общего числа исследованных желудков с пищей, в которых был идентифицирован данный компонент); 2) доля данного компонента в объеме усредненного виртуального пищевого комка (в %), что позволяло оценить его значение в рационе *E. superba*. Виртуальный пищевой комок представляет собой совокупность средних долей каждого компонента пищевого комка, выраженную в процентах от общего объема [8]. Определение видовой принадлежности остатков пищи выполнено с использованием ряда определителей [9–11], номенклатура таксонов – по [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Краткая биологическая характеристика исследованных особей

В общем среди исследованных 2128 рачков, собранных летом 2020 г. в бассейне Пауэлла и проливе Брансфилд, численно доминировали ювенильные особи (49 %), доля самок и самцов была в 1,6–2,2 раза меньше. Общая длина тела (ДТ) ювенильных особей составила 13,2–32,0 мм ($25,4 \pm 1,5$ мм), самок – 26,9–47,3 мм ($35,8 \pm 2,8$ мм), самцов – 27,0–50,2 мм ($37,4 \pm 3,1$ мм).

*Питание *E. superba*, особенности и состав пищи*

Анализ содержания желудков у 545 исследованных особей показал, что у большинства степень наполнения желудка не превышала 50 %. У 27 % особей желудка были заполнены приблизительно наполовину. Степень наполнения желудка более 50 % отмечена у 8 % исследованных рачков, а у 2 % ракообразных желудка были полностью заполнены пищей. На основании данных, представленных на рис. 2, можно увидеть, что у многих ювенильных особей в желудках было мало пищи (балл наполнения 1).

Среди самцов и самок полупустые желудки чаще имели особи с неразвитой и слабо развитой репродуктивной системой (42–64 %), нежели созревающие и зрелые самцы и созревающие и предзрелые самки (суммарная доля 10–31 %). У большей части ювенильных особей, как у самцов и самок со слабо развитой репродуктивной системой (доли 13 % и 6 % соответственно), желудки были наполнены пищей примерно наполовину. Аналогичной была картина у двух созревающих самок. Единичные ювенильные особи, часть самцов и самок на стадиях зрелости II и III имели практически полный желудок (3 балла). Полностью наполненные желудки наблюдались только у единичных самок.

Связь состояния покровов и питания криля

На основании установленной для некоторых десятиногих ракообразных корреляции между линочным циклом и интенсивностью питания [13–15] была проведена первичная оценка взаимосвязи между степенью наполнения желудка и стадией линочного цикла у 545 особей криля разного пола и в различном репродуктивном состоянии. В пробах, собранных в январе–феврале 2020 г., были обнаружены как линяющие особи, так и рачки в межлиночном состоянии, при этом степень наполнения желудка варьировала. Все исследованные ювенильные особи находились в состоянии линьки, при этом у большинства из них желудки были полупустыми, у многих других особей – наполнены пищей наполовину, а у единичных (4 %) – практически полными (табл. 3).

Наименьшей активностью питания (баллы наполнения 1–2) отличались многие самцы и самки со слабо развитой репродуктивной системой, реже – в начале созревания. Всего пять линяющих особей (репродуктивно слабо развитые самки – стадия II) можно было отнести к сытым и наиболее активно питающимся.

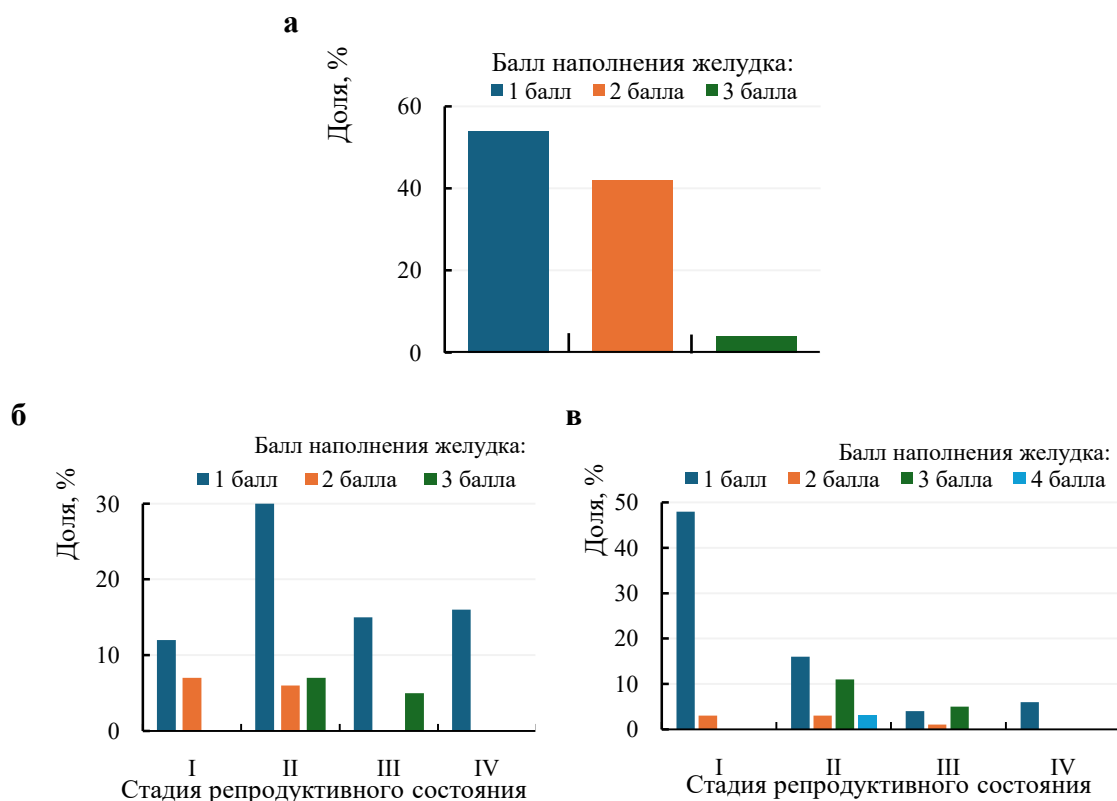


Рис. 2. Связь активности питания (степени наполнения желудков 1–4 балла) и репродуктивного состояния у *Euphausia superba*: а – ювенильные особи; б – самцы; в – самки (стадии зрелости гонад: I–IV у самцов и I–IV у самок)

Fig. 2. Relationship between feeding activity (stomach fullness – 1–4 points) and reproductive condition in *Euphausia superba*: а – juveniles; б – males; в – females (gonads maturity stages: I–IV in males and I–IV in females)

Небольшое количество созревающих и зрелых самцов и созревающих и предзрелых самок было обнаружено в межлиночном состоянии. Это может указывать на то, что, подобно многим видам креветок [16], самки и самцы антарктического криля в период созревания гонад прекращают линьку и рост, сосредотачиваясь на репродуктивных процессах. Большинство особей в межлиночном состоянии имели слабо заполненные желудки (1 балл), лишь у пяти самок, находящихся на ранней стадии созревания, желудки были почти полностью или полностью наполнены пищей.

Состояние желудков у большинства ювенильных особей, самцов и самок демонстрировало общую низкую активность питания как у линяющих рачков, так и у особей в межлиночном состоянии. Возможно, это обусловлено общими для популяции криля факторами, влияющими на пищевое поведение ракообразных. Можно отметить, что малочисленные предзрелые и зрелые самцы и предзрелые самки чаще демонстрировали низкую активность питания.

Таблица 3. Связь степени наполнения желудка особей *E. superba*, стадии личиночного цикла, пола и репродуктивного состояния самцов и самок, бассейн Пауэлла, пролив Брансфилд, 2020 г.

Table 3. Relationship of stomach filling rate of *E. superba* individuals, larval cycle stage, sex and reproductive condition of males and females, Powell Basin, Bransfield Strait, 2020

Пол	Стадия личиночного цикла / длина тела, мм	Стадия зрелости гонад	Количество особей (N, экз.; доля, %) с разной степенью наполнения желудка								Всего N, экз.
			1 балл		2 балла		3 балла		4 балла		
			N	%	N	%	N	%	N	%	
Ювениль- ные особи	линяющие / 13,2-32,1	—	158	54	125	42	9	4	—	—	292
Самцы	линяющие / 27,0-48,3	I	12	12	7	7	—	—	—	—	97
		II	29	30	6	6	7	7	—	—	
		III	8	8	—	—	5	5	—	—	
		IV	—	—	—	—	—	—	—	—	
	в межличин- ном состоя- нии / 36,1-50,2	I	—	—	—	—	—	—	—	—	
		II	—	—	—	—	—	—	—	—	
		III	7	7	—	—	—	—	—	—	
		IV	16	17	—	—	—	—	—	—	
Самки	линяющие / 26,9-42,1	I	75	47	5	3	—	—	—	—	156
		II	23	14	4	3	17	11	5	3	
		III	3	2	—	—	4	3	—	—	
		IV	—	—	—	—	—	—	—	—	
	в межличин- ном состоя- нии / 35,0-47,3	I	—	—	—	—	—	—	—	—	
		II	—	—	—	—	—	—	—	—	
		III	5	2	2	1	3	2	—	—	
		IV	10	6	—	—	—	—	—	—	

Состав пищи: все пищевые объекты, встреченные в желудках *E. superba*, показаны в табл. 4.

В рационе криля можно выделить группы объектов, отличающихся по степени их значимости, определенной на основе частоты встречаемости в желудках. В числе доминирующих объектов выделялись перидиниевые водоросли рода *Peridinium* (см. табл. 4; рис. 3а). Часто встречались диатомовые водоросли родов *Fragilaria* (в том числе *Fragilaria capucina* (Kützinger) Lange-Bertalot, 1980 и *F. curta* Skvortzow, 1936) и *Synedra* (*S. ulna* (Nitzsch) Ehrenberg, 1836) (рис. 3ж, 3з). Среди обнаруженных объектов питания диатомовые водоросли рода *Actinocyclus* и веслоногие ракообразные рода *Calanus* встречались примерно в два раза реже.

Исследование пищевого рациона криля выявило интересные особенности его питания, подтверждающие существование каннибализма в популяции, особенно в периоды массовой линьки, что было отмечено ранее другими авторами [1]. В ходе анализа содержимого желудков у 17 % рачков обнаружены многочисленные остатки тел других особей *E. superba*. Эти остатки включали фрагменты

карапакса, тельсона, плавательных ног (плеоподов) и значительное количество фильтрующих щетинок.

Остальные объекты, встречающиеся реже, чем доминирующие, классифицировались как редкие или случайные. К ним относятся диатомовые водоросли родов *Distephanus*, *Rhizosolenia*, *Chaetoceros*, *Coscinodiscus*, *Navicula*, *Stephanopyxis*, *Asteromphalus*, *Skeletonema* (предположительно *S. costatum* (Greville) Cleve, 1873), веслоногие рачки рода *Cyclops*, в частности вид *Oittonida atlantica*, а также форамениферы из рода *Globigerina*. Стоит отметить, что зоопланктонные членистоногие никогда не обнаруживались в желудках целиком, присутствовали лишь фрагментированные части тел – сегменты абдомена, обрывки антенн, фуркальные ветви со щетинками, грудные и брюшные плавательные ножки. Сильное повреждение этих фрагментов затрудняло точное определение видовой принадлежности.

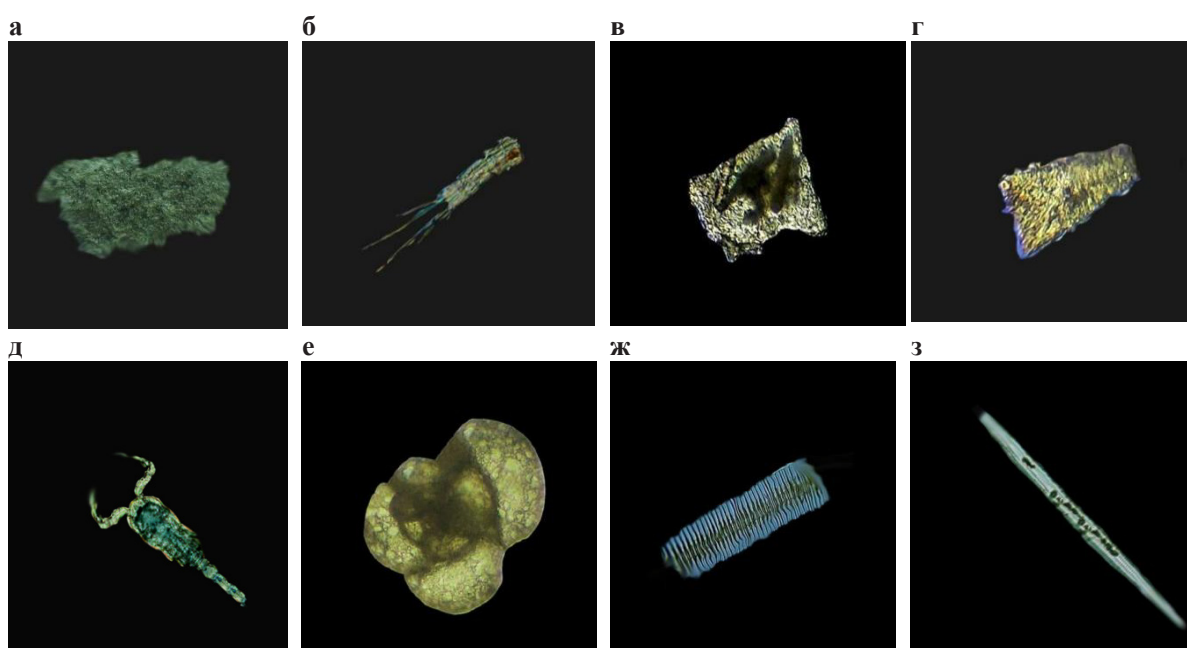


Рис. 3 Объекты пищи *Euphausia superba* [ориг.]

а – пучки перидиниевых водорослей р. *Peridinium*; б – фрагменты ракообразного р. *Cyclops*; в, г – песчинки крупным планом; д – представитель ракообразного *Oittonida atlantica*; е – представитель морских раковинных амёб р. *Globigerina*; ж – диатомовая водоросль *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*; з – диатомовая водоросль *Synedra ulna*

Fig. 3 Food objects of *Euphausia superba* [orig.]

а – assemblage of peridinium algae of (*Peridinium*); б – fragments of crustacean r. *Cyclops*; в, г – close-up of sand grains; д – representative of crustacean *Oittonida atlantica*; е – representative of marine shell amoebae *Globigerina*; ж – diatom alga *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*; з – diatom alga *Synedra ulna*

В части исследованных образцов были обнаружены неопознанные органические структуры. Эти фрагменты (обрывки тел, части панцирей) не поддались таксономической идентификации, и их пищевая ценность остается неизвестной.

В 8 % образцов присутствовали песчинки – несъедобные остатки. Размер песчинок варьировал от 1 до 20 μm . Попадание песчинок в пищеварительный тракт пелагических видов криля, вероятнее всего, носит случайный характер. Гипотеза о связи наличия песчинок с частыми сильными штормами в Антарктическом секторе Атлантики, во время которых криль захватывает песчинки вместе с пищей, подтверждается исследованиями других ученых [5] (рис. 3в, 3г).

Таблица 4. Состав пищи у особей *E. superba*, бассейн Пауэлла, пролив Брансфилд, 2020 г.

Table 4. Food composition of *E. superba* individuals, Powell Basin, Bransfield Strait, 2020

Пищевой объект		Частота встречаемости объекта, %	Количество особей объекта, экз. (диапазон ($m \pm sd$))	Доля объекта в объеме усредненного виртуального пищевого комка, %	
название	таксон			диапазон	m
<i>Peridinium</i> spp. Ehrenberg, 1830	Peridinea	72,1	18–57 (29 ± 2)	14,3–42,2	28,3
<i>Fragilaria</i> spp. Lyngbye, 1819	Bacillariophyta	60,5	19–27 (23 ± 2)	9,5–24,9	17,2
<i>Synedra</i> spp. Ehrenberg, 1830	Bacillariophyta	47,8	8–15 (11 ± 1)	8,7–12,5	10,6
<i>Actinocyclus</i> spp. Ehrenberg, 1837	Bacillariophyta	32,3	9–14 (11 ± 2)	7,1–9,2	8,2
<i>Calanus</i> spp. Leach, 1816	Copepoda	29,1	5–7 (6 ± 1)	5,0–7,2	6,1
<i>Euphausia</i> spp. Dana, 1850	Euphausiacea	17,2	4–9 (6 ± 1)	4,8–7,0	5,9
<i>Distephanus</i> spp. E. Stöhr, 1880	Bacillariophyta	14,3		2,9–6,1	4,5
неопределенные органические остатки	—	11,5	—	—	—
<i>Skeletonema</i> spp. Greville, 1865	Bacillariophyta	11,2	1–3 (2 ± 1)	1,6–4,9	3,2
<i>Rhizosolenia</i> spp. Brightwell, 1858	Bacillariophyta	10,9	4–6 (4 ± 1)	2,7–3,5	3,1
<i>Chaetoceros</i> spp. Ehrenberg, 1844	Bacillariophyta	9,7	2–4 (3 ± 1)	1,1–4,6	2,8
<i>Otonida atlantica</i> Farran, 1908	Copepoda	8,6	4–6 (3 ± 1)	1,9–3,2	2,6
<i>Coscinodiscus</i> spp. Ehrenberg, 1839	Bacillariophyta	8,1	1–6 (3 ± 1)	1,3–2,6	1,9

<i>Navicula</i> spp. Saint-Vincent, 1822	Bacillariophyta	7,0	2–4 (3±1)	1,4–1,8	1,6
<i>Cyclops</i> spp.	Copepoda	6,7	1–6 (3±1)	0,9–2,2	1,5
<i>Stephanopyxis</i> spp. Ehrenberg, 1845	Bacillariophyta	5,4	1–3 (2±1)	0,8–1,2	1,0
<i>Globigerina</i> spp. d'Orbigny, 1826	Foramenifera	4,9	1–2	0,5–1,1	0,8
<i>Asteromphalus</i> spp. Ehrenberg, 1844	Bacillariophyta	3,9		0,6–0,9	0,7

Примечание: m – среднее значение; sd – стандартное отклонение.

Анализ пищевого комка

Более детальный анализ пищевого комка показал, что основу рациона *E. superba* составляют фитопланктонные водоросли. Наиболее значительную долю в пищевом комке занимали водоросли рода *Peridinium*, известные своей высокой питательной ценностью и распространенностью в антарктических водах. За ними следовали диатомовые водоросли, с преобладанием представителей родов *Fragilaria* и *Synedra* (табл. 4). Таким образом, водоросли различных видов являются главным источником пищи для антарктического криля, обеспечивая его необходимыми питательными веществами. Небольшая, но все же значимая доля пищевого комка состояла из остатков родственных особей *E. superba*.

Остальная часть комка (0,8–7 %) содержала разнообразные органические остатки. К ним относятся фрагменты веслоногих рачков родов *Calanus* и *Cyclops* – важных представителей зоопланктона в антарктической экосистеме (более крупных и калорийных пищевых объектов, не считая родственных особей). Также были обнаружены фрагменты различных видов диатомовых водорослей. В пищевых комках присутствовали фораминиферы рода *Globigerina* – одноклеточные организмы, играющие важную роль в морских пищевых цепях. Среди других найденных компонентов – веслоногие рачки рода *Oithona*, а также неопределенные органические остатки и минеральные песчинки.

Сравнительный анализ пищевых предпочтений антарктического криля с другими видами семейства Euphausiidae оказался затруднён из-за недостаточного количества исследовательских данных. Наиболее полные сведения имеются для видов *Thysanoessa taschii* (M. Sars, 1863) и *T. inermis* (Krøyer, 1846) Японского моря. Анализ их рациона показал преобладание диатомовых и нитчатых водорослей, планктонных ракообразных, динофлагеллят и инфузорий [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование расширило понимание пищевых предпочтений *E. superba*, обитающего в важных промысловых районах бассейна Пауэрла и пролива Брансфилд. В летний период 2020 г. было установлено, что основу рациона криля составляют различные виды планктонных водорослей, преимущественно перидиниевые (*Peridinium*), с частотой встречаемости 72 % и долей до 28 % в пищевом комке, а также диатомовые водоросли родов *Fragilaria*, *Fragilariopsis* и *Synedra* (частота 47–60 %, доля 10–17 %).

Примечательно, что в период массовой линьки в рационе криля отмечен выраженный каннибализм (17 % образцов, до 6 % в пищевом комке), что объясняется высокой энергетической ценностью линяющих сородичей (крупные, обильные и легкодоступные линяющие особи представляют собой высокобелковый источник питания). В меньших количествах (4–14 % по частоте встречаемости и 0,7–4,5 % по объему) в рационе присутствовали другие виды диатомовых водорослей, веслоногие раки и фораминиферы, что подтверждает полифагический характер питания вида.

Анализ показал низкую общую активность питания криля независимо от пола (у 85 % самцов и 81 % самок был низкий уровень наполнения желудков). Отмечено, что особи с гонадами на ранних стадиях созревания чаще имели наполненные желудки (62 % самцов и 84 % самок), тогда как у зрелых особей процент наполненности желудков существенно снижался (36 % самцов и 16 % самок).

Таким образом, *E. superba* демонстрирует адаптивный характер питания, основанный на потреблении наиболее доступных и энергоемких пищевых ресурсов, с сезонными изменениями рациона, включающими каннибализм в период линьки, и снижением пищевой активности в период полового созревания.

При планировании сроков промысла криля следует учитывать возможную в периоды его активного питания фитопланктоном разнокачественность сырья – из-за накопления тканями тела хлорофилла может меняться цвет и химический состав сырья, что важно, так как при производстве пищевой продукции криль-сырец подвергается обязательной сортировке в соответствии с качеством, смешивание различных партий по качеству запрещается. Результаты анализа роли фитопланктона в питании рачков, в том числе во временном аспекте, способны составить часть рекомендаций о целесообразности проведения промысла антарктического криля в определенные периоды времени.

Работа была выполнена в рамках индивидуального плана научно-исследовательской работы Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калининградский государственный технический университет» «Систематика, зоогеография и экология ракообразных Мирового океана», зарегистрированного под номером 13.13.029.2 (ОНИОКР УНИД КГТУ). Исследование также было проведено в рамках научного сотрудничества и по заказу Института океанологии Российской академии наук, г. Москва.

Список источников

1. Пономарева, Л. А. Эвфаузииды антарктических вод / Л. А. Пономарева. – Калининград: Изд-во АтлантНИРО, 1969. – 50 с. – ISBN 5-0200-5379-1.
2. Касаткина, С. М. Биомасса и распределение антарктического криля в Антарктической части Атлантики в январе–феврале 2020 года / С. М. Касаткина, А. М. Абрамов, М. Ю. Соколов // Труды АтлантНИРО. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 49–61. – ISBN 2541-9692.
3. Kasatkina, S. M. Characteristics of the Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery (2010 to 2022) in the Atlantic Antarctic Area. Prospects for the development of

the Russian krill fishery / S. M. Kasatkina, K. V. Bandurin // Fisheries. – 2023. – V. 1. – С. 7–15.

4. Быкова, В. М. Антарктический криль / В. М. Быкова; под ред. В. М. Быковой. – Москва: Изд-во ВНИРО, 2001. – 207 с. – ISBN 5-85382-231-4.

5. Павлов, В. Я. Морские биологические ресурсы Антарктики / В. Я. Павлов // Труды ВНИРО. – Москва: Пищевая промышленность, 1969. – Т. 66. – С. 206–22. – ISBN 656-291.

6. Судник, С. А. Комплексная методика лабораторного анализа криля *Euphausia superba* (Dana, 1850) (Euphausiacea: Euphausiidae) / С. А. Судник, А. Д. Колесникова // Всерос. науч.-практич. конф. (6 фев. 2022): материалы. – Ульяновск: УГПУ им. И. Н. Ульянова, 2022. – С. 225–233.

7. Методические указания по сбору и первичной обработке в полевых условиях материалов по биологии и распределению антарктического криля / сост. Р. Р. Макаров, М. В. Серебрякова, В. А. Спиридонов, В. В. Шевцов. – Москва: ВНИРО, 1982. – 102 с. – ISBN 3-633-941.

8. Буруковский, Р. Н. Креветки: состав пищи и пищевые взаимоотношения / Р. Н. Буруковский. – Санкт-Петербург: Проспект Науки, 2022. – 568 с. – ISBN 978-5-6046442-5-6.

9. Быховский, Б. Е. Полевой определитель планктона / Б. Е. Быховский. – Москва: Изд-во Зоологич. инст. АН СССР, 1984. – 178 с.

10. Динофлагелляты (Dinophyta) дальневосточных морей России и сопредельных акваторий Тихого океана / под ред. Г. В. Коноваловой. – Москва: Изд-во РАН, 1998. – 297 с. – ISBN 5-7442-1102-0.

11. Гогорев, Р. М. Таксономический состав планктонных и ледовых водорослей в водах Антарктики (по результатам исследований в 2006–2007 гг.) / Р. М. Гогорев // Новости систематики низших растений. – 2009. – С. 36. – ISBN 978-5-87317-619-9.

12. WoRMS Editorial Board (2025). World Register of Marine Species. – URL: <https://www.marinespecies.org> (дата обращения: 28.01.2025).

13. Distribution and demography of Antarctic krill and salps in the Atlantic sector of the Southern Ocean during austral summer 2021–2022 / D. G. Bitiutskii, E. Z. Samyshev, N. I. Minkina [et. al.] // Water. – 2022. – V. 12, N 14. – P. 1–21.

14. Macro- and mesozooplankton in the Powell Basin (Antarctica): Species Composition and Distribution of Abundance and Biomass in February 2020 / V. A. Yakovenko, V. A. Spiridonov, K. M. Gorbatenko [et. al.] // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. – 2021. – P. 409–420.

15. Solomatina, A. S. Trace element concentration in Antarctic krill reflecting their distribution in the Weddell Sea / A. S. Solomatina, L. L. Demina, V. A. Spiridonov // Russian Journal of Earth Sciences. – 2021. – V. 21, N 4. – P. 12.

16. Судник, С. А. О связи линчного и репродуктивного циклов у самок креветок (Crustacea, Decapoda, Natantia) // IX Всерос. науч. конф. (26. сент. 2013 г.): материалы. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2013. – С. 290–293.

References

1. Ponomaryova L. A. *Evfauziidy antarkticheskikh vod* [Euphausiids of Antarctic waters]. Kaliningrad, AtlantNIRO Publ., 1969. 50 p.
2. Kasatkina S. M., Abramov A. M., Sokolov M. Y. Biomassa i raspredelenie antarkticheskogo krilya v Antarkticheskoy chasti Atlantiki v yanvare–fevrale 2020 goda [Biomass and distribution of Antarctic krill in the Antarctic part of the Atlantic in January–February 2020]. *Trudy AtlantNIRO* [Proceedings of AtlantNIRO]. 2021, vol. 5, no. 2, pp. 49–61.
3. Kasatkina S. M., Bandurin K. V. Characteristics of the Antarctic krill (*Euphausia superba*) fishery (2010 to 2022) in the Atlantic Antarctic Area. Prospects for the development of the Russian krill fishery. *Fisheries*, 2023, vol. 1, pp. 7–15.
4. Bykova V. M. *Antarkticheskiiy kril'* [Antarctic krill]. VNIRO Publ., 2001, 207 p.
5. Pavlov V. Ya. Morskie biologicheskie resursy Antarktiki [Marine biological resources of the Antarctic]. *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost', 1969, vol. 66, pp. 206–22.
6. Sudnik S. A., Kolesnikova A. D. Kompleksnaya metodika laboratornogo analiza krilya *Euphausia superba* (Dana, 1850) (Euphausiacea: Euphausiidae) [Complex methodology of laboratory analysis of krill *Euphausia superba* (Dana, 1850) (Euphausiacea: Euphausiidae)]. *Vseros. nauch.-praktich. konf. (6 fev. 2022): materialy* [All-Russian Scientific and Practical Conference (February 6, 2022): materials]. Ul'yanovsk, UGPU im. I. N. Ul'yanova, 2022, pp. 225–233.
7. Makarov R. R., Serebryakova M. V., Spiridonov V. A., Shevtsov V. V. *Metodicheskie ukazaniya po sboru i pervichnoy obrabotke v polevykh usloviyakh materialov po biologii i raspredeleniyu antarkticheskogo krilya* [Guidelines for the collection and primary processing in the field of materials on the biology and distribution of Antarctic krill]. VNIRO Publ., 1982, 10 p.
8. Burukovskiy R. N. *Krevetki: sostav pishchi i pishchevye vzaimootnosheniya* [Shrimp: food composition and nutritional relationships]. Saint-Petersburg, Prospekt Nauki Publ., 2022, 568 p.
9. Bykhovskiy B. E. *Polevoy opredelitel' planktona* [Plankton field detector]. Moscow, Zoologich. inst. AN SSSR Publ., 1984, 178 p.
10. Dinoflagellyaty (Dinophyta) dal'nevostochnykh morey Rossii i sopredel'nykh akvatoriy Tikhogo okeana. Pod red. G. V. Konovalovoy [Dinoflagellates (Dinophyta) of the Far Eastern seas of Russia and adjacent waters of the Pacific Ocean. Ed. G. V. Konovalova]. Moscow, 1998. 297 p.
11. Gogorev R. M. Taksonomicheskiiy sostav planktonnykh i ledovykh vodorosley v vodakh Antarktiki (po rezul'tatam issledovaniy v 2006–2007 gg.) [Taxonomic composition of planktonic and ice algae in Antarctic waters (based on research results in 2006–2007)]. *Novosti sistematiki nizshikh rasteniy*. 2009, p. 36.
12. WoRMS Editorial Board (2025). World Register of Marine Species. Available at: <https://www.marinespecies.org> (accessed 03 March 2025).
13. Bitiutskii D. G., Samyshev E. Z., Minkina N. I. [et. al.]. Distribution and demography of Antarctic krill and salps in the Atlantic sector of the Southern Ocean during austral summer 2021–2022. *Water*. 2022. V. 12, N 14. P. 1–21.

14. Yakovenko V. A., Spiridonov V. A., Gorbatenko K. M. [et. al.]. Macro- and Mesozooplankton in the Powell Basin (Antarctica): Species Composition and Distribution of Abundance and Biomass in February 2020. *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean*. 2021. P. 409–420.

15. Solomatina A. S., Demina L. L., Spiridonov V. A. Trace element concentration in Antarctic krill reflecting their distribution in the Weddell Sea. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021. V. 21. N 4. P. 12.

16. Sudnik S. A. O svyazi linochnogo i reproduktivnogo tsiklov u samok kreve-tok (Crustacea, Decapoda, Natantia) [On the relationship between lineage and reproductive cycles in female shrimp (Crustacea, Decapoda, Natantia)]. *IX Vseros. nauch. konf. (26. sent. 2013 g.): materialy* [IX All-Russian Scientific Conference (25-26.09.2013): materials]. Kaliningrad, Kaliningrad State Technical University. 2013, pp. 290–293.

Информация об авторах

А. Д. Колесникова – магистрант кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

С. А. Судник – кандидат биологических наук, доцент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

Information about the authors

A. D. Kolesnikova – Undergraduate student of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

S. A. Sudnik – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

Статья поступила в редакцию 17.06.2025; одобрена после рецензирования 27.06.2025; принята к публикации 01.07.2025.

The article was submitted 17.06.2025; approved after reviewing 27.06.2025; accepted for publication 01.07.2025.

Научная статья

УДК 502.55: 631.147: 633.39

DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-53-64

Аккумуляция кадмия в зеленой массе кукурузы на удобряемых навозом почвах

Лариса Валентиновна Пилип¹✉, Надежда Викторовна Сырчина²

¹Вятский государственный агротехнологический университет, Киров, Россия

²Вятский государственный университет, Киров, Россия

¹pilip_larisa@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-9695-7146>

²nvms1956@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8049-6760>

Аннотация. Почвы, загрязненные тяжелыми металлами, становятся непригодными для выращивания экологически безопасной продукции. К числу наиболее опасных экотоксикантов относится кадмий (Cd). Его содержание подлежит обязательному нормированию в почве, сельскохозяйственном сырье, кормах и продуктах питания. В пахотные почвы Cd поступает в том числе и в составе навоза. Настоящее исследование посвящено изучению влияния систематического внесения высоких норм традиционных органических удобрений (жидких фракций свиного навоза и навоза крупного рогатого скота) на накопление Cd в почве и растениеводческой продукции (зеленой массе кукурузы). В результате исследований установлено, что многолетнее внесение значительных норм (~200–250 т/га) навозных стоков приводит к увеличению содержания валового и подвижного Cd в агродерново-подзолистых почвах. При оценке рисков загрязнения растениеводческой продукции Cd важно учитывать соотношение pH и органического вещества в агроземе. Наиболее активная биоаккумуляция Cd происходит в кислых почвах с низким содержанием органического вещества. Внесение навоза в нейтральные или слабощелочные почвы способствует образованию мобильных, но малодоступных для растений фульватных комплексов. Коэффициент биологического поглощения Cd для зеленой массы кукурузы, выращиваемой на удобряемых навозными стоками полях, составляет 1,5–2,0, что свидетельствует о биогенной аккумуляции соответствующего тяжелого металла. Зависимость значения коэффициента биологического поглощения от свойств почвы незначительна. Коэффициент биогеохимического поглощения Cd зеленой массой кукурузы изменяется в более широких пределах (от 2 до 9) и существенно зависит от свойств почвы. Наиболее высокий уровень коэффициента биогеохимического поглощения выявлен для кислых агродерново-подзолистых почв.

Ключевые слова: кадмий, почвы, кукуруза, аккумуляция кадмия, навозные стоки.

Для цитирования: Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Аккумуляция кадмия в зеленой массе кукурузы на удобряемых навозом почвах // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 53–64. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-53-64.

Original article

Accumulation of cadmium in green mass of corn on soils fertilized with manure

Larisa V. Pilip¹✉, Nadezhda V. Syrchina²

¹Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russia

²Vyatka State University, Kirov, Russia

¹pilip_larisa@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-9695-7146>

²nvms1956@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8049-6760>

Abstract. Soils contaminated with heavy metals become unsuitable for growing environmentally friendly products. Cadmium (Cd) is one of the most dangerous ecotoxins. The Cd content is subject to mandatory standardization in soil, agricultural raw materials, feed and food products. Cadmium enters arable fields, including as part of manure. This study is devoted to the investigation of the effect of systematic application of high rates of traditional organic fertilizers (liquid fractions of pig manure and cattle manure) on the accumulation of Cd in soil and plant products (green mass of corn). As a result of research, it has been established that long-term application of significant rates (~200–250 tons per hectare) of manure effluents leads to an increase in the content of total and mobile Cd in agrosoddy-podzolic soils. When assessing the risks of Cd pollution of plant products, it is important to take into account the ratio of pH and organic matter in agrozem. The most active bioaccumulation of Cd occurs in acidic soils with a low content of organic matter. Application of manure to neutral or slightly alkaline soils promotes the formation of mobile, but poorly accessible to plants fulvic complexes. The coefficient of biological absorption of Cd for the green mass of corn grown on fields fertilized with manure effluents is 1.5–2.0, which indicates biogenic accumulation of the corresponding heavy metal. The dependence of the value of the biological absorption coefficient on soil properties is insignificant. The coefficient of biogeochemical absorption of Cd by the green mass of corn varies within a wider range (from 2 to 9) and significantly depends on soil properties. The highest level of the biogeochemical absorption coefficient has been found for acidic agro-sod-podzolic soils.

Key words: cadmium, soils, corn, cadmium accumulation, manure effluents.

For citation: Pilip L. V., Syrchina N. V. Accumulation of cadmium in green mass of corn on soils fertilized with manure. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(78):53–64. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-53-64.

ВВЕДЕНИЕ

Защита окружающей среды от химического загрязнения является важной экологической задачей. Рост численности населения и активное развитие промышленного и сельскохозяйственного производства способствуют переносу и

рассеиванию тяжелых металлов (ТМ) в окружающей среде. ТМ не способны к биодegradации, поэтому территории, подверженные многолетнему техногенному и агрогенному загрязнению, становятся зонами повышенного экологического риска [1, 2]. К числу наиболее опасных для окружающей среды и человека ТМ относится кадмий (Cd) – токсикант первого класса опасности. Содержание Cd в продовольственном сырье, продуктах питания, кормах для животных и почве относится к нормируемым показателям, характеризующим их безопасность [3, 4]. Соединения Cd являются токсичными практически для всех живых организмов. Острое и хроническое отравление человека этим элементом приводит к поражению почек, сердечно-сосудистой и репродуктивной систем, разрушению костной ткани, онкозаболеваниям. Экологическая опасность Cd усугубляется высокой подвижностью (мобильностью) данного элемента в почве и водной среде, а также его способностью легко передаваться по пищевым цепям и накапливаться в организмах растений и животных.

Основным источником поступления Cd в растительные объекты является почва. Загрязнение почвы Cd во многом обусловлено техногенными факторами. Соединения этого металла содержатся в выбросах предприятий теплоэнергетической сферы, автотранспорта, лакокрасочного производства, горнодобывающей и металлургической промышленности, цементных заводов, в складированных на свалках и полигонах отходах. В пахотные почвы Cd поступает в составе фосфорных удобрений, известняковых мелиорантов, некоторых пестицидов, а также используемых в качестве удобрений золы, осадков сточных вод, навоза [4, 5]. Особую опасность для пахотных земель представляет свиной навоз (СН), вносимый в пашню в значительных нормах [6]. Опубликованы данные, согласно которым длительное (17 лет) внесение высоких норм соответствующего удобрения привело к повышению содержания валового Cd в верхнем горизонте пахотной почвы в 17–19 раз [7]. Высокое содержание Cd в СН обусловлено широким применением минеральных добавок, включаемых в рацион животных [8]. Для снижения экологической опасности СН как органического удобрения большое значение имеют такие факторы, как контроль содержания Cd в кормовых добавках и навозе, а также корректирование норм внесения соответствующего удобрения в почву [9].

По абсолютному содержанию в растениях Cd относится к элементам низкой концентрации [10]. Коэффициент биологического поглощения соответствующего ТМ обычно близок к 1, но может существенно изменяться в зависимости от вида и условий выращивания растений [11]. Повышенной способностью к аккумуляции Cd отличается рис, активно поглощающий этот элемент из загрязненных почв, а также многие овощи [12, 13].

Для защиты сельскохозяйственных культур от загрязнения кадмием разработаны такие технологии, как промывка, цементирование или замена загрязненного корнеобитаемого слоя чистой почвой, использование сортов с пониженной способностью к аккумуляции Cd, оптимизация системы удобрений, применение приемов биоремедиации и др. Определенный положительный эффект обеспечивает внесение в почву натуральных сорбентов (например, биоугля), а также регуляторов кислотности. Основными недостатками соответствующих технологий являются высокая трудоемкость, чрезмерный уровень материальных затрат, вывод обрабатываемых площадей из хозяйственного оборота на

продолжительный период времени, что существенно ограничивает возможность их широкого внедрения в практику [14, 15].

В складывающихся условиях особую актуальность и практическую значимость представляют исследования, направленные на мониторинг содержания Cd в почве и растениях, а также изучение и оценку факторов, влияющих на аккумуляцию этого ТМ в почве и растительных объектах.

Цель работы – выявить влияние систематического внесения высоких норм традиционных органических удобрений (жидких фракций свиного навоза и навоза крупного рогатого скота) на накопление Cd в почве и растениеводческой продукции (зеленой массе кукурузы).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводили на примере двух пахотных полей, расположенных в Кировской области вблизи систем накопления и обезвреживания жидкой фракции навозных стоков (лагун) крупных животноводческих предприятий. Почва (агрозем) – агродерново-подзолистая, суглинистая, тип севооборота – полевой. Обезвреженную в лагунах жидкую фракцию (ЖФ) навозных стоков (НС) в период обработки почвы (весна и осень) вносили в пашню. Глубина внесения – 50 см, способ внесения – буксируемая шланговая система, продолжительность внесения – 8 лет. Пашню первого поля (Поле 1) удобряли ЖФ свиных НС, пашню второго поля (Поле 2) – ЖФ НС крупного рогатого скота (КРС). Нормы и сроки внесения удобрений в пашню определяли агрохимические службы соответствующих животноводческих предприятий на основании данных о содержании в агроземе и в обезвреженной ЖФ азота. Среднегодовое внесение ЖФ в пашню варьировало от 220 до 280 т/га. В год отбора проб и в предыдущий год оба поля использовали для выращивания кукурузы на силос.

Пробы агрозема и зеленой массы кукурузы (ЗМК 1 и ЗМК 2) для проведения лабораторных исследований отбирали одновременно. Агрозем отбирали из пахотного горизонта с помощью тростевого бура согласно ГОСТ Р 58595-2019, ЗМК – в соответствии с «Методическими указаниями по оценке качества и питательности кормов» [16]. На каждом удобряемом поле было отобрано по 40 точечных проб агрозема. Расстояние между точками отбора – 10 м. Для проведения химического анализа использовали объединенные пробы (5 проб).

Контрольные (фоновые) образцы дерново-подзолистой суглинистой почвы (Контроль 1 и Контроль 2) отбирали на заросших кустарником и травянистой растительностью территориях, расположенных несколько выше по профилю, чем пашня. Расстояние от точек отбора контрольных образцов почвы до границ пашни составляло 400 м. Хозяйственная деятельность на фоновых территориях на протяжении последних десятилетий (не менее 50 лет) не проводилась. Пробы почвы на фоновых участках отбирали методом конверта (по 5 проб с каждого участка размером 100 м²). Для отбора проб использовали тростевой бур, глубина отбора – 30 см.

Пробы ЗМК (средняя часть стебля с листьями) отбирали в середине сентября перед уборкой урожая. Учетные площадки (УП) для отбора проб были

расположены по диагонали поля. Площадь каждой УП – 2 м², количество УП – 12, масса каждой точечной пробы – 0,5 кг. Для химического анализа использовали по 3 объединенные пробы ЗМК с каждого поля.

Химический анализ проводили через 5 суток после отбора проб согласно действующим стандартам (табл. 1). Определение содержания валового и подвижного Cd в пробах почвы выполняли по ФР 1.31.2018.31189, в пробах ЗМК – по ГОСТ 32343-2013. Метод анализа – атомно-абсорбционный. Для извлечения подвижных форм Cd (Cd_{подв.}) применяли ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH=4,8.

Для оценки биогенной аккумуляции Cd использовали коэффициент биологического поглощения (КБП), который рассчитывали по формуле: КБП = С_к/С_в [17]; оценку доступности Cd для растений проводили с помощью коэффициента биогеохимической подвижности (КБХП) по формуле: КБХП = С_к/С_п [18], где С_к – концентрация (мг/кг) Cd в воздушно-сухой ЗМК, С_в – концентрация (мг/кг) валового Cd (Cd_{вал.}) в воздушно-сухом агроземе, С_п – концентрация (мг/кг) Cd_{подв.} в воздушно-сухом агроземе.

Статистическую обработку результатов анализа (расчет средних значений и стандартных отклонений) выполняли в программе Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты агрохимического анализа удобряемой почвы и почвы контрольных участков приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика отобранных образцов почвы
Table 1. Characteristics of the selected soil samples

Показатель	Контроль 1	Поле 1	Контроль 2	Поле 2	Метод анализа
pH водный	6,6±0,2	7,6±0,2*	4,0±0,2	5,3±0,2	ГОСТ 26483-85
Органическое вещество, %	2,2±0,4	6,0±1,2	2,1±0,4	7,2±1,6	ГОСТ 23740-2016
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг	175±40	1060±180	116±34	920±140	ГОСТ Р 54650-2011
K ₂ O обменный, мг/кг	130±20	850±120	120±15	660±110	ГОСТ Р 54650-2011
N общий, мг/кг	480±90	1250±420	400±70	530±110	ГОСТ Р 58596-2019

Примечание: *Полужирным шрифтом выделены статистически значимые отличия свойств агрозема от аналогичных свойств почвы контрольных участков (p<0,05).

Выполненные исследования показали, что систематическое внесение ЖФ в агродерново-подзолистую почву привело к накоплению органического вещества и увеличению таких показателей, как pH водный, N общий, P₂O₅ подвижный, K₂O обменный. Наиболее значительный рост мобильности фосфора вызвало внесение ЖФ навозных стоков КРС (в 8 раз по сравнению с контролем). На мобильность

калия в большей степени повлияла ЖФ свиных НС. Кислотность агрозема, по сравнению с кислотностью почвы фоновых участков, снизилась. Все выявленные отличия статистически значимы.

Результаты исследований, характеризующие содержание Cd в пробах агрозема и ЗМК, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание разных форм кадмия в образцах агрозема и зеленой массы кукурузы

Table 2. Content of different forms of cadmium in samples of agrozem and green mass of corn

Объект	Содержание Cd	
	валовый	подвижные формы
Контроль 1	0,007±0,002	<ПО**
Поле 1	0,090±0,027*	0,067±0,020
ЗМК 1	0,180±0,063	не определяли
Контроль 2	0,038±0,011	<ПО
Поле 2	0,095±0,029	0,016±0,004
ЗМК 2	0,144±0,050	не определяли

Примечание: *Полужирным шрифтом выделены статистически значимые отличия показателей почвы пахотных полей от соответствующих показателей почвы контрольных участков ($p < 0,05$);

** ПО – предел обнаружения.

Согласно результатам исследований, содержание Cd в почве всех обследованных участков соответствовало требованиям СанПиН 1.2.3685-21 (ОДК Cd в суглинистых нейтральных и близких к нейтральным почвах – 2,0 мг/кг). Однако более высокое содержание валового и подвижного Cd в агроземе, по сравнению с почвой фоновых участков, свидетельствует о тенденции к загрязнению пашни соответствующим ТМ. В пробах агрозема «Поле 1» доля подвижных форм Cd достигала 70 % от валового уровня, в пробах агрозема «Поле 2» соответствующий показатель был ниже и составлял 17 %. Выявленное различие в подвижности Cd может быть обусловлено более высокими значениями таких показателей, как «содержание органического вещества» и «рН» почвы «Поле 1», по сравнению с почвой «Поле 2». Известно, что для Cd характерна значительная органофильность, т. е. способность образовывать устойчивые комплексы с органическими компонентами почвы [19, 20, 21]. Снижение кислотности способствует увеличению степени диссоциации (депротонированию) кислотных групп органических лигандов. Отрыв протона (H^+) приводит к увеличению отрицательного заряда на лигандах и, соответственно, к возрастанию их способности связывать катионы ТМ. Особенно это касается ТМ, характеризующихся выраженной органофильностью. Большое количество кислотных групп характерно для гуминовых веществ, в частности для весьма подвижных фульвокислот, которыми богаты удобряемые навозом почвы. Образование устойчивых растворимых комплексов с фульвокислотами приводит к переходу органофильного Cd в мобильную форму. Увеличение подвижности Cd за счет образования растворимых комплексов с органическими лигандами может

способствовать детоксикации почв за счет миграции соответствующего ТМ с атмосферными осадками в более глубокие горизонты почвенного профиля.

Содержание Cd в пробах ЗМК, отобранных на разных полях, было ниже предела, установленного для сочных кормов (0,3 мг/кг) [22]. В образцах ЗМК 1 концентрация Cd была несколько выше, чем в образцах ЗМК 2 (различие статистически не значимо).

В табл. 3 приведены значения коэффициентов биологического поглощения и биогеохимической активности Cd для отобранных проб ЗМК.

Таблица 3. Значения коэффициентов биологического поглощения и биогеохимической подвижности кадмия

Table 3. Values of biological absorption coefficients and biogeochemical mobility of cadmium

Показатель	Образцы исследования	
	ЗМК 1	ЗМК 2
Коэффициент биологического поглощения (КБП)	2,0	1,5
Коэффициент биогеохимической подвижности (КБХП)	2,7	9,0

Согласно полученным данным, КБП Cd в ЗМК, выращенной на разных по химическому составу почвах, был выше единицы, что свидетельствует о накоплении соответствующего элемента в зеленой массе растений.

Поскольку растениям доступны только подвижные формы, для более корректного отражения интенсивности поглощения металлов из почвы используют показатель КБХП [23, 24]. Коэффициент биохимического поглощения Cd зеленой массой кукурузы в более кислой почве (Поле 2) оказался в 7,5 раз выше, чем в слабощелочной (Поле 1). Возможно, данный эффект обусловлен тем, что в щелочных почвах Cd образует подвижные, но труднодоступные для поглощения комплексные соединения с крупными органическими лигандами, а в кислых почвах – легкодоступные аквакомплексы, то есть поглощение Cd растениями зависит не столько от подвижности данного элемента в почвах, сколько от того, с какими лигандами связан данный катион.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долговременное внесение навозных стоков приводит к постепенному накоплению валовых и подвижных форм Cd в пахотном горизонте почвы. Увеличению мобильности Cd способствует значительное содержание вносимых с навозными стоками органических веществ и повышенный уровень pH (>7,0). Соответствующие условия способствуют образованию устойчивых и хорошо растворимых комплексов соответствующего металла с некоторыми органическими лигандами, в частности фульвокислотами.

Коэффициент биологического поглощения Cd в удобряемых навозными стоками почвах варьировал от 1,5 до 2,0, что свидетельствует о биоаккумуляции данного ТМ в зеленой массе кукурузы.

Коэффициент биогеохимической подвижности, характеризующий доступность Cd для растений, изменялся в более широких пределах – от 2,7 в близкой к нейтральной почве (pH=7,6) до 9,0 в кислой (pH=5,3). Таким образом, повышение уровня кислотности почв является фактором риска загрязнения ЗМК кадмием.

Результаты работы свидетельствуют об отсутствии прямой зависимости между содержанием подвижных форм Cd в почве и накоплением этого металла в ЗМК. При оценке рисков загрязнения растениеводческой продукции Cd необходимо учитывать соотношение pH и органического вещества в агроземе. Наиболее активная биоаккумуляция Cd происходит в кислых почвах с низким содержанием органического вещества. Внесение навоза в нейтральные или слабощелочные почвы способствует образованию мобильных, но малодоступных для растений фульватных комплексов. Высокая устойчивость и значительные размеры соответствующих координационных соединений затрудняют абсорбцию катионов Cd^{2+} корневой системой растений.

Эффект повышения мобильности Cd в нейтральных, удобряемых навозом почвах может найти практическое применение для детоксикации загрязненных соответствующим ТМ территорий. Внесение раскислителей (например, известковых материалов) на фоне высоких норм органических удобрений обеспечивает хорошие условия для миграции Cd из корнеобитаемого горизонта в более глубокие слои почвенного профиля, что снижает риски загрязнения растениеводческой продукции соответствующим ТМ.

Список источников

1. Пилип, Л. В. Анализ экологических рисков отрасли свиноводства в Кировской области / Л. В. Пилип // Вестник Вятской ГСХА. – 2020. – № 1 (3). – С. 1–5.
2. Пилип, Л. В. Животноводческие комплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (Cu, Zn) / Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, Д. А. Кузнецов // Принципы экологии. – 2023. – № 1 (47). – С. 82–89, <https://doi.org/10.15393/j1.art.2023.13182>.
3. Валл, Е. В. Содержание тяжелых металлов в реках Калининградской области / Е. В. Валл, Н. Р. Ахмедова // Известия КГТУ. – 2022. – № 67. – С. 11–20, <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-67-11-20>.
4. Пилип, Л. В. Промышленные свинокомплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами / Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2021. – № 5 (51). – С. 88–91, <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-5-88-91>.
5. Пилип, Л. В. Влияние мелиорантов на подвижность кадмия в почвах / Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина // Российский журнал прикладной экологии. – 2023. – № 4 (36). – С. 60–66, <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.60.66>.
6. Сырчина, Н. В. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства / Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина // Теоретическая и прикладная экология. – 2022. – № 3. – С. 219–225, <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>.

7. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure / L. Wu et al. // *Geoderma*. 2012. V. 173. P. 224–230, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.003>.
8. Potential risk of cadmium in a soil-plant system as a result of long-term (10 years) pig manure application / Y. G. Xu et al. // *Plant Soil Environ*. 2015. V. 61. N 8. P. 352–357, <https://doi.org/10.17221/100/2015-PSE>.
9. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective / S. O. Petersen et al. // *Livestock science*. 2007. V. 112. N 3. P. 180–191, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.001>.
10. Матвеев, Н. М. Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза / Н. М. Матвеев, Н. В. Прохорова // *Вестник СамГУ*. – 1996. – Специальный выпуск. – С. 125–147.
11. Добровольский, В. В. Основы биогеохимии / В. В. Добровольский. – Москва: Высшая школа, 1998. – 413 с. – ISBN 5-06-003-112-8.
12. Lead and cadmium contamination and exposure risk assessment via consumption of vegetables grown in agricultural soils of five-selected regions of Pakistan / Z. U. Rehman et al. // *Chemosphere*. 2017. V. 168. P. 1589–1596, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.152>.
13. Potential risks of copper, zinc, and cadmium pollution due to pig manure application in a soil–rice system under intensive farming: a case study of Nanhu, China / J. Shi et al. // *Journal of Environmental Quality*. 2011. V. 40. N 6. P. 1695–1704, <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0316>.
14. Environmental pollution induced by heavy metal (loid) s from pig farming / Z. Feng et al. // *Environmental earth sciences*. 2018. V. 77. P. 1–10, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7300-2>.
15. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: a review / Y. Yang et al. // *Science of the Total Environment*. 2020. V. 708. N 1. P. 135186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135186>.
16. Методические указания по оценке качества и питательности кормов. – Москва: ЦИНАО, 2002. – 76 с.
17. Дьяконов, К. Н. Современные методы географических исследований / К. Н. Дьяконов, Н. С. Касимов, В. С. Тикунов. – Москва: Просвещение, 1996. – 205 с. – ISBN 5-09-004-567-4.
18. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. – Москва: Высшая школа, 1999. – 62 с. – ISBN 5-7594-0077-0.
19. Водяницкий, Ю. Н. Сродство тяжелых металлов и металлоидов к фазам-носителям в почвах / Ю. Н. Водяницкий // *Агрохимия*. – 2008. – № 9. – С. 87–94.
20. Медведев, И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с. – ISBN 978-5-97-58-1665-8.
21. Сырчина, Н. В. Влияние органических удобрений на содержание микроэлементов в зеленой массе кукурузы / Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина // *Химия растительного сырья*. – 2024. – № 1. – С. 372–380, <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112298>.
22. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках // Библиотека

нормативной документации [сайт]. – URL:
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725464.htm> (дата обращения:
08.01.2025).

23. Енчилик, П. Р. Биологическое поглощение и биогеохимическая подвижность микроэлементов в лесных ландшафтах Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника / П. Р. Енчилик, Е. Н. Асеева, И. Н. Семенов // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 4. – С. 93–98, <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14093>.

24. Effect of Organic Matter on Distribution of Chemical Forms of Cadmium in Soil in Corn Rhizosphere / F. Lotfi et al. // Water and soil. 2018. V. 31. N 6. P. 1611–1622, <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i5.60064>.

References

1. Pilip L. V. Analiz ekologicheskikh riskov otrasli svinovodstva v Kirovskoy oblasti [Analysis of environmental risks of the pig industry in the Kirov region]. *Vestnik Vyatskoy GSKhA*, 2020, no. 1 (3), pp. 1–5.

2. Pilip L. V., Syrchina N. V., Kuznetsov D. A. Zhivotnovodcheskie komplekсы как istochniki zagryazneniya okruzhayushchey sredy tyazhelymi metallami (Cu, Zn) [Livestock complexes as sources of environmental pollution with heavy metals (Cu, Zn)]. *Printsipy ekologii*, 2023, no. 1(47), pp. 82–89, <https://doi.org/10.15393/j1.art.2023.13182>.

3. Vall E. V., Akhmedova N. R. Soderzhanie tyazhelykh metallov v rekakh Kaliningradskoy oblasti [Content of heavy metals in the rivers of the Kaliningrad region]. *Izvestiya KGTU*, 2022, no. 67, pp. 11–20, <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-67-11-20>.

4. Pilip L. V., Syrchina N. V., Ashikhmina T. Ya. Promyshlennyye svínokomplekсы как istochniki zagryazneniya okruzhayushchey sredy tyazhelymi metallami [Industrial pig farms as sources of environmental pollution with heavy metals]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra Uralskogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii Nauk*, 2021, no. 5(51), pp. 88–91, <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2021-5-88-91>.

5. Pilip L. V., Syrchina N. V. Vliyanie meliorantov na podvizhnost' kadmiya v pochvakh [Effect of meliorants on cadmium mobility in soils]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2023, no. 4(36), pp. 60–66, <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.60.66>.

6. Syrchina, N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. Khimicheskaya degradatsiya zemel pod vozdeystviem otkhodov zhivotnovodstva [Chemical degradation of land under the influence of animal husbandry waste]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2022, no. 3, pp. 219–225, <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>.

7. Wu L. et al. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure. *Geoderma*. 2012. V. 173. P. 224–230, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.003>.

8. Xu Y. G. et al. Potential risk of cadmium in a soil-plant system as a result of long-term (10 years) pig manure application. *Plant Soil Environ*. 2015. V. 61. N 8. P. 352–357, <https://doi.org/10.17221/100/2015-PSE>.

9. Petersen S. O. et al. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livestock science*. 2007. V. 112. N 3. P. 180–191, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.001>.
10. Matveev N. M., Prokhorova N. V. Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh v usloviyakh tekhnogeneza [Heavy metals in soils and plants under technogenesis conditions]. *Vestnik SamGU*, 1996, Spetsial'nyy vypusk, pp. 125–147.
11. Dobrovolskiy V. V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of Biogeochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola, 1998. 413 p.
12. Rehman Z. U. et al. Lead and cadmium contamination and exposure risk assessment via consumption of vegetables grown in agricultural soils of five-selected regions of Pakistan. *Chemosphere*. 2017. V. 168. P. 1589–1596, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.152>.
13. Shi J. et al. Potential risks of copper, zinc, and cadmium pollution due to pig manure application in a soil–rice system under intensive farming: a case study of Nanhu, China. *Journal of Environmental Quality*. 2011. V. 40. N 6. P. 1695–1704, <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0316>.
14. Feng Z. et al. Environmental pollution induced by heavy metal (loid) s from pig farming. *Environmental earth sciences*. 2018. V. 77. P. 1–10, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7300-2>.
15. Yang Y. et al. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: a review. *Science of the Total Environment*. 2020. V. 708. N 1. P. 135186, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135186>.
16. *Metodicheskie ukazaniya po otsenke kachestva i pitatelnosti kormov* [Guidelines for assessing the quality and nutritional value of feed]. Moscow, TsINA O, 2002, 76 p.
17. D'yakonov K. N., Kasimov N. S., Tikunov V. S. *Sovremennyye metody geograficheskikh issledovaniy* [Modern methods of geographical research]. Moscow, Prosveshchenie, 1996, 205 p.
18. Perel'man A. I. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry in the landscape]. Moscow, Vysshaya shkola, 1999, 62 p.
19. Vodyanitskiy Yu. N. Srodstvo tyazhelykh metallov i metalloidov k fazam-nositelyam v pochvakh [Affinity of heavy metals and metalloids to carrier phases in soils]. *Agrokimiya*, 2008, no. 9, pp. 87–94.
20. Medvedev I. F., Derevyagin S. S. *Tyazhelye metally v ekosistemakh* [Heavy metals in ecosystems]. Saratov, Rakurs Publ., 2017. 178 p.
21. Syrchina, N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. Vliyanie organicheskikh udobreniy na sodержание mikroelementov v zelenoy masse kukuruzy [The effect of organic fertilizers on the content of trace elements in the green mass of corn]. *Khimiya rastitelnogo syrya*, 2024, no. 1, pp. 372–380, <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112298>.
22. Vremennyy maksimalno dopustimyy uroven' (MDU) sodержaniya nekotorykh khimicheskikh elementov i gossipola v kormakh dlya selskokhozyaystvennykh zhivotnykh i kormovykh dobavkakh [Temporary maximum permissible levels (MRL) of certain chemical elements and gossypol in feed for farm animals and feed additives]. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725464.htm> (accessed 8 January 2025).

23. Enchilik P. R., Aseeva E. N., Semenov I. N. Biologicheskoe pogloshchenie i biogeokhimicheskaya podvizhnost' mikroelementov v lesnykh landshaftakh Tsentral'no-Lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika [Biological uptake and biogeochemical mobility of microelements in forest landscapes of the central forest state biosphere nature reserve]. *Problemy regionalnoy ekologii*, 2018, no. 4, pp. 93–98, <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14093>.

24. Lotfi F. et al. Effect of Organic Matter on Distribution of Chemical Forms of Cadmium in Soil in Corn Rhizosphere. *Water and soil*. 2018. V. 31. N 6. P. 1611–1622, <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i5.60064>.

Информация об авторах

Л. В. Пилип – кандидат ветеринарных наук, доцент

Н. В. Сырчина – кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник

Information about the authors

L. V. Pilip – PhD in Veterinary, Associate Professor

N. V. Syrchina – PhD in Chemistry, Associate Professor, Senior Researcher

Статья поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 10.04.2025; принята к публикации 20.05.2025.

The article was submitted 09.04.2025; approved after reviewing 10.04.2025; accepted for publication 20.05.2025.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Научная статья

УДК 664.3.032+621.66

DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-67-80

Сравнительный анализ производительности пищевых коловратных насосов при подаче высоковязких сред

Владимир Аркадьевич Наумов¹✉, Оксана Игоревна Левичева²

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

¹vladimir.naumov@klgtu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

²o_levicheva@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5922-9123>

Аннотация. Коловратные насосы (КН) используются для транспортирования пищевых сред с большой вязкостью, когда необходимо сохранить структуру продукта. В статье выполнен сравнительный анализ производительности КН, изготовленных тремя компаниями. Исходными данными послужили находящиеся в открытом доступе результаты испытаний КН этих трех компаний. Для моделирования подачи коловратными насосами плавленых сыров (ПС), сгущенного молока и др. следует использовать подход, базирующийся на нагрузочных характеристиках при перекачивании сред с наибольшими значениями эффективной динамической вязкости (ЭДВ). Производительность КН рассчитывается как произведение рабочего объема на разность между текущей частотой вращения ротора (ЧВР) и ее минимально необходимым значением (МНЗ) для начала подачи жидкости. МНЗ ЧВР у всех изученных КН снижается с увеличением ЭДВ и уменьшением перепада давления. Но абсолютные МНЗ ЧВР могут существенно различаться у разных КН при ЭДВ менее 200 сПз. Для корректного сравнения производительности КН с небольшим различием рабочего объема предложен метод приведения нагрузочной характеристики к безразмерной форме (зависимость безразмерной подачи от безразмерных величин перепада давления и ЧВР). Из трех исследованных агрегатов безразмерная подача КН 034-WCB оказалась наибольшей, однако разница между величинами безразмерной подачи разных КН была существенной лишь при перепаде давления около 1 МПа и ЭДВ менее 300 сПз. ПС, как правило, транспортируются при меньших давлениях. В таких условиях разница безразмерной производительности исследованных КН становится малозначимой. Результаты данного исследования могут быть использованы для подбора КН с необходимыми параметрами.

Ключевые слова: коловратные насосы, производительность, вязкость, давление, безразмерная форма, моделирование.

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания НИОКР «Разработка и совершенствование продукционных систем пищевой отрасли».

Для цитирования: Наумов В. А., Левичева О. И. Сравнительный анализ производительности пищевых коловратных насосов при подаче высоковязких сред // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 67–80. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-67-80.

Original article

Comparative analysis of the performance of food rotary lobe pumps when delivering highly viscous media

Vladimir. A. Naumov¹, Oksana. I. Levicheva²

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

¹vladimir.naumov@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

²o_levicheva@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5922-9123>

Abstract. Lobe pumps (LP) are used for transporting food media with high viscosity when it is necessary to preserve a product structure. The article presents a comparative analysis of the LP performance manufactured by three companies. The publicly available test results of these three companies are served as the initial data. The approach based on the load characteristics when pumping media with the highest values of effective dynamic viscosity (EDV) has been used to simulate the performance of processed cheese (PC) by the lobe pumps. LP performance is calculated as the product of the working volume by the difference between the current rotor speed (RS) and its minimum required value (MRV) to start the liquid flow. The MRV RS decreases with an increase in EDV and a decrease in pressure drop in all studied LP. However, the absolute MRV RS may differ significantly for different LP with an EDV of less than 200 sP. The method is proposed for reducing the load characteristic to a dimensionless form (the dependence of the dimensionless performance on the dimensionless values of the pressure drop, EDV and the RS for a correct comparison of the LP performance with a small difference in the working volume. The dimensionless feed of LP 034-WCB turned out to be the largest of the three studied aggregates. However, the difference between the values of the dimensionless performance of different LP turned out to be significant only at a pressure drop of about 1 MPa and an EDV of less than 300 sP. PS, as a rule, are transported at lower pressures. Under such conditions, the difference in the dimensionless performance of the studied LP becomes insignificant. The results of this study can be used to select LP with the necessary parameters.

Keywords: lobe pumps, performance, viscosity, dimensionless shape, modeling.

Funding: the research was carried out within the framework of the state assignment of research and development work "Development and improvement of food industry production systems".

For citation: Naumov V. A., Levicheva O. I. Comparative analysis of the performance of food rotary lobe pumps when delivering highly viscous media. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025; (78):67–80. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-67-80.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих технологических процессах необходимо межоперационное транспортирование пищевых сред по трубопроводу. Для осуществления такого транспортирования применяются объемные насосы разных типов [1–3]. В последние десятилетия, наряду с традиционными типами насосов (винтовые, шестеренные), все шире используются коловратные насосы (КН), которые часто называют кулачковыми. Главное достоинство КН – бережное, без повреждения структуры, перемещение пищевых масс (таких как ПС, мед, паштеты, мороженое и др.). Достигается это с помощью особой конструкции КН – разделением рабочего объема и силовой камеры. Силовая камера КН имеет такое же принципиальное устройство, как у шестеренного насоса, а в рабочей камере замыкание, осуществляемое с помощью лопастей (кулачков), не силовое, а геометрическое. Для изготовления КН необходимо высокое качество материалов, тщательная обработка поверхностей, профессиональная сборка. В результате стоимость КН заметно выше стоимости насосов других типов. Поэтому актуальными являются исследования, связанные с улучшением конструкции КН, повышением производительности и снижением энергетических затрат.

Все исследования КН можно разделить на два направления. Первое направление – это исследование возможностей улучшения показателей работы КН на стадии, предшествующей проектированию. Второе направление связано с повышением эффективности использования серийно выпускаемых КН. По первому направлению исследования проводятся многими научными группами по всему миру, опубликовано большое количество результатов исследований [4–11]. Как правило, они опираются на теоретическое исследование трехмерных течений в рабочем объеме КН с помощью системы уравнений Навье-Стокса (СУНС), а также на результаты лабораторных экспериментов. Так, в [4] предложен новый эллиптический тип профиля ротора. Для оценки влияния такого профиля на производительность КН на основе СУНС разработана специальная трехмерная модель течения жидкости. С помощью этой модели были протестированы шесть профилей ротора с разными параметрами эллипса при одинаковых значениях рабочего объема и зазоров. Результаты [4] показали, что конструкция с меньшим эллиптическим осевым отношением обеспечивает большую производительность КН.

В [5] предложена новая конструкция полости КН с постепенно изменяющимся зазором для уменьшения величины и колебаний радиальной возбуждающей силы, действующей на ротор. Геометрия рабочей камеры КН была разработана таким образом, чтобы зазор между кулачками и стенкой камеры постепенно изменялся во время зацепления. Решения СУНС численным методом на динамической сетке позволило изучить особенности течения в камере с предложенной геометрией. Было исследовано влияние пульсации давления на радиальную возбуждающую силу. Приведены некоторые предположения о механизме снижения радиальной возбуждающей силы. Установлено, что по мере увеличения изменяемого значения зазора интенсивность вращающегося вихря уменьшается, а пульсации расхода жидкости в выходном сечении заметно снижаются.

Исследование [6] посвящено КН со спиральной формой кулачков. В качестве математического описания течения жидкости в рабочей полости была ис-

пользована система уравнений Рейнольдса (осредненных СУНС) с моделью турбулентности k-ε. Решение трехмерной задачи получено численным методом на динамической сетке FLUENT. Экспериментальная проверка результатов численного прогнозирования показала, что относительная погрешность находится в диапазоне 2,5–5,7 %. Спиральная форма кулачка позволяет эффективно подавлять вторичные течения, возникновение вихревых структур. Авторы [6] утверждают, что КН имеет наилучшую производительность при угле наклона спирали 45°–60°.

Математическое моделирование для определения производительности КН выполнено в [7]. Анализ проведен с использованием программного обеспечения Ansys CFX для CFD. СУНС, описывающая течение жидкости через КН, решена численным методом с моделью турбулентности SST. Программное обеспечение TwinMesh было использовано для создания структурированных сеток для различных положений ротора. Рассмотрены два случая, когда менялось давление нагнетания. В первом случае абсолютное давление на выходе составляло 1,5 бара, во втором – 1,7 бара. Были рассчитаны изменения массового расхода жидкости на выходе КН.

Результаты одного из первых систематических исследований влияния вязкости перекачиваемой жидкости на производительность КН представлены в [8]. СУНС, описывающая течение в рабочей полости, была решена численным методом на динамической сетке. Верификация модели выполнена с помощью лабораторных экспериментов, изучены течения пяти сред с кинематической вязкостью от 1 до 110 сСт. Расход жидкости с большей вязкостью (110 сСт) на выходе КН оказался на 40 % выше, чем у воды (1 сСт). При снижении частоты вращения ротора (ЧВР) с 400 до 100 об./мин расход на выходе уменьшился на 95 % при кинематической вязкости 11 сСт и на 80 % – при вязкости 72 сСт.

В [9] выполнено теоретическое и экспериментальное исследование влияния количества кулачков на структуру течения в полости КН. В качестве математического описания течения жидкости были использованы уравнения Рейнольдса (осредненная СУНС) и модели турбулентности k-ε. С увеличением числа кулачков средний расход и амплитуда пульсаций расхода на выходе из КН уменьшаются, что эффективно подавляет вторичные течения и образование вихрей. Максимальная радиальная сила при шести кулачках на 36 % меньше, чем при четырех. При количестве лопастей 5 и 6 образуется многоступенчатая последовательная переходная область между областями высокого и низкого давления, которая заметно снижает разность давлений между двумя сторонами радиальных зазоров и уменьшает радиальную утечку жидкости в КН.

В [10] предложен метод снижения колебаний расхода КН, основанный на использовании некруглого зубчатого привода с регулируемой ЧВР. На основе численного моделирования СУНС было исследовано влияние конструктивных параметров некруглого зубчатого колеса, углового отклонения, зазора между кулачками и ЧВР на пульсацию расхода жидкости. Результаты исследования показали, что колебания расхода на выходе КН уменьшились на 84 % после установки некруглого редуктора Фурье. Уменьшение зазора между кулачками с 0,4 до 0,2 мм привело к снижению амплитуды колебаний расхода примерно на 54 %. При увеличении ЧВР с 200 до 600 об./мин амплитуда пульсаций расхода жидкости уменьшилась более чем на 60 %. Лабораторный эксперимент на прототипе КН подтвердил такую возможность снижения колебаний расхода жидкости.

Чтобы исследовать влияние входного D и выходного d диаметров на производительность КН, в [11] выполнен анализ течений в рабочей камере одиннадцати КН (шесть с $D=d$ и пять с различным соотношением D/d при сохранении других условий постоянными). Для математического описания трехмерного нестационарного течения в рабочей камере были использованы уравнения Рейнольдса (осредненная СУНС) и модель турбулентности $k-\varepsilon$. Краевая задача решалась численным методом с учетом кавитации. Авторы [11] полагают, что выбор подходящего соотношения диаметров может снизить колебания расхода жидкости на выходе и, таким образом, повысить его надежность и стабильность.

Заметим, за исключением [8], в перечисленных публикациях практически не заострено внимание на вязкость перекачиваемой жидкости, ее влияние на величину и колебания производительности КН.

Гораздо меньше научных публикаций по второму направлению исследований КН. В открытых публикациях удалось обнаружить результаты систематических исследований по повышению эффективности использования серийно выпускаемых КН только двух научных групп – Нижегородского государственного агро-технологического университета [12, 13] и Калининградского государственного технического университета [14–16]. Кроме того, многие компании, изготовители КН, проводят серьезные испытания, изучают влияние свойств перекачиваемых жидкостей и технических параметров своих агрегатов на их производительность и энергетическую эффективность. Часть компаний размещают результаты испытаний на своих интернет-ресурсах в открытом доступе. Наиболее полные результаты с указанием всех условий испытаний приведены на ресурсах ^{1,2,3}.

Заметим, что в [12, 13] главное внимание уделено влиянию КН на свойства транспортируемой пищевой среды, в частности мороженого. Собственно КН лишь упоминаются, например, в [13] КН фирмы «Альфа Лаваль». Очень мало говорится о технических характеристиках КН, так, в [13] указано, что увеличение динамической вязкости мороженого с 3,17 до 9,79 мПа·с привело к росту потребляемой энергии КН примерно на 4,3 %.

В [14–16] на основании анализа результатов испытаний КН предложены модели, описывающие влияние перепада давления, ЧВР и вязкости перекачиваемой среды на подачу пищевых сред (в частности ПС) при их межоперационном транспортировании. Однако в каждой из публикаций исследованы агрегаты только одной из названных выше компаний. До сих пор не проводилось сравнительного анализа производительности КН, изготовленных разными компаниями. Целью данной статьи является сравнительный анализ производительности КН, выпу-

¹ Waukesha Cherry-Burrell. Rectangular flange positive displacement pumps. URL: <https://www.spxflow.com/waukesha-cherry-burrell/products/universal-1-series-rectangular-flange-positive-displacement-pumps/> (accessed 08.03.2025).

² Pomac Industries Group. Food Beverages Lobe Pump PLP. URL: <https://www.pomacpumps.com/en/food-beverages/lobe-pump-plp/> (accessed 08.03.2025).

³ KSB Aktiengesellschaft. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet. URL: <https://www.ksb.com/en-se/lc/products/pump/dry-installed-pump/vitalobe/V06A> (accessed 02.02.2025).

ценных разными компаниями, при межоперационном транспортировании пищевых сред с большой вязкостью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для сравнения подачи КН, произведенных разными компаниями, были выбраны двухручачковые (bi-wing rotor) агрегаты с близким рабочим объемом V_1 (объем воды, который КН перекачивает за один оборот ротора при отсутствии перепада давления). В табл. 1 представлены технические параметры КН трех компаний, по которым в открытом доступе имеются наиболее полные результаты испытаний, проведенных в широком диапазоне вязкостей транспортируемых жидкостей (ΔP_{max} – максимальный допустимый перепад давления, D – входной и выходной диаметр). У указанных насосов одинаковая максимальная допустимая величина ЧВР (на воде) $n_{max} = 1000$ об./мин ($16,67 \text{ с}^{-1}$).

Таблица 1. Технические параметры КН трех компаний

Table 1. Technical parameters of LP manufactured by the three companies

Марка КН	Компания	V_1 , дм^3	D , мм	ΔP_{max} , МПа
034-WCB	Waukesha Cherry-Burrell ¹	0,227	38	0,75
PLP 2-1.5	Pomac Industries Group ²	0,220	38	1,5
Vitalobe-215	KSB Aktiengesellschaft ³	0,240	38	2,2

В [14–16] использовано два подхода к моделированию производительности КН. В первом подходе [14, 15] исходной является нагрузочная характеристика, полученная по данным испытаний КН при перекачивании воды ($\text{дм}^3/\text{с}$):

$$Q_W \equiv f_W(n, p) = V_1 \cdot [n - n_{W0}(p)], \quad (1)$$

где V_1 – объем воды, перекачиваемой за один оборот при нулевом перепаде давления, дм^3 ; n – ЧВР, с^{-1} ; n_{W0} – минимально необходимая (МН) ЧВР для начала перекачивания воды, с^{-1} ; $p = \Delta P/P_A$ – безразмерный перепад давления; P_A – атмосферное давление, причем по данным испытаний^{1,2} $n_{W0}(0)=0$ и $f_W(n, 0) = V_1 \cdot n$.

В [14] было предложено МН ЧВР для воды рассчитывать по формуле

$$n_{W0} = A \cdot p^\alpha, \quad (2)$$

где α , A – эмпирические константы. Их значения, подобранные методом наименьших квадратов, позволили с высокой точностью рассчитывать нагрузочную характеристику КН на воде с помощью формул (1), (2).

Далее в [14] на основе анализа данных испытаний КН WCB была получена зависимость подачи КН от перепада давления, ЧВР и вязкости перекачиваемой жидкости, опирающаяся на (1):

$$Q \equiv f(n, p, \eta) = f_W(n, 0) - [f_W(n, 0) - f_W(n, p)]/\eta^\gamma, \quad (3)$$

где η – безразмерный коэффициент динамической вязкости (БКДВ) исследуемой жидкости, отнесенный к соответствующему значению у воды при 20°C ; γ – эмпирический показатель влияния вязкости жидкости на производительность КН.

Идея (3) заключается в следующем: с одной стороны, при $\eta = 1$ после раскрытия скобок получим $Q = f_w(n, p)$; с другой стороны, при очень большой величине БКДВ ($\eta \rightarrow \infty$) $f(n, p, \eta) = V_1 \cdot n$. Результаты расчетов по формуле (3) хорошо согласуются с данными испытаний для жидкостей со сравнительно небольшими величинами БКДВ (примерно до $\eta = 30$). Относительная погрешность составляет менее 1 %. Если же формулу (3) применить к расчету подачи пищевых сред с высокой вязкостью, как у ПС, погрешность расчетов может превысить 15 %.

Формулу (3) преобразуем к следующему виду

$$f(n, p, \eta) = V_1 \cdot (n - A \cdot p^\alpha / \eta^\gamma). \quad (4)$$

Из сравнения (4) с (1) следует, что второй член в скобках (4) представляет собой n_0 – МН ЧВР начала перекачивания для произвольной жидкости, а не n_{w0} для воды, как в формуле (1). При альтернативном подходе в качестве основы для моделирования принимается нагрузочная характеристика высоковязких сред:

$$Q \equiv F(n, p, \eta) = V_1 \cdot (n - n_0), \quad n_0 \equiv \Psi(p, \eta) = B \cdot p^\alpha. \quad (5)$$

Данные измерения МН ЧВР при подаче высоковязких сред имеются на ресурсах^{1,2,3}. Для определенности воспользуемся данными испытаний КН Vitalobe-215. Было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по формуле (5) МН ЧВР, при котором начинается перекачивание жидкости. Оказалось, что величину α можно считать константой C_1 только при $\eta > 10$; до этого α является возрастающей линейной функцией от логарифма η (рис. 1а):

$$\alpha \equiv \varphi(\eta) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln \eta, & \text{при } \eta \leq 10 \\ C_1, & \text{при } \eta > 10. \end{cases} \quad (6)$$

где эмпирические константы для Vitalobe-215 равны: $\alpha_0 = 0,625$; $\alpha_1 = 0,077$; $C_1 = 0,80$.

Величина B во всем исследованном диапазоне КДВ оказалась убывающей линейной функцией от логарифма η (рис. 1 б):

$$B \equiv \psi(\eta) = B_0 - B_1 \ln \eta, \quad (7)$$

где эмпирические константы для Vitalobe-215 равны: $B_0 = 1,674 \text{ с}^{-1}$; $B_1 = 0,264 \text{ с}^{-1}$.

По рис. 1 согласие результатов расчетов по формулам (6), (7) с экспериментальными точками вполне удовлетворительное. Формула для МН ЧВР будет следующей:

$$\Psi(p, \eta) = \psi(\eta) \cdot p^{\varphi(\eta)}. \quad (8)$$

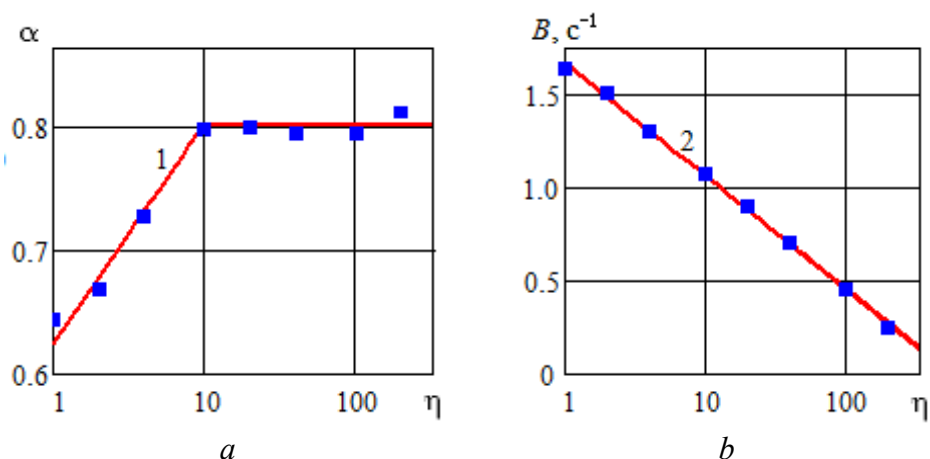


Рис. 1. Зависимость параметров КН Vitalobe-215 в формуле (5) от БКДВ: a – показатель степени; b – размерный коэффициент.

Точки – экспериментальные данные³,

линии: 1 – расчет по формуле (6), 2 – расчет по формуле (7)

Fig. 1. The dependence of the Vitalobe-215 LP parameters in formula (5) on the NEDV: a – an indicator of the degree; b – the dimensional coefficient. Points are experimental data³, lines: 1 – calculation according to formula (6), 2 – calculation according to formula (7)

Для сравнения производительности разных КН перейдем к безразмерной подаче:

$$q = Q/(V_1 \cdot n_{\max}). \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9) и вводя безразмерную величину ЧВР (БЧВР), получим:

$$q = \bar{n} - b \cdot p^{\phi(\eta)}, \quad \bar{n} = n / n_{\max}, \quad b = \psi(\eta) / n_{\max}. \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета производительности КН Vitalobe-215 по формулам (5)–(8) хорошо согласуются с опытными данными, причем погрешность снижается с ростом БКДВ (рис. 2). Некоторое отклонение экспериментальных точек от расчетной линии наблюдается лишь в наименьшем (из рассмотренных) значении БКДВ (линия 1), однако ЭДВ рассматриваемых пищевых сред (например, плавленых сыров) в диапазоне используемых ЧВР и температур заведомо больше 100. С увеличением БКДВ производительность КН растет, линии на рис. 5 смещаются вправо-вверх, что связано с уменьшением утечек через зазоры. При $\eta=600$ (линия 4) и выше производительность достигает наибольших значений $Q = V_1 n$.

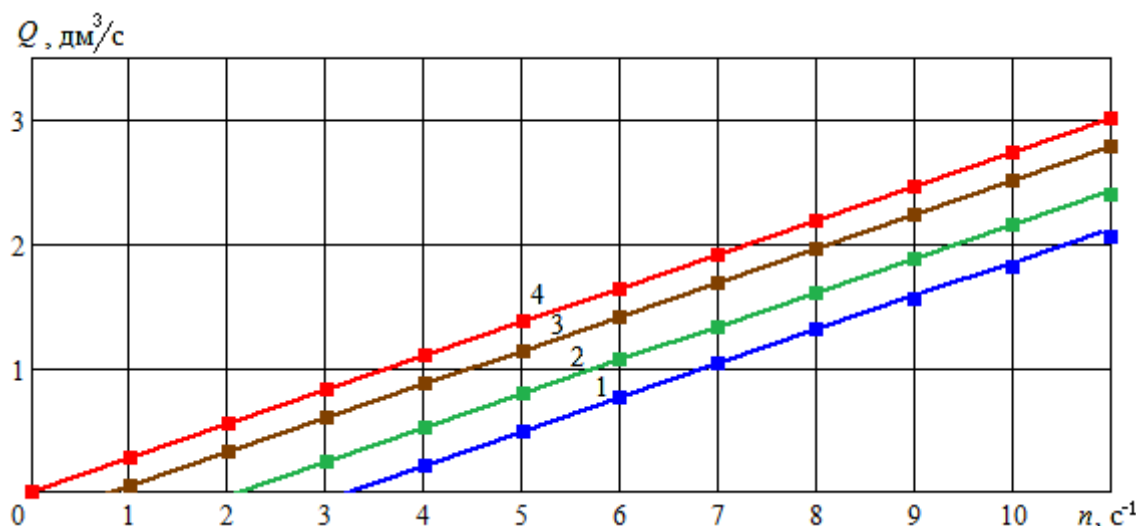
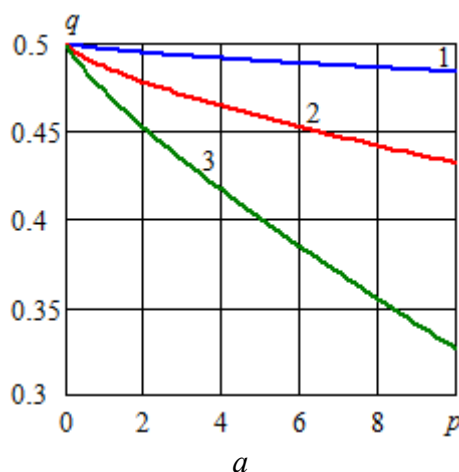


Рис. 2. Зависимость подачи КН Vitalobe-215 от ЧВР при $p=4$ и разных значениях БКДВ: 1 – $\eta=10$; 2 – $\eta=40$; 3 – $\eta=200$; 4 – $\eta=600$. Точки – экспериментальные данные³, линии – расчет по формуле (5)

Fig. 2. The dependence of the LP Vitalobe-215 performance on the speed rotor at $p=4$ and different NEDV: 1 – $\eta=10$; 2 – $\eta=40$; 3 – $\eta=200$; 4 – $\eta=600$. Points are experimental data³, lines are calculated using formula (5)

На рис. 3 представлены результаты расчета по формуле (10) зависимости безразмерной производительности КН трех компаний от перепада давления при различных значениях БКДВ перекачиваемой жидкости при разных перепадах давления. Видно, что безразмерная производительность всех КН снижается с увеличением перепада давления и уменьшением БКДВ. Однако имеется существенное количественное различие, наибольшее значение безразмерной производительности у КН 034-WCB. Так, при $p=8$, $\eta=100$ (рис. 3 а) у КН PLP 2-1.5 она меньше на 9,1 %, у КН Vitalobe-215 – на 27 %; при $p=8$, $\eta=200$ (рис. 3 б) – меньше на 7,1 % и 15,9 % соответственно; при $p=8$, $\eta=380$ (рис. 3 с) – меньше на 4,1 % и 6,5 % соответственно. Однако при $\eta=600$ и более разница между значениями безразмерной производительности исследованных КН становится менее 1 %.



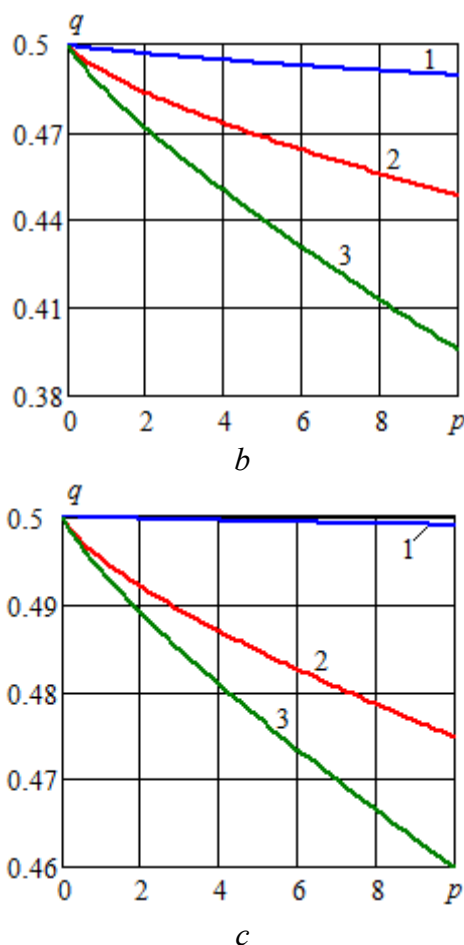


Рис. 3. Зависимость безразмерной производительности КН трех компаний от БКДВ перекачиваемой жидкости при $\bar{n} = 0,5$ и разных БКДВ: 1 – 034-WCB, 2 – PLP 2-1.5, 3 – Vitalobe-215; а – $\eta=100$; б – $\eta=200$; в – $\eta=380$

Fig. 3. The dependence of the minimum required rotational speed of the three companies LP on pressure drops at $\bar{n} = 0.5$ and different NCDV: 1 – 034-WCB, 2 – PLP 2-1.5, 3 – Vitalobe-215; а – $\eta=100$; б – $\eta=200$; в – $\eta=380$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнен сравнительный анализ производительности коловратных насосов, изготовленных тремя компаниями, при транспортировании пищевых сред с большой вязкостью. В ходе исследования показано, что для моделирования подачи коловратными насосами пищевых сред с большой вязкостью (например, ПС) следует использовать подход, базирующийся на нагрузочной характеристике с наибольшими значениями БКДВ. Подход, основанный на модификации нагрузочной характеристики КН, перекачивающего воду, пригоден лишь для сравнительно маловязких пищевых жидкостей (например, сливок). Выполнено исследование зависимости минимально необходимой ЧВР КН от перепада давления и БКДВ. Установлено, что МН ЧВР у всех изученных КН снижается с увеличением БКДВ и уменьшением перепада давления, однако абсолютные значения МН ЧВР могут существенно различаться при $\eta < 200$.

Для корректного сравнения производительности КН с небольшим различием рабочего объема предложен метод приведения нагрузочной характеристики к безразмерной форме (зависимость безразмерной подачи от безразмерных величин перепада давления и ЧВР). Установлено, что при БКДВ более 600 разница между значениями безразмерной производительности исследованных КН становится менее 1 % и может не учитываться.

В данной работе все расчеты были выполнены на основе находящихся в открытом доступе результатов испытаний КН трех компаний^{1,2,3}. Полученные результаты могут быть использованы для подбора параметров КН, необходимых в производственном процессе. В дальнейшем целесообразно выполнить сравнительный анализ энергетической эффективности КН разных производителей.

Список источников

1. Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов: монография / А. В. Горбатов. – Москва: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.
2. Подрезов, А. Насосы для пищевой промышленности / А. Подрезов // Переработка молока. – 2016. – № 9 (203). – С. 26–27.
3. Луговая, И. С. Классификация гидравлических систем для перекачивания высоковязких жидкостей / И. С. Луговая // Наука и техника. – 2019. – Т. 18. – № 5. – С. 422–426.
4. Hsieh, C.-F. A new curve for application to the rotor profile of rotary lobe pumps / C.-F. Hsieh // Mechanism and Machine Theory. – 2015. – V. 87. – P. 70–81.
5. Li, Y. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap / Y. Li., D. Guo, X. B. Li. // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2018. – V. 12. – N 1. – P. 711–723.
6. Numerical analysis and verification of flow characteristics of rotor cavity of spiral rotary lobe pump / Y. Li, X. Zhang, D. Guo, X. Wang // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2018. – V. 34. – N 10. – P. 62–67.
7. Malael, I., Costea, F., Draghici, M. Flow evaluation of the lobe pump using numerical methods // Applied Physics, System Science and Computers III. – 2019. – V. 574. – P. 301–309.
8. Li, Y., Du, J., Guo, D. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – V. 41. – P. 1–11.
9. Amer, M., Vaca, A., Bowden, M. Effects of different blade numbers on radial exciting force of lobe pump rotor. Bioprocess and Biosystems Engineering. – 2022. – V. 45. – N 9. – P. 1477–1488.
10. Flow fluctuation abatement method and flow characteristics of lobe pump by external non circular gear drive / D. Liu, C. Xu, L. Shi [et al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2024. – V. 38. – P. 271–284.
11. Numerical analysis of the inlet and outlet diameter effects on pulsation dynamics and cavitation in the lobe pump / H. Zhou, P. Zhou, L. Meng [et al.] // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2025. – V. 18. – N 5. – P. 1189–1204.
12. Гинойн, Р. В., Кулаткова, А. С. Применение кулачковых насосов в технологической линии производства мороженого с целью стабилизации подачи смеси / Р. В. Гинойн, А. С. Кулаткова // Современные аспекты производства и пе-

переработки сельскохозяйственной продукции: материалы VI Международной научно-практ. конференции (Краснодар, 31 марта 2020). – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2020. – С.88–92.

13. Гинойян, Р. В., Пасин, А. В., Кулаткова, А. С. Влияние содержания различных доз сухого обезжиренного молока на структурно-механические свойства смесей мороженого и энергопотребление технологического оборудования при производстве мороженого «Пломбир» / Р. В. Гинойян, А. В. Пасин, А. С. Кулаткова // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 2 (81). – С. 18–25.

14. Ахмедова, Н. Р., Левичева, О. И., Наумов, В. А. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на производительность кулачковых насосов (на примере перекачивания рыбного жира) / Н. Р. Ахмедова, О. И. Левичева, В. А. Наумов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2022. – № 3. – С.74–81.

15. Akhmedova, N. R., Levicheva, O. I., Naumov, V. A. Performance characteristics of rotary lobe pumps for high viscosity food medium / N. R. Akhmedova, O. I. Levicheva, V. A. Naumov // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. – 2024. – V. 1420. – N 1. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1420/1/012013> (дата обращения: 08.03.2025).

16. 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.

References

1. Gorbatov A. V. *Reologiya myasnykh i molochnykh produktov: monografiya* [Rheology of meat and dairy products: monograph]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1979. 384 p.
2. Podrezov A. Nasosy dlya pishchevoy promyshlennosti [Pumps for the food industry]. *Pererabotka moloka*. 2016, no. 9 (203), pp. 26–27.
3. Lugovaya I. S. Klassifikatsiya gidravlicheskich sistem dlya perekachivaniya vysokovyazkikh zhidkostey [Classification of hydraulic systems for pumping highly viscous liquids]. *Nauka i tekhnika*. 2019, vol. 18, no. 5, pp. 422–426.
4. Hsieh C.-F. A new curve for application to the rotor profile of rotary lobe pumps. *Mechanism and Machine Theory*. 2015. V. 87. P. 70–81.
5. Li Y., Guo D., Li X. B. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2018. V. 12. N 1. P 711–723.
6. Li Y., Zhang X., Guo X. D. Wang Numerical analysis and verification of flow characteristics of rotor cavity of spiral rotary lobe pump. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2018. V. 34. N 10. P. 62–67.

7. Malael I., Costea F., Draghici M. Flow evaluation of the lobe pump using numerical methods. *Applied Physics, System Science and Computers III*. 2019. V. 574. P. 301–309.
8. Li Y., Du J., Guo D. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019. V. 41. P. 1–11.
9. Amer M., Vaca A., Bowden M. Effects of different blade numbers on radial exciting force of lobe pump rotor. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2022. V. 45. N 9. P. 1477–1488.
10. Liu D., Xu C., Shi L., Tian B., Jin X. Flow fluctuation abatement method and flow characteristics of lobe pump by external non circular gear drive. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. V. 38. P. 271–284.
11. Zhou H., Zhou P., Meng L., Li J., Xiang C., Qian H. Numerical analysis of the inlet and outlet diameter effects on pulsation dynamics and cavitation in the lobe pump. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2025. V. 18. N 5. P 1189–1204.
12. Ginoyan R. V., Kulatkova A. S. Primenenie kulachkovykh nasosov v tekhnologicheskoy linii proizvodstva morozhenogo s tsel'yu stabilizatsii podachi smesi [The use of cam pumps in the technological ice cream production line in order to stabilize the supply of the mixture]. *Sovremennye aspekty proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaystvennoy produktsii. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakt. konferentsii* (Krasnodar, 31.03.2020). Krasnodar, Izd-vo KubGAU, 2020, pp.88–92.
13. Ginoyan R. V., Pasin A. V., Kulatkova A. S. Vliyanie sodержaniya razlichnykh doz sukhogo obezzhirennogo moloka na strukturno-mekhanicheskie svoystva smesey morozhenogo i energopotrebleniye tekhnologicheskogo oborudovaniya pri proizvodstve morozhenogo [The effect of the content of various doses of skimmed milk powder on the structural and mechanical properties of ice cream mixtures and energy consumption of technological equipment in the production of ice cream "Plombir"]. *Vestnik VSGU-TU*. 2021, no. 2 (81), pp. 18–25.
14. Akhmedova N. R., Levicheva O. I., Naumov V. A. Vliyanie vyazkosti zhidkikh pishchevykh produktov na proizvoditel'nost' kulachkovykh nasosov (na primere perekachivaniya rybnogo zhira) [The effect of viscosity of liquid foodstuffs on the performance of lobe pumps (using the example of pumping fish oil)]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo*. 2022, no. 3, pp.74–81.
15. Akhmedova N. R., Levicheva O. I., Naumov V. A. Performance characteristics of rotary lobe pumps for high viscosity food medium. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2024, vol. 1420, no. 1. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1420/1/012013> (accessed 08 March 2025).
16. Levicheva O. I. Uovershenstvovanie analiticheskoy modeli nagruzochnykh kharakteristik pishchevykh kolovratnykh nasosov [Improvement of the analytical model

of the load characteristics of food lobe pumps]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2025, vol. 11, no. 1, pp. 18–27.

Информация об авторах

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

О. И. Левичева – аспирант

Information about the authors

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

O. I. Levicheva – postgraduate student

Статья поступила в редакцию 07.04.2025; одобрена после рецензирования 16.04.2025; принята к публикации 17.04.2025.

The article was submitted 07.04.2025; approved after reviewing 16.04.2025; accepted for publication 17.04.2025.

Научная статья
УДК 663.05:664.6(06)
DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-81-95

Применение зеленого чая «Матча» в производстве булочек «Синнабон»

Ольга Павловна Чернега¹, Анна Игоревна Курыжко²

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

¹olga.chernega@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-4150-2731>

²annakuryzhko@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9549-7088>

Аннотация. В статье рассматривается применение зеленого чая «Матча» в производстве булочек «Синнабон» с целью улучшения пищевой ценности и потребительских свойств хлебобулочных изделий. Исследование направлено на изучение влияния порошка зеленого чая «Матча» на физико-химические показатели хлебобулочных изделий, определение массовой доли внесения в рецептуру порошка зеленого чая для придания продукту наилучших органолептических свойств, а также на анализ влияния чая «Матча» на потери при тепловой обработке (упек). В ходе исследования разработаны рецептуры булочек «Синнабон» с различным содержанием зеленого чая «Матча» и проведен сравнительный анализ органолептических показателей контрольных и опытных образцов. Рекомендована рецептура с содержанием порошка зеленого чая в количестве 0,7 г на 100 г продукта. Для булочек «Синнабон», выработанных по данной рецептуре, определены физико-химические показатели: кислотность готовых хлебобулочных изделий с зеленым чаем «Матча» – 2,7 град., влажность – 36,0 %. Потери при тепловой обработке (упек) составили 11,8 %. Установлено, что добавление чая «Матча» в количестве 0,7 г на 100 г продукта способствует улучшению вкусовых характеристик и внешнего вида изделий, а также увеличивает содержание полезных веществ, таких как антиоксиданты, пищевые волокна, витамины. Содержание пищевых волокон увеличилось по отношению к контролю (без чая «Матча») в 1,8 раз и составляет 5,3 г; полифенолов – в 74 раза (74,0 мг); витамина А (ретинол эквив.) – в 1,7 раза (140,0 мкг); витамина К – в 35 раз (24,5 мкг); витамина В₁ – в 1,9 раза (0,19 мг); витамина А (бетта-каротин) – в 10,2 раза (0,47 мг).

Ключевые слова: зеленый чай «Матча», рецептуры, хлебобулочное изделие, булочка «Синнабон», органолептические и физико-химические показатели.

Для цитирования: Чернега О. П., Курыжко А. И. Применение зеленого чая «Матча» в производстве булочек «Синнабон» // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 81–95. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-81-95.

Original article

Use of «Matcha» green tea in the production of "Cinnabon" buns

Olga P. Chernega¹, Anna I. Kuryzhko²

© Чернега О. П., Курыжко А. И., 2025

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

¹olga.chernega@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-4150-2731>

²annakyrizhko@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9549-7088>

Abstract. The article discusses the use of Matcha green tea in the production of Cinnabon buns to improve bakery products' nutritional value and consumer properties. The study is aimed at studying the effect of Matcha green tea powder on the physico-chemical properties of bakery products, determining the mass fraction of green tea powder added to the recipe to impart the best organoleptic properties to the product, and analyzing the effect of Matcha tea on losses during heat treatment (baking). In the course of the study, recipes for Cinnabon buns with different contents of Matcha green tea were developed and a comparative analysis of the experimental samples organoleptic properties was carried out. The recommended recipe is 0.7 g of green tea powder per 100 g of product. For the Cinnabon buns produced according to this recipe, the following physical and chemical parameters were determined: the acidity of the finished bakery products with Matcha green tea was 2.7 degrees, and the humidity was 36.0%. Heat treatment losses (baking) were 11.8%. It was found that adding Matcha tea in the amount of 0.7 g per 100 g of product improved the taste characteristics and appearance of the products, and also increased the content of useful substances, such as antioxidants, dietary fiber, and vitamins. The content of dietary fiber increased in relation to the control (without Matcha tea) by 1.8 times and is 5.3 g; polyphenols – 74 times (74.0 mg); vitamin A (retinol equiv.) – 1.7 times (140.0 mcg); vitamin K – 35.0 (24.5 mcg); vitamin B₁ – 1.9 times (0.19 mg), vitamin A (beta-carotene) – 10.2 times (0.47 mg).

Keywords: green tea "Matcha", recipes, bakery product, "Cinnabon" bun, organoleptic and physicochemical parameters.

For citation: Chernega O. P., Kuryzhko A. I. Use of "Matcha" green tea in the production of "Cinnabon" buns. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025; (78): 81–95. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-81-95.

ВВЕДЕНИЕ

Хлебобулочные изделия являются одними из ключевых продуктов, формирующих потребительскую корзину, и пользуются спросом у населения. В настоящее время в этой категории продуктов сформировались традиционные предпочтения, обусловленные как исторически сложившимися рационами питания, так и современными тенденциями в хлебопечении. Ассортимент хлебобулочных изделий постоянно обновляется, чтобы соответствовать запросам потребителей.

Как известно, качество хлеба можно улучшить, применяя функциональные добавки и различные виды сырья с биологически активными веществами (физиологически активными компонентами). Хлебные изделия дополняют сырьем, содержащим фенольные соединения, пищевые волокна, пектин, водорастворимые витамины, дубильные вещества, органические кислоты, эфирные масла, флавоноиды, каротиноиды, минеральные вещества, белки [1–4]. Обогащать хлеб, а также улучшить его физико-химические и органолептические показатели, расширить ассортимент, увеличить срок хранения, а также интенсифицировать процесс можно и за счет введения добавок, полученных из растительного и животного сырья, химическим путем, микробиологическим синтезом или в результате обработки

природных материалов [5–8]. Иными словами, инновационные хлебопекарные технологии направлены на повышение пищевой ценности и улучшение потребительских свойств хлебобулочных изделий.

Использование нетрадиционного растительное сырья, являющегося источником физиологически активных компонентов, – одно из направлений повышения пищевой ценности хлебобулочных изделий. Известно применение в качестве физиологически активного компонента чая «Матча» в рецептурной композиции йогуртов, сбивных кондитерских изделий, мороженого, алкогольных и безалкогольных напитков, кексов, морской соли, панировочной смеси, картофельного пюре [9–11]. В переводе с японского чай «Матча» означает «растертый чай», представляющий собой порошок зеленого цвета, получаемый путем тонкого помола чайного листа (*Camellia sinensis*) сорта Tencha [9, 12]. Благодаря своему уникальному химическому составу и вкусу, который отличает его от других чайных напитков, он считается чаем высочайшего качества. Его полезные для здоровья человека свойства объясняются высоким содержанием антиоксидантных и противовоспалительных веществ [12, 13].

Исследование направлено на обоснование применения зеленого чая «Матча» в производстве булочек «Синнабон» для улучшения их пищевой ценности и потребительских свойств, в процессе которого:

- оценивали потенциал зеленого чая «Матча» как добавки по содержанию питательных веществ, для которых выявлены и научно обоснованы полезные для сохранения и улучшения здоровья свойства и установлена суточная физиологическая потребность;
- определяли массовую долю внесения зеленого чая «Матча» с целью придания продукту оптимальных органолептических свойств;
- разрабатывали рецептуру булочек «Синнабон» и соотношение компонентов с учетом их химических и органолептических свойств;
- изготавливали изделие согласно разработанной рецептуре по регламентированным параметрам;
- проводили сравнительный анализ потребительских свойств традиционных булочек и булочек с добавлением зеленого чая «Матча»;
- исследовали влияние добавления зеленого чая «Матча» на физико-химические свойства мелкоштучных булочных изделий;
- определяли влияние чая «Матча» на потери (упек) булочек «Синнабон» при тепловой обработке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве ингредиентов для приготовления булочек «Синнабон» использовали сахарную пудру, сахар белый кристаллический, сахар коричневый тростниковый по ГОСТ 33222-2015 «Сахар белый. Технические условия»; муку пшеничную хлебопекарную высшего сорта по ГОСТ 26574-2017 «Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия»; дрожжи хлебопекарные сухие по ГОСТ Р 54845-2011 «Дрожжи хлебопекарные сушеные. Технические условия»; порошок чая «Матча» по ГОСТ 32574-2013 «Чай зеленый. Технические условия»; меланж из куриных яиц по ГОСТ 31654-2012 «Яйца куриные пищевые. Технические условия»; молоко коровье 2,5 % жирности по ГОСТ 31450-2013 «Молоко питьевое. Технические условия»; масло сливочное 72,5 % жирности по ГОСТ 32261-2013

«Масло сливочное. Технические условия»; молотую корицу по ГОСТ ISO 6539-2016 «Пряности. Корица (*Cinnamomum zeylanicum* Blume). Технические условия»; творожный сыр по ГОСТ 33480-2015 «Сыр творожный. Общие технические условия»; ванильный сахар по ГОСТ 16599-71 «Ванилин. Технические условия».

Исследование проводилось на кафедре технологии продуктов питания Калининградского государственного технического университета с помощью эмпирических методов-операций, таких как наблюдение, измерение, изучение научной и патентной литературы, также были применены методы действия – опытная работа и эксперимент. Органолептическую оценку контрольных и опытных образцов булочек определяли по ГОСТ 31986-2012 «Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания», кислотность – по ГОСТ 5679-96 «Хлебобулочные изделия. Методы определения кислотности», влажность – по ГОСТ 21094-2022 «Изделия хлебобучные. Методы определения влажности», пищевую ценность булочек «Синнабон» – расчетным путем [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Чай «Матча», благодаря своей порошкообразной форме, является удобной в использовании пищевой добавкой с комплексом функционально-технологических свойств. Выбор его в качестве физиологически активного компонента рецептурной композиции обусловлен составом чая (табл. 1).

Таблица 1. Содержание питательных веществ в 1 г сухого чая «Матча» [10]

Table 1. Content of nutrients in 1 g of dry "Matcha" tea

Наименование	Содержание	Суточная норма
Пищевые волокна, мг	385,0	20000,0
Адсорбционная радикальная способность кислорода (АРСК), мкмоль	1384,0	5000,0
Полифенолы, мг	100,0	100,0
Теofilлин, мг	6,42	400,0
Кальций, мг	4,2	1000
Медь, мг	0,006	1,0
Железо, мг	0,17	10,0
Магний, мг	2,3	400,0
Фосфор, мг	3,5	800,0
Калий, мг	27,0	2500,0
Натрий, мг	0,06	1300,0
Витамин А (бета-каротин), мкг	595,0	5000,0
Витамин А (ретинол эквив.), мкг	99,17	900,0
Витамин В ₁ , мг	0,06	1,5
Витамин В ₂ , мг	0,0135	1,7
Витамин В ₆ , мг	0,009	2,0
Витамин С, мг	0,6	90,0
Витамин Е, мг	0,281	15,0
Витамин К, мкг	29,0	120,0
Цинк, мг	0,063	12,0

Как видно из табл. 1, чай «Матча» содержит большую концентрацию веществ с антиоксидантным эффектом (полифенолы, бета-каротин, токоферол, аскорбиновая кислота), замедляющих или ингибирующих окислительные процессы, что защищает организм от воздействия свободных радикалов [15]. Адсорбционная радикальная способность кислорода составляет 1384,0 мкмоль/г.

Японскими учеными было установлено, что добавление порошка чая «Матча» в тесто для пирога значительно подавляет накопление во время его выпечки реакционных карбонильных соединений, образующихся в результате перекисного окисления липидов; так, акролеин и 4-гидрокси-ноненаль представляют опасность для здоровья. Способность катехинов чая нейтрализовать карбонильные соединения открывает новые функциональные возможности порошка зеленого чая «Матча», а его термостабильность свидетельствует о возможности использования чая в качестве пищевой добавки [16].

Таким образом, применение зеленого чая «Матча» в производстве булочек «Синнабон» не только обогащает продукт антиоксидантами, но и способствует снижению образования потенциально вредных веществ, повышая функциональную и питательную ценность конечного продукта.

Процесс приготовления контрольных и опытных булочек «Синнабон» осуществляли в соответствии с технологической схемой (рис. 1). Особенностью приготовления стал способ настаивания теста в холодной воде (холодное брожение). Вода помогает клейковине развиваться, делая тесто более мягким и эластичным. В воде тесто лучше обогащается углекислым газом, что способствует улучшению пористости. Также происходит активация ферментов, за счет чего улучшается вкус и текстура теста.

По данной технологии были изготовлены следующие контрольные и опытные образцы булочек:

- контроль (традиционная рецептура без зеленого чая «Матча»);
- опытные образцы с добавлением зеленого чая «Матча» в различных количествах: образец № 1 (0,2 г на 100 г продукта); образец № 2 (0,5 г на 100 г продукта); образец № 3 (0,8 г на 100 г продукта).

Рецептуры булочек «Синнабон» для контрольных и опытных образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Рецептуры контрольных и опытных образцов булочек «Синнабон»
Table 2. Recipes of control and experimental samples of "Cinnabon" buns

Продукт	Масса, г			
	Контроль	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Тесто:				
Мука пшеничная	120,0	119,2	118,4	117,6
Дрожжи сухие	2,4	2,4	2,4	2,4
Порошок чая «Матча»	–	0,8	1,6	2,5
Меланж	9,6	9,6	9,6	9,6
Молоко 2,5 %	48,0	48,0	48,0	48,0
Сахар белый	25,0	25,0	25,0	25,0
Итого	205,0	205,0	205,0	205,0

Начинка:				
Масло сливочное 72,5 %	24,0	24,0	24,0	24,0
Корица молотая	24,0	24,0	24,0	24,0
Сахар тростниковый	24,0	24,0	24,0	24,0
Итого	72,0	72,0	72,0	72,0
Крем:				
Творожный сыр	24,0	24,0	24,0	24,0
Сахарная пудра	12,2	12,2	12,2	12,2
Масло сливочное 72,5%	12,2	12,2	12,2	12,2
Ванилин	2,6	2,6	2,6	2,6
Итого	51,0	51,0	51,0	51,0
ИТОГО (2 шт.)	328,0	328,0	328,0	328,0

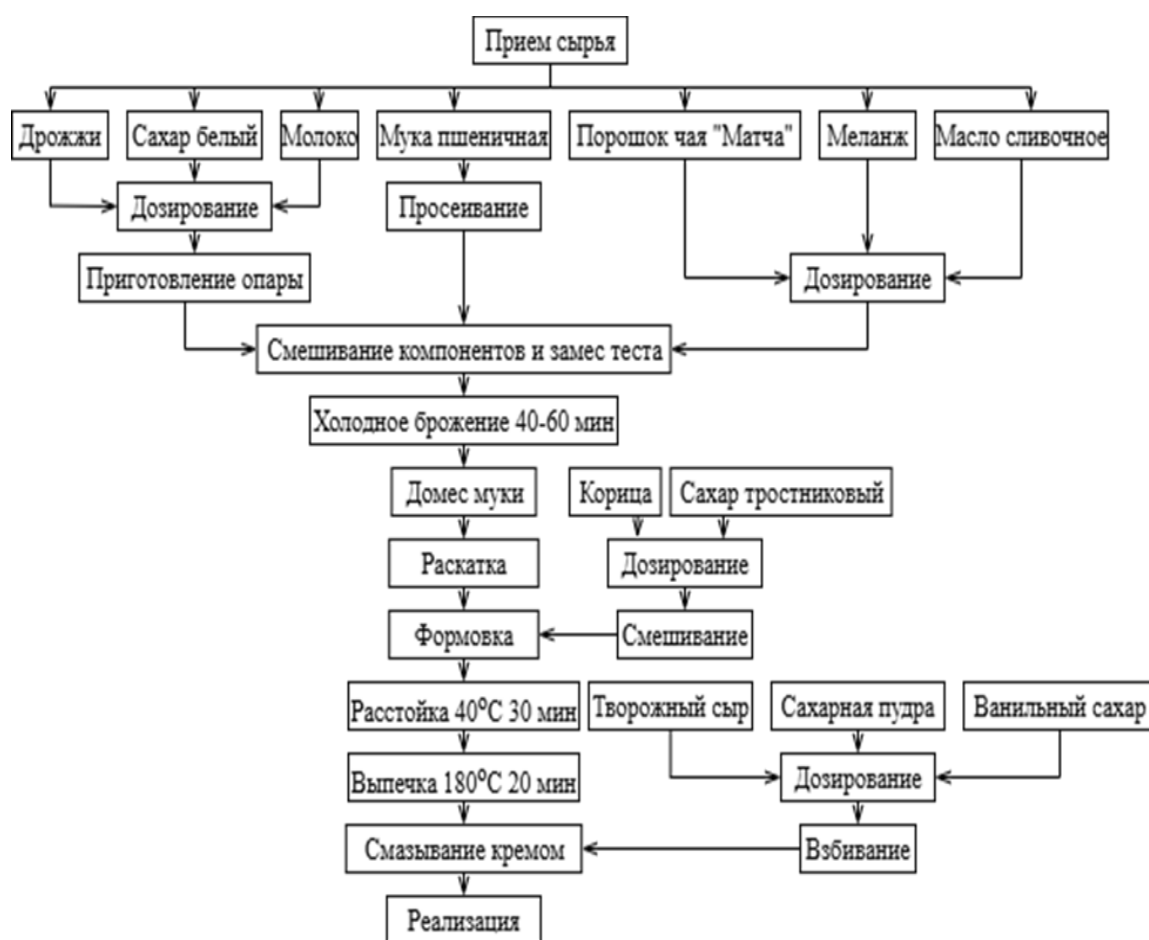


Рис. 1. Технологическая схема производства булочек «Синнабон»

Fig. 1. Technological scheme of "Cinnabon" buns production

Контрольный и опытные образцы раскатанного теста и булочек после расстойки представлены на рис. 2, 3.



Рис. 2. Образцы контрольного и опытных образцов теста для булочек «Синнабон»: а – контроль, б – образец № 1, в – образец № 2, г – образец № 3

Fig. 2. Samples of control and experimental samples of dough for "Cinnabon" buns: а – control, б – sample № 1, в – sample № 2, г – sample № 3



Рис. 3. Образцы контрольного и опытных образцов булочек «Синнабон» после расстойки: а – контроль, б – образец № 1, в – образец № 2, г – образец № 3

Fig. 3. Samples of control and experimental samples of "Cinnabon" buns after proofing: а – control, б – sample № 1, в – sample № 2, г – sample № 3.

После проработки рецептов (выпекания, дегустации) были сделаны следующие промежуточные выводы:

- внесение чая «Матча» не оказывает влияния на технологические параметры производства булочек «Синнабон», однако при раскатке теста наблюдается его уплотнение по сравнению с контрольным образцом, что требует внесения дополнительного количества жидкости в состав теста;

- добавление чайного порошка изменяет органолептические характеристики готового продукта: зеленый чайный порошок окрашивает тесто от светло-салатового до травяного цвета в зависимости от количества его внесения, после выпечки булочки сохраняют приятный зеленый цвет и приобретают новый интересный привкус.

Переработанные рецепты с учетом свойств зеленого чая «Матча» представлены в табл. 3.

Таблица 3. Рецептуры контрольных и опытных образцов булочек «Синнабон»

Table 3. Recipes of control and experimental samples of "Cinnabon" buns

Продукт	Масса, г			
	Контроль	Образец № 1 (0,2 г на 100 г чая «Матча»)	Образец № 2 (0,5 г на 100 г чая «Матча»)	Образец № 3 (0,7 г на 100 г чая «Матча»)
Тесто:				
Мука пшеничная	120,0	119,2	118,4	117,6
Дрожжи сухие	2,4	2,4	2,4	2,4
Зеленый чай «Матча»	–	0,8	1,6	2,5
Меланж	9,6	9,6	9,6	9,6
Молоко 2,5 %	48,0	60,0	60,0	60,0
Сахар белый	25,0	25,0	25,0	25,0
Итого	205,0	217,0	217,0	217,0
Начинка:				
Масло сливочное 72,5 %	24,0	24,0	24,0	24,0
Корица молотая	24,0	24,0	24,0	24,0
Сахар тростниковый	24,0	24,0	24,0	24,0
Итого	72,0	72,0	72,0	72,0

Крем:				
Творожный сыр	24,0	24,0	24,0	24,0
Сахарная пудра	12,2	12,2	12,2	12,2
Масло сливочное 72,5 %	12,2	12,2	12,2	12,2
Ванилин	2,6	2,6	2,6	2,6
Итого	51,0	51,0	51,0	51,0
ИТОГО (2 шт.)	328,0	340,0	340,0	340,0

Далее, согласно вышеуказанным рецептурам, были изготовлены контрольные и опытные образцы булочек «Синнабон», в которых определяли органолептические показатели и потери при тепловой обработке (упек), приведенные в табл. 4.

Образцы булочек «Синнабон» после расстойки и выпечки представлены на рис. 4, 5.



а

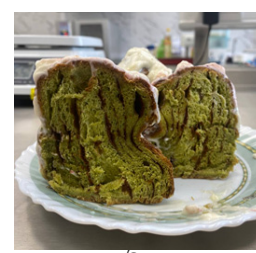


б

Рис. 4. Булочки «Синнабон» после расстойки: а – контроль, б – образец № 3
Fig. 4. "Cinnabon" buns after proofing: a – control, b – sample № 3



а



б

Рис. 5. Выпеченные образцы булочек «Синнабон»: а – контроль, б – образец № 3
Fig. 5. Baked samples of "Cinnabon" buns: a – control, b – sample № 3.

Таблица 4. Упек контрольных и опытных образцов булочек «Синнабон»

Table 4. Losses during heat treatment of control and experimental samples of "Cinnabon" buns

Образцы	Упек, %
Контроль	12,0±1,0
Образец № 1	11,6±0,7
Образец № 2	12,3±1,0
Образец № 3	11,8±1,0

Согласно полученным данным различия в значениях упека между образцами незначительны, что может свидетельствовать о стабильности процесса выпечки и небольшом влиянии добавок на упек.

Полученные хлебобулочные изделия оценивались по органолептическим показателям: внешнему виду (форма, отделка, цвет поверхности), состоянию мякиша (пропеченность, пористость, промес), вкусу и запаху (табл. 5.). Органолептические характеристики полученных контрольных и опытных образцов булочек «Синнабон» представлены в табл. 5.

Оценку комплексных органолептических показателей контрольных и опытных образцов готовых изделий проводили по 5-балльной шкале.

Таблица 5. Органолептическая оценка контрольного и опытных образцов булочек «Синнабон»

Table 5. Organoleptic evaluation of control and experimental samples of "Cinnabon" buns

Показатель	Образцы			
	Контроль	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Внешний вид: Форма	Округлая, спиральная	Округлая, спиральная	Округлая, спиральная	Округлая, спиральная
Отделка	В виде крема белого цвета	В виде крема белого цвета	В виде крема белого цвета	В виде крема белого цвета
Цвет	Коричневый на поверхности, цвет мякиша светло-кремовый со слоями корицы	Коричневый на поверхности, цвет мякиша светло-зеленый со слоями корицы	Коричневый на поверхности, цвет мякиша зеленый со слоями корицы	Коричневый на поверхности, цвет мякиша насыщенно-зеленый со слоями корицы
Состояние мякиша: пропеченность	Пропеченный, не влажный	Пропеченный, не влажный	Пропеченный, не влажный	Пропеченный, не влажный
Пористость	Развитая, без пустот и уплотнений	Развитая, без пустот и уплотнений	Развитая, без пустот и уплотнений	Развитая, без пустот и уплотнений
Промес	Без комочков и следов непромеса	Без комочков и следов непромеса	Без комочков и следов непромеса	Без комочков и следов непромеса
Вкус	Сладкий, сдобный, свойственный данному виду изделия, без постороннего привкуса	Сладкий, сдобный, свойственный данному виду изделия, с легким привкусом зеленого чая «Матча»	Сладковатый, сдобный, свойственный данному виду изделия, с легким привкусом зеленого чая «Матча»	Сладковатый, сдобный, свойственный данному виду изделия, с выраженным привкусом зеленого чая «Матча»
Запах	Свойственный данному виду изделия, без постороннего запаха	Свойственный данному виду изделия, без постороннего запаха	Свойственный данному виду изделия, без постороннего запаха	Свойственный данному виду изделия, без постороннего запаха

В результате органолептической оценки минимальное количество баллов набрал контрольный образец и образец № 1, максимальное – образец № 3. Последний отличался наилучшими органолептическими свойствами: привлекательным насыщенным зеленым цветом, имел интересный вкус с хорошо сбалансированными нотками чая «Матча». В отличие от других образцов он был менее сладким, мякиш обладал более мягкой консистенцией. Данную рецептуру можно рекомендовать к производству на хлебопекарных предприятиях.

Исходя из данных общего химического состава порошка чая «Матча» фирмы BeEko и пищевой ценности чая «Матча» в таблице 1, а также общего химического состава и пищевой ценности всех ингредиентов рецептуры, взятых из справочника химического состава российских пищевых продуктов под редакцией И. М. Скурихина (2002 г.), были посчитаны показатели пищевой ценности на 100 г и на 1 шт. (170 г) готового продукта контрольного и опытного образца № 3 булочек «Синнабон» (табл. 6).

Таблица 6. Показатели пищевой ценности контрольных и опытного образца № 3 булочек «Синнабон»

Table 6. Nutritional value of "Cinnabon" buns control and experimental samples № 3

Образцы	Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г	Пищевые волокна, г	Энергетическая ценность, ккал	Адсорбционная радикальная способность кислорода (АРСК) мкмоль	Полифенолы, мг	Витамин А (ретинол), мкг	Витамин А (бета-каротин), мг	Витамин В ₁ , мг	Витамин К, мкг
На 100 г готового продукта											
Контроль	7,7	10,6	51,5	3,0	333,6	–	–	83,7	0,046	0,1	0,7
% от суточной нормы для мужчин / женщин	6,8/ 8,5	8,3/ 10,6	9,3/ 11,8	12,0/ 12,0	8,7/ 11,2	–	–	9,3/ 10,4	0,9/ 0,9	6,6/ 6,6	0,5/ 0,5
Образец № 3	5,9	14,4	45,6	5,3	335,6	1024,2	74,0	140,0	0,47	0,19	24,5
% от суточной нормы для мужчин / женщин	5,2/ 6,6	11,3/ 14,4	8,3/ 10,5	21,2/ 21,2	8,8/ 11,2	20,5/ 20,5	37,0/ 37,0	15,5/ 17,5	9,2/ 9,2	12,7/ 12,7	20,4/ 20,4
На 170 г (1 шт.) готового продукта											
Контроль	13,0	18,0	87,6	5,1	567,1	–	–	142,1	0,08	0,17	1,19
% от суточной нормы для мужчин / женщин	11,4/ 14,4	14,2/ 18,0	15,9/ 20,1	20,4/ 20,4	14,9/ 18,9	–	–	15,7/ 17,7	5,3/ 5,3	11,3/ 11,3	0,9/ 0,9
Образец № 3	10,3	24,4	77,5	9,0	570,8	1741,1	125,8	238,0	0,8	0,32	41,7
% от суточной нормы для мужчин / женщин	9,0/ 11,4	19,2/ 24,4	14,1/ 18,0	36,0/ 36,0	15,0/ 19,0	34,8/ 34,8	62,5/ 62,5	26,4/ 30,0	16,0/ 16,0	21,3/ 21,3	34,8/ 34,8

Согласно полученным данным 170 г (1 шт.) булочки «Синнабон», содержащей 1,25 г порошка зеленого чая «Матча», удовлетворяет суточную потребность взрослого человека в следующих нутриентах: полифенолах (62,5 %), витамине А (ретинол) (26,4 % для мужчин и 30,0 % для женщин), витамине А (бета-каротин) (16,0 %), витамине В₁ (21,3 %), витамине К (34,8 %), пищевых волокнах (21,2 %), ORAC (34,5 %). В табл. 7 представлены физико-химические показатели образца № 3 булочки «Синнабон».

Таблица 7. Физико-химические показатели булочки «Синнабон» с зеленым чаем «Матча»

Table 7. Physico-chemical parameters of "Cinnabon" buns with green tea "Matcha"

Образец	Показатель	
	Влажность, %	Кислотность, град.
Образец № 3	36,0±1,5	2,7±0,1

Физико-химические показатели влажности и кислотности булочки «Синнабон» с порошком зеленого чая соответствуют ГОСТ 24298-80 «Изделия хлебобулочные мелкоштучные. Общие технические условия».

Дальнейшие исследования будут направлены на установление сроков годности булочек «Синнабон» с добавлением чая «Матча» с учетом коэффициента резерва согласно МУК 4.2.1847-04 «Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов» для разных температурных режимов; на расширение ассортиментного ряда хлебобулочных изделий с вышеуказанной добавкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование зеленого чая «Матча» позволяет обогатить хлебобулочные изделия полезными биологически активными компонентами на 100 г готового продукта: пищевые волокна (5,3 г), витамин А (ретинол) (140 мкг), витамин К (24,5 мкг), полифенолы (74 мг), что увеличивает пищевую ценность готовой продукции.

Добавление порошка чая «Матча» улучшает внешний вид, придает тесту привлекательный зеленоватый оттенок и добавляет интересный аромат и вкус, улучшая потребительские свойства продукта. Наиболее предпочтительным оказалось внесение добавки в количестве 0,7 г на 100 г продукта (образец № 3), обеспечивающее наилучшие органолептические и физико-химические показатели булочек «Синнабон». Проведенное исследование показало, что введение зеленого чая «Матча» незначительно влияет на технологический процесс изготовления булочек и сохраняет стабильность основных характеристик технологического процесса.

Разработанная рецептура булочек «Синнабон» с добавлением зеленого чая «Матча» позволяет расширить ассортимент хлебобулочных изделий и удовлетворить запросы потребителей, стремящихся к здоровому питанию.

Список источников

1. Сравнительный анализ влияния пищевых добавок на технологию производства и качественные показатели хлеба пшеничного / М. А. Заикина, А. Е. Ковалева, Э. А. Пьяникова, А. С. Рязанцева. – DOI: 10.20914/2310-1202-2021-2-79-86. – Текст: электронный // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83, № 2. – С. 79–86. – URL: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-79-86> (дата обращения: 09.06.2025).

2. Шершнева, О. М. Производство хлебобулочных изделий при использовании биологических добавок / О. М. Шершнева, С.Ф. Рюмшина. – Текст: электронный // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3. – С. 18–22. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvo-hlebobulochnyh-izdeliy-pri-ispolzovanii-biologicheskikh-dobavok?ysclid=mbqnf7dk6b669929338> (дата обращения: 09.06).

3. Федорова, Р. А. Применение функциональных добавок и нетрадиционных видов сырья в хлебопекарной промышленности / Р. А. Федорова, В. М. Пономаренко. – Текст: электронный // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2011. – № 1. – С. 209-217. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-funktsionalnykh>

dobavok-i-netraditsionnyh-vidov-syrya-v-hlebopekarnoy-promyshlennosti?ysclid=mbqnmfbcfx834288644 (дата обращения: 09.06.2025).

4. Бисчокова, Ф. А. Применение нетрадиционного сырья для повышения пищевой ценности хлеба / Ф. А. Бисчокова. – Текст: электронный // Главный агроном. – 2024. – № 9. – URL: <https://lib.mkgtu.ru/images/stories/journal-nt/2020-01/001.pdf> (дата обращения: 09.06.2025).

5. Влияние коллагенсодержащих добавок из покровных тканей рыб на качественные характеристики хлеба / В. И. Воробьев, О. П. Чернега, Ю. А. Фатыхов [и др.] – DOI: 10.36107/spfr.2023.4.413. – Текст: электронный // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2023. – № 4. – С. 175–188. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-kollagensoderzhaschih-dobavok-poluchennyh-iz-pokrovnyh-tkaney-ryb-na-kachestvennye-harakteristiki-hleba?ysclid=mbqnnq38c4j256303426> (дата обращения: 09.06.2025).

6. Влияние магнийсодержащей добавки на технологию производства и качественные показатели хлеба пшеничного / Э. А. Пьяникова, А. Е. Ковалева, Е. Д. Ткачева, С. Н. Кобченко. – DOI: 10.24412/2311-6447-2021-3-26-34. – Текст: электронный // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2021. – № 3. – С. 26–34. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-magniysoderzhaschey-dobavki-na-tehnologiyu-proizvodstva-i-kachestvennye-pokazateli-hleba-pshenichnogo?ysclid=mbqnmz3pr684640928> (дата обращения: 09.06.2025).

7. Вершинина, О. Л. Применение пищевых добавок в технологии хлебопечения / О. Л. Вершинина, Н. Н. Корнен, С. А. Ильинова. – Текст: электронный // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2000. – № 5–6. – С. 27–30. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-pischevyh-dobavok-v-tehnologii-hlebopecheniya?ysclid=mbqnsrctqu43333896> (дата обращения: 09.06.2025).

8. Герасименко, Е. В. Применение комплексного хлебопекарного улучшителя S-5000 в производстве хлебобулочных изделий / Е. В. Герасименко, Н. У. Мухаметчина. – Текст: электронный // Технология и аппараты пищевых производств. – 2014. – № 4. С. 232–235. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kompleksnogo-hlebopekarnogo-uluchshatelya-s-5000-v-proizvodstve-hlebobulochnyh-izdeliy> (дата обращения: 09.06.2025).

9. Использование японского чая матча в производстве йогуртов / Ву Тхи Тинь, И. В. Мгебришвили, В. Н. Хоамова [и др.] – Текст: электронный // Пищевая промышленность. – 2017. – № 7 – С. 26–29. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-yaponskogo-chaya-matcha-v-proizvodstve-yogurtov?ysclid=mbqntkqx3w884846961> (дата обращения: 09.06.2025).

10. Обоснование применения зеленого чая «Матча» в производстве сбивных кондитерских изделий функционального назначения / Ж. Новикова, С. Сергеева, А. Захарова, Ю. Семисафонова. – DOI: 10.20914/2310-1202-2019-1-168-172. – Текст: электронный // Вестник ВГУИТ. – 2019. – Т. 81, № 1. – С. 168–172. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-primeneniya-zelenogo-chaya-matcha-v-proizvodstve-sbivnyh-konditerskih-izdeliy-funktsionalnogo-naznacheniya?ysclid=mbqnnwb1qza544026078> (дата обращения: 09.06.2025).

11. Hirasawa, N. Matcha Marble Pound Cake. Just One Cookbook / N. Hirasawa // Just One Cookbook: сайт. – URL: <https://www.justonecookbook.com/matcha-marble-pound-cake/> (дата обращения: 09.06.2025).

12. Health Benefits and Chemical Composition of Matcha Green Tea: A Review / J. Kochman, K. Jakubczyk, Ju. Antoniewicz [et al.]. – Текст: электронный // Molecules. – 2020. – V. 26, N 1. – URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26010085> (дата обращения: 09.06.2025)

13. Антиоксидантные свойства продуктов растительного происхождения / А. А. Лапин, М. Ф. Борисенков, А. П. Карманов [и др.]. – Текст: электронный // Химия растительного сырья. – 2007. – № 2. – С. 79–83. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antioksidantnye-svoystva-produktov-rastitelnogoproishozhdeniya?ysclid=mbqnxsljy4276118935> (дата обращения: 09.06.2025).

14. Липатов, Н. Н. Принципы и методы проектирования рецептур пищевых продуктов, балансирующих рационы питания / Н. Н. Липатов // Известия вузов. Пищевая технология. – 1990. – № 6. – С. 5–10.

15. Antioxidant Properties and Nutritional Composition of Matcha Green Tea / K. Jakubczyk, J. Kochman, A. Kwiatkowska [et al.]. – Текст: электронный // Foods. – 2020. – V. 9, N 4. – P. 483–490. – URL: <https://doi.org/10.3390/foods9040483> (дата обращения: 10.06.2025).

16. Catechins in green tea powder (matcha) are heat-stable scavengers of acrolein, a lipid peroxide-derived reactive carbonyl species / K. Sugimoto, Ya. Matsuoka, K. Sakai [et al.]. – Текст: электронный // Food Chemistry. – 2021. – V. 355, N 6. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129403> (дата обращения: 10.06.2025).

References

1. Zaikina M. A., Kovaleva A. E., Pyanikova E. A., Ryazantseva A. S. (2021). Sravnitel'nyi analiz vliyaniya pishchevykh dobavok na tekhnologiyu proizvodstva i kachestvennye pokazateli khleba pshenichnogo [Comparative analysis of the effect of food additives on the technology and quality indicators of wheat bread]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii – Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies, 83(2), 79–86. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-2-79-86> (accessed: 09.06.2025).

2. Shershneva O. M. (2017). Proizvodstvo khlebobulochnykh izdeliy pri ispol'zovanii biologicheskikh dobavok [Production of bakery products using biological additives]. Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii – Bulletin of Kursk State Agricultural Academy, (3), 18–22. <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvo-hlebobulochnykh-izdeliy-pri-ispolzovanii-biologicheskikh-dobavok> (accessed: 09.06.2025).

3. Fedorova R. A., Ponomarenko V. M. (2011). Primenenie funktsional'nykh dobavok i netraditsionnykh vidov syr'ya v hlebopekarnoy promyshlennosti [Use of functional additives and non-traditional raw materials in bakery production]. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv – Processes and Apparatus of Food Production, (1), 209–217. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-funktsionalnykh-dobavok-i-netraditsionnykh-vidov-syr'ya-v-hlebopekarnoy-promyshlennosti> (accessed: 09.06.2025).

4. Bischokova F. A. (2024). Primenenie netraditsionnogo syr'ya dlya povyshe-niya pishchevoy tsennosti khleba [Use of unconventional raw materials to increase the nutritional value of bread]. Glavnyi agronom – Chief Agronomist, (9). <https://lib.mkgtu.ru/images/stories/journal-nt/2020-01/001.pdf> (accessed: 09.06.2025).

5. Vorob'ev V. I., Chernega O. P., Fatykhov Yu. A., et al. (2023). Vliyanie kollagensoderzhashchikh dobavok iz pokrovnykh tkanei ryb na kachestvennye kharakteristiki khleba [Effect of collagen-containing additives from fish skin on bread quality]. *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya – Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, (4), 175–188. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-kollagenso-derzhaschih-dobavok-poluchennyh-iz-pokrovnyh-tkaney-ryb-na-kachestvennye-hara-cteristiki-hleba> (accessed: 09.06.2025).

6. Pyanikova E. A., Kovaleva A. E., Tkacheva E. D., Kobchenko S. N. (2021). Vliyanie magniysoderzhashchey dobavki na tekhnologiyu proizvodstva i kachestvennye pokazateli khleba pshenichnogo [Effect of magnesium-containing additives on wheat bread production and quality indicators]. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK – Produkty zdorovogo pitaniya – Technologies of Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*, (3), 26–34. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-magniysoderzhashchey-dobavki-na-tehnologiyu-proizvodstva-i-kachestvennye-pokazateli-hleba-pshenichnogo> (accessed: 09.06.2025).

7. Vershinina O. L., Kornien N. N., Ilinova S. A. (2000). Primenenie pishchevykh dobavok v tekhnologii khlebopecheniya [Use of food additives in baking technology]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya – Proceedings of Higher Educational Institutions. Food Technology*, (5–6), 27–30. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-pischevyh-dobavok-v-tehnologii-hlebopecheniya> (accessed: 09.06.2025).

8. Gerasimenko E. V., Mukhametchina N. U. (n.d.). Primenenie kompleksnogo khlebopekarnogo uluchshitelya S-5000 v proizvodstve khlebobulochnykh izdeliy [Application of the complex baking improver S-5000 in bakery production]. *Tekhnologiya i apparaty pishchevykh proizvodstv – Technology and Apparatus of Food Production*. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kompleksnogo-hlebopekarnogo-uluchshitelya-s-5000-v-proizvodstve-hlebobulochnykh-izdeliy> (accessed: 09.06.2025).

9. Vu Thi Tinh, Mgebrishvili I. V., Khamova V. N., et al. (2017). Ispol'zovanie yaponskogo chaya matcha v proizvodstve yogurtov [Use of Japanese matcha tea in yogurt production]. *Pishchevaya promyshlennost' – Food Industry*, (7), 26–29. <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-yaponskogo-chaya-matcha-v-proizvodstve-yogurtov> (accessed: 09.06.2025).

10. Novikova Zh., Sergeeva S., Zakharova A., Semisazhonova Yu. (2019). Obosnovanie primeneniya zelenogo chaya "matcha" v proizvodstve sbivnykh konditerskikh izdeliy [Rationale for using matcha green tea in production of whipped confectionery]. *Vestnik VGUIT – Bulletin of VSUET*, 81(1), 168–172. <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-primeneniya-zelenogo-chaya-matcha-v-proizvodstve-sbivnykh-konditerskikh-izdeliy-funktsionalnogo-naznacheniya> (accessed: 09.06.2025).

11. Hirasawa Chen N. (n.d.). Matcha Marble Pound Cake. *Just One Cookbook*. <https://www.justonecookbook.com/matcha-marble-pound-cake/> (accessed: 09.06.2025).

12. Kochman J., Jakubczyk K., Antoniewicz J., et al. (2021). Health benefits and chemical composition of matcha green tea: A review. *Molecules*, 26. <https://doi.org/10.3390/molecules26010085> (accessed: 09.06.2025).

13. Lapin A. A., Borisenkov M. F., Karmanov A. P., et al. (2007). Antioksidantnye svoystva produktov rastitelnogo proiskhozhdeniya [Antioxidant properties of plant-based products]. *Khimia rastitel'nogo syrya – Chemistry of Plant Raw Materials*, (2), 79–83. <https://cyberleninka.ru/article/n/antioksidantnye-svoystva-produktov-rastitelnogo-proishozhdeniya> (accessed: 09.06.2025).

14. Lipatov N. N. (1990). Printsipy i metody proektirovaniya retseptur pishchevykh produktov, balansiruyushchikh ratsiony pitaniya [Principles and methods for designing food product formulations that balance diets]. Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya – Proceedings of Universities. Food Technology, (6), 5–10.

15. Jakubczyk K., Kochman J., Kwiatkowska A., et al. (2020). Antioxidant properties and nutritional composition of matcha green tea. Foods, 9(4), 483. <https://doi.org/10.3390/foods9040483> (accessed: 10.06.2025).

16. Sugimoto K., Matsuoka Y., Sakai K., et al. (2021). Catechins in green tea powder (matcha) are heat-stable scavengers of acrolein, a lipid peroxide-derived reactive carbonyl species. Food Chemistry, 355, 129403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129403> (accessed: 10.06.2025).

Информация об авторах

О. П. Чернега – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания

А. И. Кuryzhko – студентка 4-го курса кафедры технологии продуктов питания

Information about the authors

O. P. Chernega – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Food Technology Department

A. I. Kuryzhko – 4th year student of the Department of Food Technology

Статья поступила в редакцию 08.07.2025; одобрена после рецензирования 09.07.2025; принята к публикации 11.07.2025.

The article was submitted 08.07.2025; approved after reviewing 09.07.2025; accepted for publication 11.07.2025.

СУДОСТРОЕНИЕ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 629.12 004.8

DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-99-114

Адаптация модели искусственного интеллекта для определения проектных характеристик судна

Денис Дмитриевич Довгополик¹, Павел Романович Гришин², Николай Леонидович Великанов³, Андрей Андреевич Мушенков⁴✉

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

¹ AndryshaFF@yandex.ru

² pavel.grishin@klgtu.ru

³ nikolaj.velikanov@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6833-741>

⁴ andrej.mushenkov@klgtu.ru ✉

Аннотация. В настоящей работе представлено подробное исследование применения методов машинного обучения для прогнозирования ключевых гидродинамических параметров судов. Актуальность работы обусловлена необходимостью сокращения временных и финансовых затрат на традиционные гидродинамические расчеты при проектировании судов. В исследовании проведен сравнительный анализ трех методов машинного обучения – Linear Regression, Random Forest, Gradient Boosting. Эксперименты выполнены на оригинальном наборе данных, включающем 52 существующих судна классов Feeder и Panamax, с характеристиками «длина», «ширина», «осадка», «скорость», «площадь смоченной поверхности» и «коэффициент общей полноты». Основное внимание уделено прогнозированию чисел Фруда и Рейнольдса для предварительной оценки сопротивления. Результаты демонстрируют превосходство линейной регрессии: для числа Фруда достигнуто $R^2 = 0.9986$ при $MSE = 5.15e-07$, для числа Рейнольдса – $R^2 = 0.9998$ при $MSE = 9.00e+13$. Средняя абсолютная процентная ошибка MAPE (Mean Absolute Percentage Error) составила 0,15 % и 0,57 % соответственно. Итоговым результатом является программа расчета на базе искусственного интеллекта (ИИ), которая способна считать значения Fr и Re . Практическая значимость работы обусловлена демонстрацией возможностей новых методов расчета, которые при должном подходе способны повысить точность и оптимизировать процесс классического расчета. Полученные результаты позволяют рекомендовать метод линейной регрессии для предварительной оценки гидродинамических характеристик на ранних этапах проектирования. Практическая значимость работы обусловлена возможностью повышения точности гидродинамических расчетов и оптимизации формы корпуса на основе прогнозируемых данных. Перспективы дальнейших исследований включают расширение набора данных, учет дополнительных параметров и тестирование гибридных моделей.

Ключевые слова: судостроение, искусственный интеллект, машинное обучение, гидродинамика, линейная регрессия, сопротивление судна, число Фруда, число Рейнольдса, прогнозирование.

Для цитирования: Довгополик Д. Д., Гришин П. Р., Великанов Н. Л., Мущенков А. А. Адаптация модели искусственного интеллекта для определения проектных характеристик судна // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 99–114. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-99-114.

Original article

AI Model Adjustment for Determination of Ship Design Characteristics

Denis D. Dovgopolik¹, Pavel R. Grishin², Nikolay L. Velikanov³, Andrey A. Mushenkov⁴✉

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

¹ AndryshaFF@yandex.ru

² pavel.grishin@klgtu.ru

³ nikolaj.velikanov@klgtu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6833-741>

⁴ andrej.mushenkov@klgtu.ru✉

Abstract. This paper presents a detailed study of machine learning methods application for predicting ships key hydrodynamic parameters. The relevance of the work is due to the need to reduce the time and financial costs of traditional hydrodynamic calculations in ship design. In the study a comparative analysis of three machine learning methods – Linear Regression, Random Forest, Gradient Boosting is carried out. Experiments are performed on an original dataset including 52 existing vessels of Feeder and Panamax classes, with characteristics: length, width, draft, speed, wetted surface area and total completeness ratio. The focus is on predicting Froude and Reynolds numbers for preliminary drag estimation. The results demonstrate the superiority of linear regression: for Froude number, $R^2 = 0.9986$ was achieved at $MSE = 5.15e-07$ and for Reynolds number, $R^2 = 0.9998$ at $MSE = 9.00e+13$. The mean absolute percentage error (MAPE) was 0.15% and 0.57%, respectively. The final result is an AI-based calculation program that is able to read Fr and Re values. The practical significance of the work is due to the demonstration of the possibilities of the new calculation methods, which, with a proper approach, can improve the accuracy and optimize the process of classical calculation. The obtained results allow to recommend the method of linear regression for preliminary assessment of hydrodynamic characteristics at the early stages of design. The practical significance of the work is due to the possibility of improving the accuracy of hydrodynamic calculations and hull shape optimization based on the predicted data. Prospects for further research include expansion of the data set, consideration of additional parameters and testing of hybrid models.

Keywords: shipbuilding, artificial intelligence, machine learning, hydrodynamics, linear regression, ship resistance, Froude number, Reynolds number, prediction.

For citation: Dovgopolik D. D., Grishin P. R., Velikanov N. L., Mushenkov A. A. AI Model Adjustment for Determination of Ship Design Characteristics. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(78):99–114. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-99-114.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка сопротивления судна является критически важной задачей на этапе проектирования, определяющей энергоэффективность и эксплуатационные характеристики судна. Традиционные методы требуют значительных вычислительных ресурсов и времени, что делает актуальной разработку альтернативных подходов, способных повысить скорость обработки данных. Одним из перспективных направлений в этом контексте является внедрение методов машинного обучения и ИИ, которые позволяют автоматизировать процесс анализа и прогнозирования [1–4].

Традиционные подходы к прогнозированию гидродинамических параметров, такие как интерполяция табличных данных или численное моделирование, обеспечивают приемлемую точность только на известных точках и не всегда способны учитывать сложные нелинейные зависимости [5]. В то же время, применение методов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности даже при наличии шума и неопределенностей, что особенно важно при решении задач проектирования морских объектов [6–10]. Такие преимущества были подчеркнуты в работах Marrone S. [9] и Scamardella A. [10], рассматривающих ограничения классических методов и перспективы применения ИИ в области гидродинамики.

Особое внимание следует уделить недавним публикациям, освещающим возможности использования машинного обучения в корабельном проектировании. В частности, в статье Чуреева Е. А. и Пинчука В. И., опубликованной в 2024 г. в сетевом научном издании «Вестник молодежной науки» [11], представлено глубокое изучение вопроса применения ИИ для определения остаточного сопротивления корпуса судна на ранних этапах проектирования. Эти исследования подтверждают актуальность и перспективность такого подхода, особенно при работе с параметрическими моделями и предварительными оценками.

Однако возникает закономерный вопрос: целесообразно ли применять методы ИИ для расчета величин, таких как число Фруда ($Fr = gLv$) и число Рейнольдса ($Re = \mu \rho vL$), которые аналитически определяются через четко заданные физические формулы? В данной работе это обосновывается необходимостью построения комплексного подхода к оценке сопротивления судна, где ИИ используется не вместо точных формул, а как инструмент для оперативного получения входных параметров (скорости, длины, вязкости и др.) на основе ограниченного набора исходных данных проекта. Таким образом, модель ИИ применяется как элемент автоматизации и упрощения подготовки исходных данных, особенно на стадии предварительного проектирования [7].

Кроме того, в работе использовались данные, собранные из открытых источников, в том числе онлайн-платформы, предоставляющие информацию о суд-

не и его технических характеристиках. К ним относятся такие ресурсы, как MarineTraffic [12], My Ship Tracking [13], VesselFinder [14], Equasis [15] и мобильное приложение Ship.info [16]. Эти платформы позволили получить достоверные данные о геометрических параметрах, водоизмещении, скорости хода и других характеристиках судов типов Feeder и Panamax, что обеспечило репрезентативность выборки для последующего обучения моделей машинного обучения.

Собранный набор данных включал следующие входные параметры: длину судна между перпендикулярами (LBP), ширину (B), осадку (T), водоизмещение (∇), скорость хода (V), плотность воды (ρ) и ее кинематическую вязкость (ν). На их основе были рассчитаны числа Фруда и Рейнольдса, а также проведено сравнение результатов, полученных с помощью традиционных методов и предложенной модели машинного обучения.

При реализации модели машинного обучения были протестированы различные алгоритмы, включая линейную регрессию, случайный лес (Random Forest) [2] и градиентный бустинг (Gradient Boosting) [3]. Сравнение производилось на основе метрик RMSE и R . Также планируется переход к анализу средней абсолютной процентной ошибки MAPE для более объективной оценки качества предсказания.

Основной целью работы является адаптация моделей машинного обучения для расчета ключевых гидродинамических параметров, таких как числа Фруда и Рейнольдса, на примере судов типов Feeder и Panamax. Для достижения этой цели были выполнены следующие задачи: во-первых, собран и подготовлен набор данных, включающий геометрические параметры судов, условия эксплуатации и соответствующие значения сопротивления; во-вторых, реализованы и протестированы методы машинного обучения, такие как Linear Regression, Random Forest, Gradient Boosting; в-третьих, проведен сравнительный анализ производительности этих методов на основе метрик RMSE и R выбором наиболее эффективного; в-четвертых, результаты, полученные с выбранной моделью, были сопоставлены с результатами традиционных методов; и, наконец, была проведена оценка применимости, точности и эффективности разработанного подхода, а также определены ограничения исследования и намечены направления для дальнейших исследований.

Использование ИИ для определения величин, которые имеют нелинейную зависимость, имеет большой потенциал, так как правильно обученный под конкретную задачу ИИ способен предсказать все возможные значения конкретной величины при различных условиях. Как отмечал В. С. Чувиковский в своей работе [1], «численный алгоритм следует проектировать так, чтобы процесс его реализации моделировал изучаемый объект, исходная информация которого, вносимая в алгоритм, должна отражать причины и условия существования искомого объекта, а внешние и внутренние погрешности конкретной реализации быть такими, чтобы их можно было рассматривать как разброс в условиях идентификации объ-

екта. Повторяя несколько раз реализацию численного алгоритма, сознательно варьируя в заданных пределах его значения, мы получим совокупность таких объектов. В результате численные расчеты будут являться не приближенными, а существенно более точными и достоверными, чем точное механическое решение исходной задачи».

Иными словами, ключевое преимущество численных методов – в их способности через многократные вариации параметров не просто аппроксимировать и интерполировать данные, а полноценно моделировать физическую сущность явления как такового, при любых разных значениях запоминая результат как некий «опыт».

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Данная работа сосредоточена на предсказании чисел Фруда и Рейнольдса с помощью разных способов обучения ИИ. Хотя это не дает непосредственного значения полного сопротивления, тем не менее предсказание этих чисел является важным шагом к более точному и эффективному определению сопротивления судна и позволит в дальнейшем улучшить модели расчета полного сопротивления судна за счет скорости и точности обработки большого объема данных.

Число Рейнольдса (Re) характеризует отношение инерционных сил к силам вязкости и вычисляется по формуле (1):

$$Re = (\rho VL)/\mu, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, V – скорость судна, L – характерный линейный размер (обычно длина), μ – динамическая вязкость воды.

Число Фруда (Fr) характеризует отношение инерционных сил к силам плавучести, определяя величину волнового сопротивления, и вычисляется по формуле (2):

$$Fr = V/\sqrt{(gL)}, \quad (2)$$

где V – скорость судна, g – ускорение свободного падения, L – характерный линейный размер (обычно длина).

Для проведения машинного обучения используется набор данных, состоящий из 52 примеров судов, относящихся к классам Feeder и Panamax. Этот набор данных содержит различные параметры, характеризующие геометрию судов (длина общая и по ватерлинии, ширина, осадка, площадь смоченной поверхности) и их рабочие условия (скорость, глубина воды, коэффициент общей полноты). Такое разнообразие параметров, которых больше, чем надо для определения чисел Фруда и Рейнольдса, обусловлено тем, что в дальнейшем этот же файл будет ис-

пользован и для обучения иных моделей, которые будут заняты расчетом других параметров. Разные «классы» судов обусловлены «практичностью», ведь разнообразие данных снизит возможность появления в будущем такого эффекта, как «переобучение» моделей.

Сами данные представлены в виде электронной таблицы Excel (табл. 1) и применяются для обучения алгоритмов ИИ с целью прогнозирования чисел Фруда и Рейнольдса. Эти параметры будут непосредственно применяться в процессе обучения, что делает такой набор данных ключевым элементом исследования.

Сбор данных о судах был одной из главных задач «предварительного этапа». Было принято решение обратиться к открытым базам данных в сети интернет – сайтам-трекерам судов по типу MarineTraffic [12], MyShipTracking [13] и VesselFinder [14], затем – к конкретным базам данных, таких как сайт Equasis [15] и приложение Ship.info infoship.xyz [16].

В данном исследовании для прогнозирования чисел Фруда и Рейнольдса были использованы три распространенных метода работы ИИ – Linear Regression (линейная регрессия), Random Forest (случайный лес), Gradient Boosting (градиентный бустинг). Каждый из этих методов имеет свои особенности, преимущества и недостатки, что дает повод для экспериментального анализа их применения. Сравнительный анализ результатов всех трех моделей позволит определить наиболее подходящий метод для прогнозирования чисел Фруда и Рейнольдса на основе имеющегося набора данных. Выбор наилучшей модели будет основан на тщательной оценке точности и других соответствующих метрик.

Математически модель линейной регрессии можно представить в виде формулы (3):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (3)$$

где y – прогнозируемое значение (число Фруда или Рейнольдса), b_0 – свободный член (смещение), $b_1, b_2, \dots, b_n$ – коэффициенты регрессии, $x_1, x_2, \dots, x_n$ – входные признаки (параметры судна).

Обучение модели линейной регрессии сводится к подбору коэффициентов $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$, которые минимизируют ошибку между предсказанными и фактическими значениями целевой переменной.

В качестве преимуществ можно отметить простоту реализации и интерпретации результатов, быстрое обучение и предсказание.

Как недостаток следует отметить, что способ предполагает линейную зависимость между признаками и целевой переменной, что может не всегда выполняться в реальных данных (чувствительность к выбросам).

Таблица 1. Данные для обучения модели
Table 1. Data for model training

№	Length	breadth	Draf...	length O.	speed	Wetted	water depth	block coef.	Disp.	L\B	B/T
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	180	28	8	153	12	490,5865	50	0,62004	25000	6,428571	3,5
2	175	27	8	148,75	12	475,0083	50	0,740741	28000	6,481481	3,375
3	185	29	8,5	157,25	12,5	521,7346	50	0,657859	30000	6,37931	3,411765
4	160	26	7,5	136	11	431,5515	50	0,705128	22000	6,153846	3,466667
5	170	27	8	144,5	11,5	468,1733	50	0,680828	25000	6,296296	3,375
6	190	30	9	161,5	13	553,3679	50	0,643275	33000	6,333333	3,333333
7	280	34	10,5	238	13	772,4466	75	0,55022	55000	8,235294	3,238095
8	270	34	10	229,5	13,5	740,247	75	0,631808	58000	7,941176	3,4
9	265	32	10	225,25	13	729,0342	75	0,648585	55000	8,28125	3,2
10	285	35	11	242,25	14	809,2974	75	0,565049	62000	8,142857	3,181818
11	275	33	10,5	233,75	13,5	754,177	75	0,629673	60000	8,333333	3,142857
12	272	33,5	11	231,2	14	773,4968	75	0,568681	57000	8,119403	3,045455
13	278	34	10,8	236,3	13,4	780,6009	75	0,577969	59000	8,176471	3,148148
14	270	32,5	10,6	229,5	13,2	745,1296	75	0,591302	55000	8,307692	3,066038
15	275	33,5	10,9	233,75	13,1	774,2074	75	0,577596	58000	8,208955	3,073394
16	266	32	10,4	226,1	12,9	726,922	75	0,598702	53000	8,3125	3,076923
17	280	34,8	11,1	238	13,6	803,4992	75	0,563988	61000	8,045977	3,135135
18	286	35	11,3	243,1	13,7	821,6968	75	0,556965	63000	8,171429	3,097345
19	276	33,5	10,7	234,6	13,1	768,4651	75	0,596368	59000	8,238806	3,130841
20	269	32,3	10,3	228,65	12,7	730,8889	75	0,603395	54000	8,328173	3,135922
21	270	33	10,5	229,5	12,9	747,2894	75	0,587889	55000	8,181818	3,142857
22	274	34	10,9	232,9	13,2	778,5443	75	0,571179	58000	8,058824	3,119266
23	175	27	8	148,75	12	475,0083	50	0,740741	28000	6,481481	3,375
24	185	29	8,5	157,25	12,5	521,7346	50	0,657859	30000	6,37931	3,411765
25	160	26	7,5	136	11	431,5515	50	0,705128	22000	6,153846	3,466667
26	170	27	8	144,5	11,5	468,1733	50	0,680828	25000	6,296296	3,375
27	190	30	9	161,5	13	553,368	50	0,643275	33000	6,333333	3,333333

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
28	165	27	7,8	140,25	11,5	455,4351	50	0,690667	24000	6,111111	3,461538
29	170	28	8,2	144,5	12	482,6872	50	0,66612	26000	6,071429	3,414634
30	160	25	7,4	136	11	420,3405	50	0,810811	24000	6,4	3,378378
31	178	29	8,5	151,3	12,3	511,7688	50	0,660939	29000	6,137931	3,411765
32	155	24	7,2	131,75	10,8	399,8463	50	0,746714	20000	6,458333	3,333333
33	182	30	8,8	154,7	12,5	535,5413	50	0,645188	31000	6,066667	3,409091
34	180	28	8,3	153	12,1	499,7003	50	0,693249	29000	6,428571	3,373494
35	165	21	7,3	140,25	11,3	388,5692	50	0,83022	21000	7,857143	2,876712
36	172	27,5	8,1	146,2	12,4	478,2208	50	0,704722	27000	6,254545	3,395062
37	171	27,2	8	145,35	11,9	471,2842	50	0,644995	24000	6,286765	3,4
38	184	29,5	12,6	156,4	12,6	638,9407	50	0,453264	31000	6,237288	2,34127
39	167	29,5	7,8	141,95	11,6	478,9298	50	0,598542	23000	5,661017	3,782051
40	177	28,5	8,2	150,45	12,1	496,9027	50	0,676902	28000	6,210526	3,47561
41	173	27	8,1	147,05	11,8	475,2288	50	0,660762	25000	6,407407	3,333333
42	166	26,3	7,5	141,1	11,2	442,0973	50	0,671889	22000	6,311787	3,506667
43	274	33,5	10,7	232,9	13,1	765,6758	75	0,590539	58000	8,179104	3,130841
44	281	34,7	11,1	238,85	13,6	803,7754	75	0,5636	61000	8,097983	3,126126
45	268	32,5	10,4	227,8	12,8	735,328	75	0,596132	54000	8,246154	3,125
46	277	33,8	10,8	235,45	13,4	776,9006	75	0,583488	59000	8,195266	3,12963
47	270	33	10,6	229,5	13	750,8395	75	0,592931	56000	8,181818	3,113208
48	280	34,5	11	238	13,5	796,4165	75	0,564653	60000	8,115942	3,136364
49	269	32,9	10,5	228,65	12,9	744,7733	75	0,591868	55000	8,176292	3,133333
50	284	35	11,2	241,4	13,7	815,1876	75	0,556913	62000	8,114286	3,125
51	275	33,3	10,8	233,75	13,2	768,344	75	0,586445	58000	8,258258	3,083333
52	287	35,2	11,3	243,95	13,9	825,4805	75	0,551871	63000	8,153409	3,115044

Единственным исследованием в области применения ИИ в судостроении по части определения сопротивления судна является статья «Artificial Neural Network-Based Prediction of Ship Resistance in Shallow Water Conditions», посвященная прогнозированию полного сопротивления в условиях мелководья. Авторы успешно продемонстрировали способность нейронных сетей моделировать сложные нелинейные зависимости между геометрическими характеристиками судна, параметрами мелководья и величиной сопротивления, используя комплексный подход, однако данная тема требует многостороннего подхода и разных методов расчета.

В отличие от приведенного выше исследования, данная работа отличается как по используемым методам, так и по целевым переменным. Результат статьи больше посвящен прямому прогнозированию полного сопротивления, фокусируясь на предсказании чисел Фруда и Рейнольдса – фундаментальных безразмерных параметрах, характеризующих гидродинамические свойства судна. Таким образом, исследование дополняет уже существующие работы, предоставляя сравнительный анализ различных алгоритмов и методов для прогнозирования ключевых гидродинамических параметров, создавая основу для более точного расчета полного сопротивления судов в будущем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Число Фруда: сравнение, вычисленное против предсказанного числа Фруда (рис. 1), демонстрирует высокую корреляцию между предсказанными и расчетными значениями числа Фруда, что свидетельствует о хорошей точности предсказаний.

Число Рейнольдса: сравнение, вычисленное против предсказанного числа Рейнольдса (рис. 2), показывает высокую степень соответствия между предсказанными и расчетными значениями числа Рейнольдса, что также говорит о высокой точности прогнозирования.

В целом, результаты применения линейной регрессии демонстрируют высокую точность предсказания чисел Фруда и Рейнольдса. Для коэффициента полного сопротивления, хотя значение MSE достаточно большое, показатель R^2 демонстрирует очень высокое качество модели. Несоответствие значений MSE и R^2 для переменных «ct_calculated» и «reynolds» можно объяснить различиями в масштабе этих величин. При этом надо отметить результат MAPE – средний абсолютный процент ошибки, который отражает, насколько в среднем отклоняются предсказанные значения от реальных (рис. 3), это еще одна из метрик, используемых для оценки точности моделей прогнозирования.

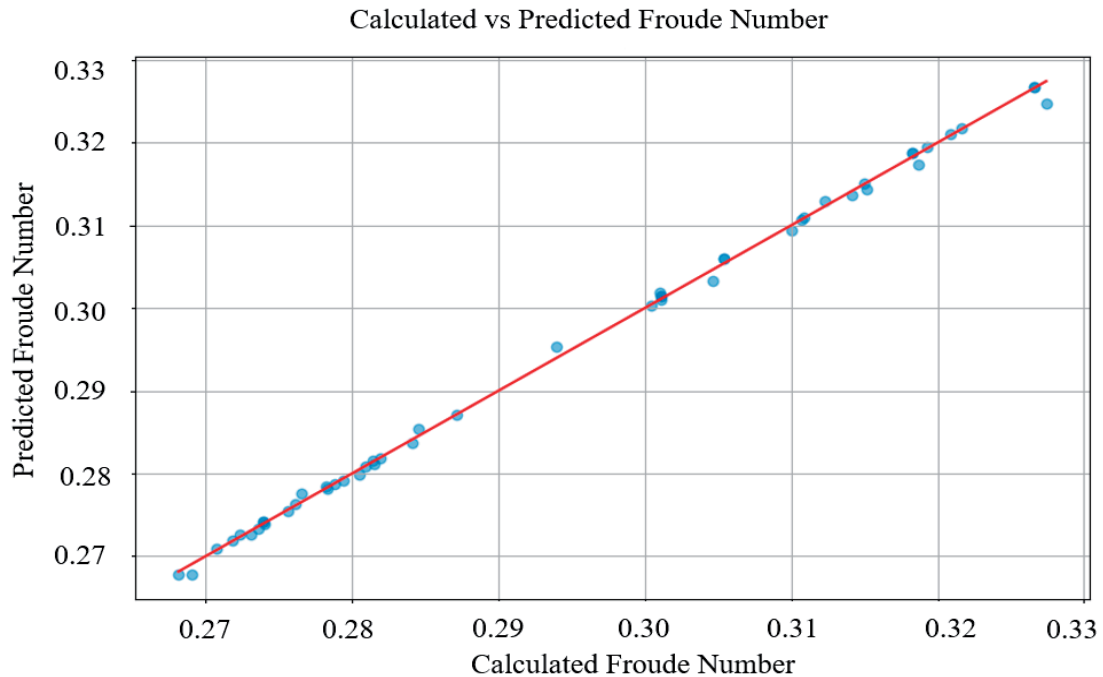


Рис. 1. Сравнение, вычисленное против предсказанного числа Фруда
Fig. 1. Comparison calculated against the predicted Froude number

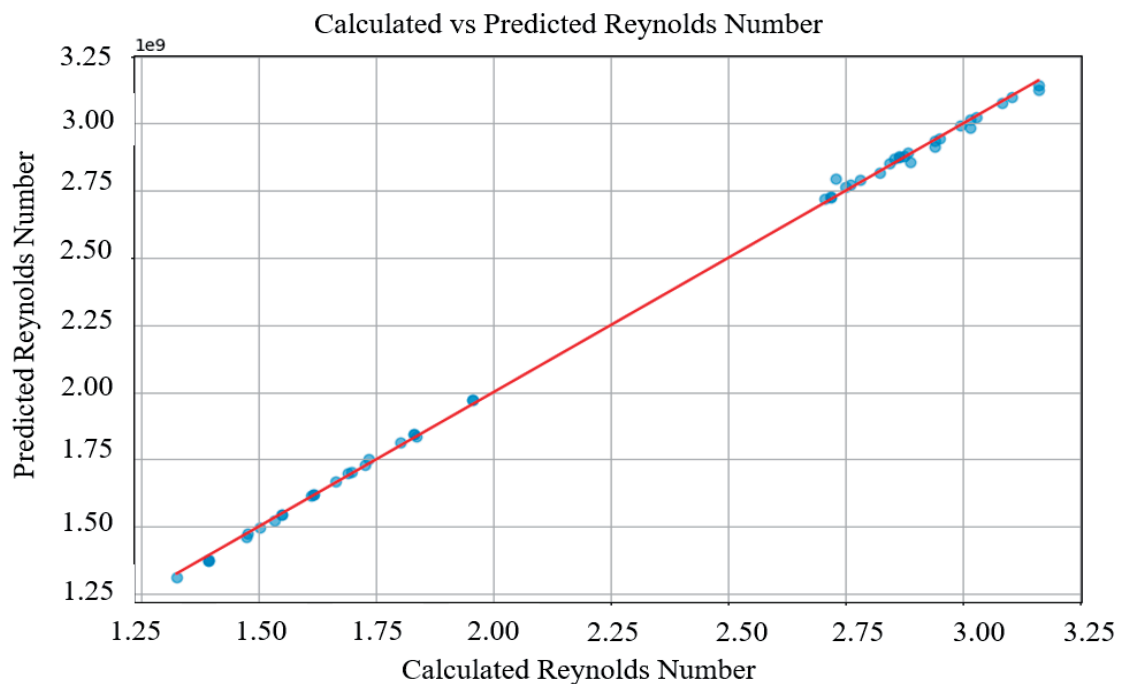


Рис. 2. Сравнение, вычисленное против предсказанного числа Рейнольдса
Fig. 2. Comparison calculated against the predicted Reynolds number

Mean Absolute Percentage Error for Froude: 0.15%
Mean Absolute Percentage Error for Reynolds: 0.57%

Рис. 3. MAPE «Средний абсолютный процент ошибки»

Fig. 3. MAPE "Mean Absolute Percentage of Error"

Средний абсолютный процент ошибки для числа Фруда составляет 0,15 %, а для числа Рейнольдса – 0,57 %. Это означает, что в среднем предсказания модели отклоняются от реальных значений на 0,15 % и 0,57 % соответственно. Обе ошибки являются очень низкими, что говорит о высокой точности предсказания. Модель особенно хорошо прогнозирует число Фруда, а предсказание числа Рейнольдса имеет незначительную погрешность, оставаясь в пределах очень хорошего результата, что подтверждается на рис. 4.

Сравнение предсказанных и расчетных значений (первые 10 строк):

	froude	predicted_froude	reynolds	predicted_reynolds
0	0.318259	0.318713	1.831605e+09	1.842249e+09
1	0.301154	0.301377	1.394000e+09	1.373851e+09
2	0.305442	0.306018	1.548449e+09	1.543535e+09
3	0.326605	0.326786	1.956352e+09	1.972813e+09
4	0.269042	0.267797	2.883045e+09	2.893924e+09
5	0.284517	0.285457	2.887006e+09	2.858168e+09
6	0.276552	0.277640	2.728597e+09	2.794017e+09
7	0.287185	0.287151	3.160261e+09	3.124616e+09
8	0.281918	0.281870	2.940469e+09	2.913282e+09
9	0.293968	0.295353	3.016109e+09	2.982966e+09

Рис. 4. Результат сравнения предсказанных и расчетных значений
в исходном виде

Fig. 4. Result of comparison of predicted and calculated values in the original form

Отдельно обратим внимание на архитектуру итоговой формы ИИ, обученного методом линейной регрессии (рис. 5).

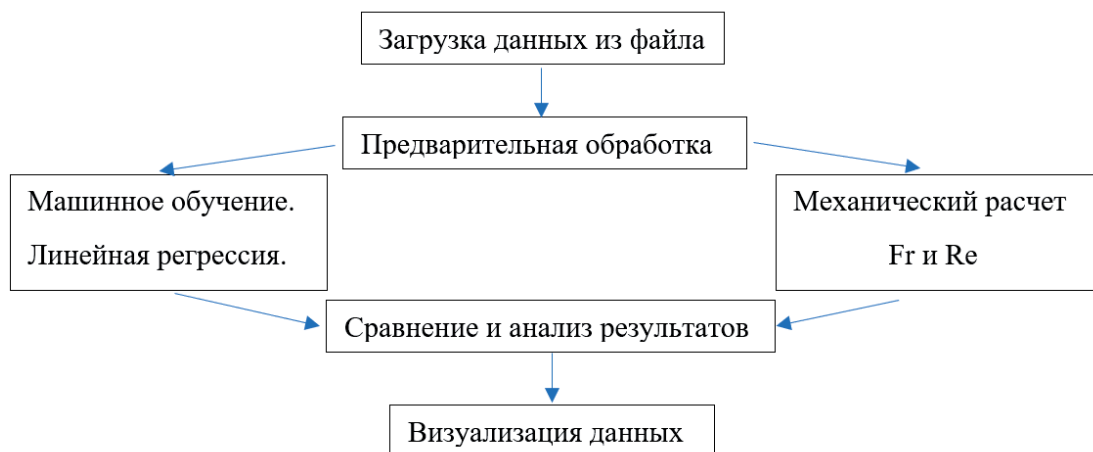


Рис. 5. Блок-схема архитектуры кода
Fig. 5. Block diagram of the code architecture

Код анализирует характеристики судов и с помощью линейной регрессии, предсказывает числа Рейнольдса (Re) и число Фруда (Fr).

Резюмируем этапы выполненной работы.

Загрузка данных. На данном этапе код считывает данные из заранее подготовленного Excel-файла с помощью библиотеки `pandas`. Затем происходит первичная обработка данных:

1. Добавление данных о «классе».
2. Удаление неиспользуемых столбцов данных.

Расчет целевых переменных. Производится механический расчет целевых переменных:

1. Число Фруда (*froude*).
2. Число Рейнольдса (*reynolds*).

Разделение данных на обучающую и тестовую выборки. Для разделения данных используется функция `train_test_split` из библиотеки `sklearn.model_selection`. Разделение данных на тренировочную и тестовую выборки необходимо:

1. Для оценки реальной способности модели к обобщению, поскольку, если обучать модель на одних и тех же данных, она просто придет к «переобучению» и будет плохо работать с новыми данными (в нашем случае идет следующая пропорция: 42 судна для обучения модели, 10 судов для тестирования);

2. Для контроля переобучения. Этот момент необходимо выделить отдельным пунктом и учитывать при обучении модели ИИ. Если модель слишком сильно подстраивается на тренировочные данные (в том числе их шумы), она теряет способность к обобщению. Это легко проверить, когда модель ИИ показывает высокую точность на тренировочной выборке данных, но при работе с тестовыми – результат сильно отличается;

3. Для расчета объективных метрик качества модели, таких как MSE, R^2 и MAPE.

Построение и обучение моделей линейной регрессии. Для каждой целевой переменной создается отдельная модель линейной регрессии с использованием класса `LinearRegression` из библиотеки `sklearn.linear_model`. Обучение проводится методом `fit` на обучающих данных.

Использование одной модели для всех переменных неэффективно, так как числа Фруда и Рейнольдса имеют разную природу и зависимости от признаков. Многозадачная регрессия в данном случае лишь снизит точность прогнозирования.

Оценка качества модели. Для проверки качества моделей на тестовой выборке применяются метрики:

1. `mean_squared_error (MSE)` – среднеквадратичная ошибка, определяет точность предсказаний.
2. `r2_score ( $R^2$ )` – коэффициент детерминации, показывает долю дисперсии, объясняемую моделью.

Визуализация результатов. Для наглядного сравнения предсказанных и реальных значений строятся графики рассеивания с помощью библиотеки *matplotlib*.

ВЫВОДЫ

Данное исследование успешно продемонстрировало возможность использования методов машинного обучения на основе ограниченного набора данных для прогнозирования чисел Фруда и Рейнольдса, которые являются ключевыми гидродинамическими параметрами при расчете судна. Анализ результатов, полученных с применением таких алгоритмов, как линейная регрессия, случайный лес и градиентный бустинг, показал хорошую точность предсказания чисел Фруда и Рейнольдса. Линейная регрессия продемонстрировала высокое значение коэффициента детерминации (R^2), что указывает на хорошее качество модели. Визуализация результатов подтвердила наличие высокой корреляции между предсказанными и расчетными значениями. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования данного метода для ускорения и оптимизации работы с данными в судостроении.

Полученные результаты открывают новые перспективы для практического применения машинного обучения в судостроении. Как отмечал в своей работе Molland A. F. (2008), «оптимизация гидродинамических параметров на ранних этапах проектирования критически важна для экономии ресурсов» [8]. Наше исследование подтверждает, что машинное обучение, особенно линейная регрессия, может стать инструментом для этой самой оптимизации. Разработанные модели могут быть использованы на этапе предварительной оценки сопротивления судов, что оптимизирует процесс проектирования за счет ускорения анализа и расчета большего массива данных, а также повышает точность и надежность проектных решений.

Важно отметить, что ИИ не сможет полноценно заменить инженера – он лишь расширит пространство для возможных решений, которые специалист сможет осмысленно выбрать.

Список источников

1. Чувиковский, В. С. Численные методы расчетов в строительной механике корабля / В. С. Чувиковский. – Ленинград: Судостроение, 1976. – 374 с.
2. Breiman, L. Random forests / L. Breiman. – DOI: 10.1023/A:1010933404324// Machine learning. – 2001. – V. 45. N 1. – P. 5–32. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324> (дата обращения: 05.03.25).
3. Friedman, J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine/ J. H. Friedman. – Annals of statistics, 2001. – P. 1189–1232.

4. Ghassemi, H. Artificial Neural Network-Based Prediction of Ship Resistance in Shallow Water Conditions / H. Ghassemi, P. Ghadimi, M. Daryabor. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115053 // Ocean Engineering. – 2023. – V. 281. 115053. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115053> (дата обращения: 05.03.25).
5. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. / T. Hastie, R. Tibshirani, J. H. Friedman, J. Franklin. – 2nd ed. – N. Y.: Springer, 2009. – 745 p.
6. Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures / K. Maki, F. Zhao, P. Horn [et al.]. – DOI: 7.5-02-02-01 // Switzerland: ITTC. – 2017. – P. 1–15. URL: <https://www.ittc.info/media/11950/75-03-01-01.pdf> (дата обращения: 05.03.25).
7. Larsson, L. Principles of Naval Architecture. Resistance, Propulsion and Vibration / L. Larsson, H. Raven. – Jersey City: SNAME, 2010. – V. II. – 418 p.
8. Molland, A. F. The Maritime Engineering Reference Book. / A. F. Molland. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. – 928 p.
9. Marrone, S. Resistance prediction of high speed planing hull using multiple regression approach / S. Marrone, D. Peri, A. Scamardella. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.02.015 // Ocean Engineering. – 2017. – V. 135. – P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.02.015> (дата обращения: 05.03.25).
10. Scamardella, A. Machine learning for the prediction of ship resistance of fast vessels: A comparative analysis / A. Scamardella. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109877 // Ocean Engineering. – 2021. – V. 240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109877> (дата обращения: 05.03.25).
11. Чуреев, Е. А. Возможность использования машинного обучения для определения остаточного сопротивления корпуса судна на ранних этапах проектирования / Е. А. Чуреев, В. И. Пинчук. – DOI: 10.46845/2541-8254-2024-1(43)-16-16 // Вестник молодежной науки. – 2024. – № 1 (43). – С. 10. URL: [https://doi.org/10.46845/2541-8254-2024-1\(43\)-16-16](https://doi.org/10.46845/2541-8254-2024-1(43)-16-16) (дата обращения: 07.07.25).
12. Marine Traffic: Global Ship Tracking Intelligence – AIS Marine Traffic: сайт. – URL: <https://www.marinetraffic.com> (дата обращения: 05.03.25).
13. My Ship Tracking Free Realtime AIS – Vessel Trackin. Vessels Finder: сайт. – URL: <https://www.myshiptracking.com> (дата обращения: 05.03.25).
14. Ship & Container Tracking – VesselFinder: сайт. – URL: <https://www.vesselfinder.com> (дата обращения: 05.03.25).
15. Equasis – European Quality Shipping Information System: сайт. – URL: <https://www.equasis.org> (дата обращения: 05.03.25).
16. Ship.info – Мобильное приложение. – URL: <https://infoship.xyz/> (дата обращения: 05.03.25).

References

1. CHuvikovskiy V. S. *CHislennyye metody raschetov v stroitel'noy mekhanike korablya* [Numerical methods of calculations in ship construction mechanics]. Lenin-grad, Sudostroenie Publ., 1976. 374 p.
2. Breiman L. Random forests. DOI: 10.1023/A:1010933404324. Machine learning. 2001. V. 45. N. 1. P. 5–32. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324> (accessed 5 March 2025).
3. Friedman J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of statistics*. 2001. P. 1189–1232.
4. Ghassemi H. Artificial Neural Network-Based Prediction of Ship Resistance in Shallow Water Conditions. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115053. *Ocean Engineering*. 2023. V. 281. 115053. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115053> (accessed 05 March 2025).
5. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. H., Franklin J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. N. Y., Springer. 2009. 745 p.
6. Maki K., Zhao F., Horn P. [et al.]. Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures. DOI: 7.5-02-02-01. Switzerland, ITTC. 2017. P. 1–15. Available at: <https://www.ittc.info/media/11950/75-03-01-01.pdf> (accessed 05 March 2025).
7. Larsson L., Raven H. *Principles of Naval Architecture. Resistance, Propulsion and Vibration*. Jersey City, SNAME. 2010. V. II. 418 p.
8. Molland A. F. *The Maritime Engineering Reference Book*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2008. 928 p.
9. Marrone S., Peri D., Scamardella A. Resistance prediction of high speed planing hull using multiple regression approach. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.02.015. *Ocean Engineering*. 2017. V. 135. P. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.02.015> (accessed 05 March 2025).
10. Scamardella A. Machine learning for the prediction of ship resistance of fast vessels: A comparative analysis. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109877. *Ocean Engineering*. 2021. V. 240. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109877> (accessed 05 March 2025).
11. CHureev E. A. Vozmozhnost' ispol'zovaniya mashinnogo obucheniya dlya opredeleniya ostatochnogo soprotivleniya korpusa sudna na rannikh etapakh proektirovaniya [Possibility of using machine learning to determine the residual resistance of the ship hull at the early stages of design]. DOI: 10.46845/2541-8254-2024-1(43)-16-16. *Vestnik molodezhnoy nauki*. 2024, no. 1 (43), p. 10. Available at: [https://doi.org/10.46845/2541-8254-2024-1\(43\)-16-16](https://doi.org/10.46845/2541-8254-2024-1(43)-16-16) (accessed 05 March 2025).
12. Marine Traffic: Global Ship Tracking Intelligence – AIS Marine Traffic: sayt [website]. Available at: <https://www.marinetraffic.com> (accessed 05.03.25).

13. My Ship Tracking Free Realtime AIS – Vessel Trackin. Vessels Finder: sayt [website]. Available at: <https://www.myshiptracking.com> (accessed 05 March 2025).

14. Ship & Container Tracking – VesselFinder: sayt [website]. Available at: <https://www.vesselfinder.com> (accessed 05 March 2025).

15. Equasis – European Quality Shipping Information System: sayt [website]. Available at: <https://www.equasis.org> (accessed 05 March 2025).

16. Ship.info. Mobil'noe prilozhenie [Mobile app]. Available at: <https://infoship.xyz/> (accessed 05 March 2025).

Информация об авторах

Д. Д. Довгополик – бакалавр 4-го курса Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники

П. Р. Гришин – старший преподаватель Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники

Н. Л. Великанов – доктор технических наук, профессор, профессор Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники

А. А. Мушенков – аспирант 1-го года обучения Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники

Information about the authors

D. D. Dovgopolik - 4th year Bachelor of Science and Education Center of Shipbuilding, Marine Infrastructure and Engineering

P. R. Grishin - senior lecturer of the Scientific and Educational Center of Shipbuilding, Marine Infrastructure and Engineering

N. L. Velikanov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Scientific-Educational Center of Shipbuilding, Marine Infrastructure and Engineering

A. A. Mushenkov - 1st year postgraduate student of the Scientific-Educational Center of Shipbuilding, Marine Infrastructure and Engineering

Статья поступила в редакцию 06.07.2025; одобрена после рецензирования 16.07.2025; принята к публикации 17.07.2025.

The article was submitted 06.07.2025; approved after reviewing 16.07.2025; accepted for publication 17.07.2025.

Научная статья
УДК 62-611, 535.6
DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-115-127

**Исследование возможности определения загрязнения дизельных топлив
оптическими методами**

Ирина Павловна Корнева^{1✉}, Сергей Николаевич Виноградов²

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

¹ipk05@mail.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0002-6523-724X>

²sergey.vinogradov.04@mail.ru

Аннотация. Основой эффективной безаварийной эксплуатации судовых двигательных установок является исследование процессов, происходящих с их составными частями. В этой связи немаловажным аспектом является бесперебойная работа дизелей, которая зависит от состояния дизельного топлива, используемого на судах в настоящее время. Необходимость контроля состояния топлива является приоритетной задачей, стоящей перед механиками. Совершенствование существующих и разработка новых методов контроля физико-химических характеристик дизельных топлив и анализ факторов, влияющих на процессы в двигателях, остаются актуальными по сей день. В данной работе предпринята попытка применить совокупность методов спектрофотометрии, рефрактометрии и микроскопии для исследования характеристик дизельных топлив. С помощью спектрофотометра СФ-2000 и приставки диффузного и зеркального отражения были получены спектры коэффициентов пропускания всех образцов дизельных топлив в видимой части спектра (400–800 нм). Определение цветовых координат и показателей цветовых различий по стандартной и нестандартной методикам позволило провести восстановление цвета поверхностей топлив. С помощью такой методики можно выявить загрязнения и своевременно принять меры к устранению причин. В работе показано, что нестандартная методика (с помощью смартфона и программного обеспечения) получения цветовых координат для контроля загрязнений целесообразна в условиях мореплавания. Рефрактометрический метод позволил определить значения показателя преломления и средней дисперсии топлив, которые изменяются в процессе загрязнения. Дополнительным методом исследования включений, попавших в топливо, является микроскопия. Этот метод особенно эффективен для темных сортов дизельного топлива.

Ключевые слова: дизельное топливо, оптические методы, спектрофотометрия, рефрактометрия, микроскопия, цветовые координаты.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Федерального агентства по рыболовству, № 1024032500238-0-2.7.3;2.5.4;2.11.2.

Для цитирования: Корнева И. П., Виноградов С. Н. Исследование возможности определения загрязнения дизельных топлив оптическими методами // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 115–127. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-115-127.

Original article

Study of the possibility of determining contamination of diesel fuels using optical methods

Irina P. Korneva¹, Sergey N. Vinogradov²

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

¹ipk05@mail.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0002-6523-724X>

²sergey.vinogradov.04@mail.ru

Abstract. The basis for the efficient and trouble-free operation of marine propulsion systems is the study of processes occurring with their components. In this regard, an important aspect is the uninterrupted operation of diesel engines, which depends on the state of diesel fuel used on ships at present. The need to control the state of fuel is a priority task facing mechanics. Improving existing and developing new methods for monitoring the physical and chemical characteristics of diesel fuels, and analyzing the factors affecting the processes in engines remain relevant to this day. In this paper, an attempt has been made to apply a combination of spectrophotometry, refractometry and microscopy methods to study the characteristics of diesel fuels. Using an SF-2000 spectrophotometer and a diffuse and mirror reflection attachment, transmission coefficient spectra of all diesel fuel samples in the visible part of the spectrum (400–800 nm) have been obtained. Determination of color coordinates and color difference indices using standard and non-standard methods makes it possible to restore the color of the fuel surfaces. This method allows to identify contamination and promptly take measures to eliminate the causes. The work shows that a non-standard method (using a smartphone and software) for obtaining color coordinates for contamination control is appropriate in maritime conditions. The refractometric method makes it possible to determine the values of the refractive index and average dispersion of fuels, which change during contamination. An additional method for studying inclusions in fuel is microscopy. This method is especially effective for dark diesel fuels.

Keywords: diesel fuel, optical methods, spectrophotometry, refractometry, microscopy, color coordinates.

Funding: the research was carried out with the financial support of the Federal Agency for Fisheries of the Russian Federation (project number № 1024032500238-0-2.7.3;2.5.4;2.11.2.).

For citation: Korneva I. P., Vinogradov S. N. Study of the possibility of determining contamination of diesel fuels using optical methods. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025; (78): 115–127. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-115-127.

ВВЕДЕНИЕ

Безаварийная работа судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является одной из приоритетных задач на морском флоте [1, 2]. Судовые дизельные двигатели эксплуатируются в сложных условиях, а потому требуется регулярный сервис, включающий комплекс различных диагностических мероприятий.

В качестве дизельного топлива на судах используются бензиновые, лигроиновые, газойлевые, соляровые фракции нефти и мазуты [3].

Дизельное топливо является приоритетным на морских судах вследствие доступности, чистоты, минимальных затрат. Благодаря хорошей смазывающей способности оно способствует предотвращению трения между деталями, что обеспечивает надежную работу в течение длительного времени [4].

Качество топлива является предметом повышенного интереса, так как оно обуславливает стабильность рабочего процесса и снижение эффективного расхода топлива [5]. Быстроходные суда используют более качественный дизель. Изменение показателей судовых дизельных топлив оказывает влияние на эксплуатационные характеристики топливной системы и работу судна в целом.

Снижение качества топлива обусловлено разными причинами, среди которых следует отметить его загрязнение. Длительное или ненадлежащее хранение приводит к появлению микроорганизмов, если в резервуары для хранения топлива попадает вода [6]. Такое топливо впоследствии загрязняет все оборудование.

Наличие воды в топливе, которая может находиться в нем как взвесь либо эмульсия, воздействует на процесс сжигания топлива. Особенно неблагоприятным фактором для топлива является морская вода.

К другим внешним факторам загрязнения дизельного топлива относятся твердые частицы органического и неорганического происхождения, вызывающие разрушительный износ топливной аппаратуры [7]. Загрязнения в нефтепродуктах имеют различные структуру и состав. Содержание механических примесей регулируется техническим стандартом [8].

Физико-химические свойства нефтепродуктов можно контролировать с помощью оптических методов [9–14], к которым относятся спектроскопия, флуоресценция, фотометрия и др. Такие методы, обеспечивающие высокую чувствительность и надежность, позволяют быстро и точно определить состав, качество, наличие примесей и степень очистки продуктов без разрушения образца.

В работе [12] представлены данные анализа загрязнения отработанного моторного масла дизельными фракциями посредством методов УФ-видимой и ближней ИК-спектроскопии. Метод определения содержания нефтяных углеводородов в почве естественной влажности посредством инфракрасной спектроскопии описан в работе [13]. В данном исследовании показано значительное улучшение точности анализа концентраций нефти в пробах почвы предлагаемым методом.

В другой работе проанализированы спектры флуоресценции различных объектов, в том числе дизельного топлива [14]. Обозначены перспективы использования лазерного флуоресцентного метода с целью мониторинга разливов дизельного топлива по поверхности земли.

Состояние оптических свойств поверхностей позволяет оценивать состояние самих материалов различной природы. В статье [9] предлагается метод отражательной спектроскопии для мониторинга контроля качества судовых моторных масел. Этот метод с успехом может применяться и для судовых дизельных топлив. Исследование цветовых координат и спектров отражения топлив позволит выявить причины загрязнения и незамедлительно принять меры по устранению источников засора.

Цвет является неотъемлемым свойством любой среды, вследствие чего его изменение – условный знак к дальнейшему действию по устранению причины. Для определения цветовых координат используются цветовые пространства.

Цветовое пространство – модель представления цвета с применением цветных координат. Цветовые координаты – это числовые значения, которые описывают цвет в трехмерном пространстве, например, через системы LAB или XYZ. Эти координаты точно определяют цвет любой точки цветовой модели, позволяя однозначно характеризовать и сравнивать цвета.

Самый широкий охват цветового видимого спектра дает система LAB, определяемая яркостью L (от *англ.* lightness) от 0 до 100, а также спектрами A – от зеленого до пурпурного в пределах 128–127 и B – от голубого до желтого в пределах 128–127. Также немаловажно, что изменение значений координат нелинейно, а описывает изменение цвета по логике, близкой к восприятию цвета человеком [15–16]. Именно система LAB является предпочтительным оптическим методом контроля качества нефтепродуктов.

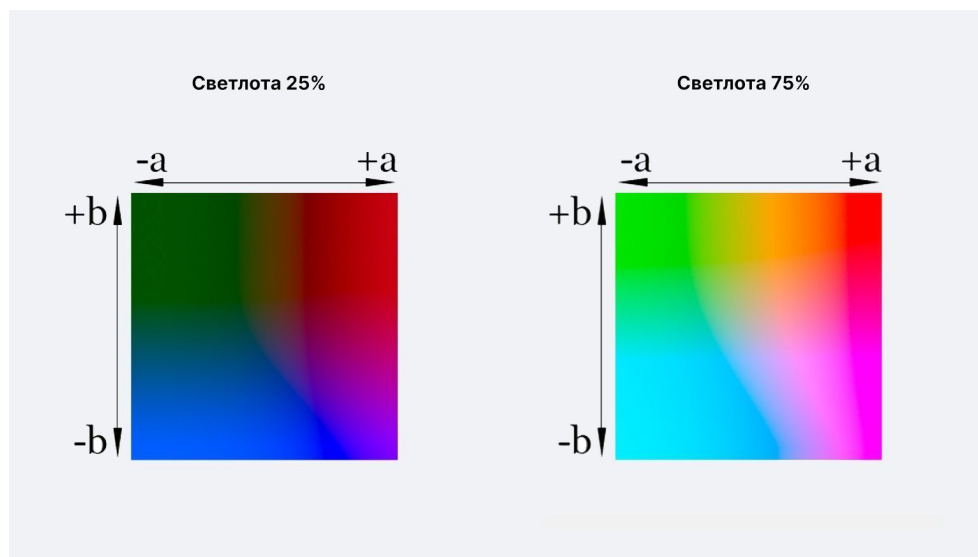


Рис. 1. Представление цветового поля LAB [16]

Fig. 1. LAB color field representation [16]

Задачами данного исследования являлось применение оптических методов исследования различных показателей дизельных топлив и обнаружение их изменений вследствие загрязнения. В данном эксперименте дизельное топливо рассматривается как новый объект, к которому ранее не применялась методика анализа на основе цветовых координат.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовался спектрофотометр СФ-2000 с приставкой зеркального и диффузного отражения СФО-2000. Угол между нормалью к поверхности

образца и направлением освещения составлял 8° , а между нормалью к поверхности образца и направлением отражения – 45° .

Показатели преломления и средняя дисперсия измерялись с помощью лабораторного рефрактометра ИРФ-Компакт. Для исследования загрязнения образцов применялись цифровой микроскоп ELEKLIV и микроскоп ЛОМО МИКМЕД-1.

В работе использовались образцы дизельного топлива ЕВРО-5 (сорта С, F), IFO-180, IFO-380, топочный мазут М-100, Экто Diesel (сорт С) и судовое маловязкое топливо (СМТ).

Для исследования спектрофотометрическим методом образцы топлив помещались по одной капле на подложку из карбоната кальция диаметром 10 мм, толщина которой составляла 3 мм.

Спектрофотометр регистрировал спектры коэффициентов диффузного отражения в диапазоне длин волн видимого света от 400 до 800 нм. Обработка спектров и вычисление цветовых координат осуществлялись с помощью программы SFScan. Восстановление цвета проводилось с использованием онлайн-ресурса Nixsensor [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Значения показателей преломления n_D и средней дисперсии n_F-n_C образцов дизельных топлив, полученные с помощью рефрактометра, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели преломления n_D и средняя дисперсия n_F-n_C образцов
Table 1. Refractive index n_D and average dispersion n_F-n_C of the samples

№	Дизельное топливо	n_D	n_F-n_C
1	ЕВРО-5, сорт С	1,4605	0,009286500
2	ЕВРО-5, сорт F	1,4575	0,008479255
3	IFO-180	1,5250	0,014937720
4	IFO-380	1,5350	0,016171920
5	Топочный мазут М-100	1,6600	0,023206000
6	Экто Diesel, сорт С	1,4590	0,009259500
7	СМТ	1,4710	0,009480500

Как видно из таблицы, наибольший показатель преломления и средняя дисперсия у самого темного топлива – топочного мазута М-100. Определение показателя преломления у данного образца было затруднено тем, что граница раздела двух полей зрения в рефрактометре размыта вследствие того, что данное топливо является многокомпонентной системой. Такая же картина наблюдается и у тяжелых топлив IFO-180 и IFO-380, показатели преломления которых 1,525 и 1,535 соответственно. Наименьший показатель преломления и средняя дисперсия у самого светлого топлива ЕВРО-5, сорт F.

Спектры коэффициентов пропускания всех образцов в видимом диапазоне, полученные с помощью спектрофотометра, представлены на рис. 2. Как видно из полученных зависимостей, коэффициент пропускания у светлых топлив ЕВРО-5

(сорта С, F), Экто Diesel (сорт С) и СМТ увеличивается с ростом длины волны, наибольшее значение (86 %) имеет Экто Diesel на длине волны 800 нм. У темных топлив коэффициент пропускания уменьшается в диапазоне от 400 до 650 нм, а затем возрастает с ростом длины волны.

Далее по спектрам вычислялись цветовые координаты, а по ним с помощью онлайн-инструмента Nixsensor восстанавливался цвет образцов. Данная методика является стандартной лабораторной методикой.

Другой инструмент исследования цветовых характеристик – нестандартная методика, описанная в работе [18], в которой предлагается метод с использованием смартфона и программного обеспечения для обработки изображений. Авторы измеряют цветовые координаты загрязненной поверхности и проводят количественную оценку. Используется схема, при которой расположение объектива фотокамеры и источника света не является общепринятым и составляет $45^\circ/45^\circ$.

Авторы попытались применить этот метод к исследованию поверхностей дизельных топлив и сравнить его со стандартным методом спектрофотометрии. В нашей работе использовался смартфон Realme 8i, оснащенный фронтальной камерой с разрешением 16 Мп и основной камерой высокого разрешения 50 Мп. Программным приложением для обработки изображения и получения цветовых координат являлось приложение Color Grab [19].

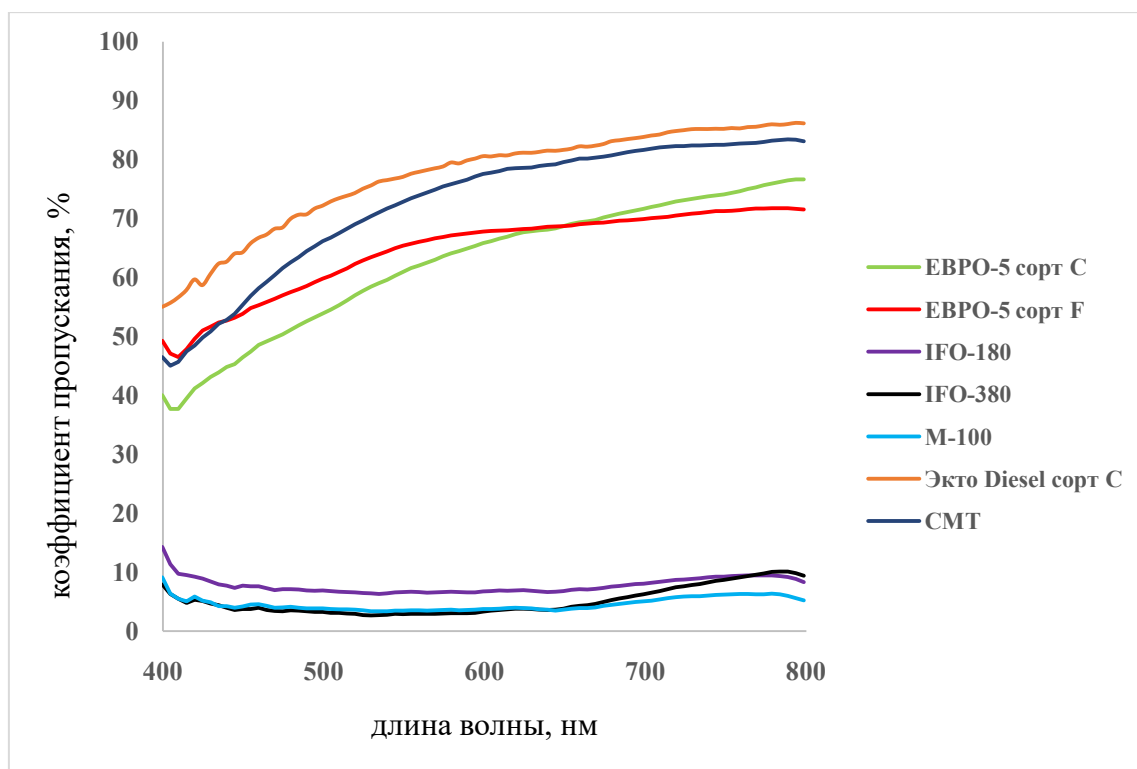


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны
Fig. 2. Transmittance as a function of wavelength

Результаты исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения цветовых координат и показателей цветовых различий дизельных топлив

Table 2. Values of color coordinates and color differences indicators of diesel fuels

Образец	Цветовые координаты (нестандартная методика) L, a, b	Цветовые координаты (стандартная методика) L*, a*, b*	Показатель цветовых различий ΔE
Евро, сорт С	69,10 -2,40 15,90	83,34 4,57 14,33	15,93
Евро, сорт F	71,30 -2,10 9,60	85,01 2,08 9,89	14,37
IFO-180	18,50 8,50 12,70	31,03 1,32 -3,19	21,47
IFO-380	12,60 11,40 13,50	20,64 4,68 -3,81	20,24
Топочный мазут М-100	1,10 0,0 0,0	22,36 1,75 -3,62	21,63
Эктодизель, сорт С	67,60 -2,20 15,40	90,94 2,21 9,75	24,40
Судовое маловязкое топливо	72,30 -3,00 16,60	89,17 3,38 14,37	18,17

Показатель цветовых различий ΔE для цветовых координат, полученных с помощью смартфона и спектрофотометра, рассчитывался по формуле из работы [15]:

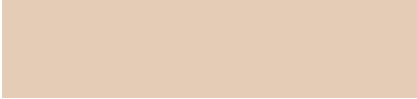
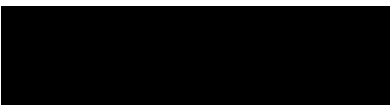
$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2},$$

где L, a, b – цветовые координаты, определенные по нестандартной методике (с помощью смартфона); L^*, a^*, b^* – цветовые координаты, определенные по стандартной методике (с помощью спектрофотометра).

Как видно из табл. 2, показатель цветовых различий изменяется в пределах от 14,37 до 24,4 усл. ед. со средним значением 19,45 усл. ед.

В табл. 3 представлены восстановленные по цветовым координатам изображения поверхностей дизельных топлив, полученные по стандартной и нестандартной методикам.

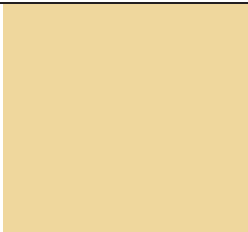
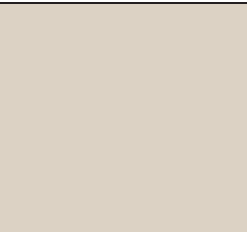
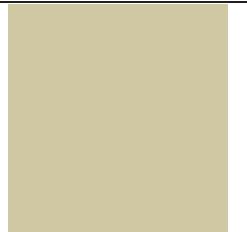
Таблица 3. Восстановление цвета поверхностей дизельных топлив
Table 3. Restoration of the color of diesel fuel surfaces

Образец	Восстановленный цвет по спектру	Восстановленный цвет по приложению Color Grab
Евро, сорт С		
Евро, сорт F		
IFO-180		
IFO-380		
Топочный мазут		
Эктодизель, сорт С		
Судовое маловязкое топливо		

Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод, что использование обеих методик возможно для количественной оценки загрязняющих факторов по значению показателя цветовых различий ΔE между цветами чистой и загрязненной поверхностей.

Для одного из образцов представленных топлив – судового маловязкого топлива – было проведено исследование поверхности с помощью нестандартной методики до и после попадания в топливо воды и при биологическом загрязнении. Результаты исследования представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения цветовых координат и показателей цветовых различий образца чистого топлива до и после загрязнения
Table 4. Values of color coordinates and color difference indices of a clean fuel sample before and after contamination

Образец	Цветовые координаты	Цветовые координаты при попадании воды	Цветовые координаты при биологическом загрязнении
Судовое маловязкое топливо	89,17 3,38 14,37	84,68 2,04 8,34	80,62 -1,76 19,51
	$\Delta E = 0$	$\Delta E = 7,67$	$\Delta E = 11,22$
			

Микроскопические исследования использовались для более детального рассмотрения биологических загрязнений судового маловязкого топлива. Использование бинокулярного светового микроскопа позволило более детально выявить характер загрязнений. Микроскопирование объектов, попадающих в поле зрения, разрешает отличить органические частицы от неорганических, определить их форму, размеры и структуру. Цифровой микроскоп дает возможность зафиксировать изображение для дальнейшей обработки с целью идентификации исследуемого объекта.

Такой подход оправдан и при изучении темных дизельных топлив, так как определить наличие и характер загрязнений невооруженным глазом не представляется возможным. В этом случае микроскопия будет дополнительным методом исследования, так как рефрактометрический метод в силу повышенной вязкости и непрозрачности тяжелых топлив имеет ограничения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы образцы дизельного топлива спектрофотометрическими, рефрактометрическими и микроскопическими методами. Получены спектры коэффициентов пропускания и значения цветовых координат.

Показана возможность применения нестандартной методики (смартфон – программное обеспечение) с целью определения цветовых координат и показателя цветовых различий ΔE для количественной оценки загрязняющих факторов между цветами чистой и загрязненной поверхностей. Проведено сравнение стандартной и нестандартной методик определения цветовых координат.

Показано, что в условиях мореплавания, когда нет возможности использовать спектрофотометр, применение нестандартной методики оправдано для выявления наличия загрязнения дизельного топлива.

Дополнительными методами исследования характеристик дизельного топлива и выявления наличия в нем загрязнений являются рефрактометрия и микроскопия. Показатель преломления изменяется в случае попадания в топливо других веществ. Характер и структуру загрязнений помогает определить метод микроскопии, однако рефрактометрические методы также имеют ограничения для темных топлив вследствие повышенной вязкости и непрозрачности.

Список источников

1. Qingguo, Shi. Prioritization of key practices for marine diesel engine maintenance activities using 2-tuple linguistic term set and DEMATEL / Qingguo Shi, Yihuai Hu, Fei Gao // *Ocean Engineering*. – 2023. – V. 286. – Part 2. – P. 115644.
2. Возницкий, И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. В 2 т. Т. 2 / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. – М.: Моркнига, 2010. – 382 с. – ISBN 978-5-030033-89-1.
3. Рогозин, Н. А. Словарь по топливам, маслам, смазкам, присадкам и специальным жидкостям / Н. А. Рогозин, К. К. Папок. – М.: Химия, 1975. – 392 с.
4. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория ДОЗ рабочих процессов / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян [и др.]. – М.: Высшая школа, 1995. – 368 с. – ISBN 5-06-003298-1.
5. Демидова, Н. П. Основные показатели судового топлива и их основные эксплуатационные свойства / Н. П. Демидова, А. А. Марченко, О. А. Онищенко // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. – 2015. – № 32. – С. 6–11.
6. Мамаева, Г. Г. Возрастание микробиологической активности в процессе биodeградации дизельного топлива: лабораторные опыты (Польша) / Г. Г. Мамаева // *Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал*. – 2007. – № 4. – С. 915.
7. Возницкий, И. В. Практика использования морских топлив на судах / И. В. Возницкий. – Санкт-Петербург: ГМА им. Макарова, 2005. – 124 с. – ISBN 594218009X.
8. Стандарты качества судовых топлив и применение присадок в судоходной отрасли. – Текст: электронный // *Топливный регион: сайт*. – URL: <https://www.topreg.ru/stati-i-obzori/standarty-kachestva-sudovykh-topliv-i-primenenie-prisadok-v-sudokhodnoj-otrasli> (дата обращения: 17.04.2025).
9. Синявский, Н. Я. Спектры отражения видимого диапазона и колориметрия судовых моторных масел / Н. Я. Синявский, И. П. Корнева, Н. А. Кострикова // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2024. – № 3–1 (65). – С. 131–137.
10. Рыбаков, А. А. Спектрофотометрия как метод подбора кислотных составов для интенсификации добычи / А. А. Рыбаков, В. Д. Зимин, Н. Н. Садыков // *Нефтяная провинция*. – 2020. – № 2 (22). – С. 95–105.
11. Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy / A. Wolak, J. Molenda, G. Zajac, P. Janocha // *Measurement*. – 2021. – V. 186. – P. 110–141.

12. Application assessment of UV–vis and NIR spectroscopy for the quantification of fuel dilution problems on used engine oils / V. Macian, B. Tormos, A. Garcia-Barbera, A. Balaguer // *Fuel*. – 2023. – V. 333. – Part 1. – P. 126350.
13. Василенко, П. А. Определение содержания нефтепродуктов в почве с естественной влажностью ИК-спектрометрическим методом / П. А. Василенко, С. Г. Корниенко // *Журнал аналитической химии*. – 2022. – Т. 77. – № 5. – С. 433–437.
14. Белов, М. Л. Выбор диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения для задачи обнаружения разливов дизельного топлива / М. Л. Белов, М. Б. Нгуен // *Контенант*. – 2022. – Т. 21. – № 2. – С. 52–67.
15. Цветовые координаты. – Текст: электронный // Fandom: сайт. – URL: [https://science.fandom.com/ru/wiki/Цветовые координаты](https://science.fandom.com/ru/wiki/Цветовые_координаты) (дата обращения: 17.04.2025).
16. Цветовые пространства: большой разбор. – Текст: электронный // Skillbox Media: сайт. – URL: <https://skillbox.ru/media/design/rgb-cmyk-lab/> (дата обращения: 17.04.2025).
17. Nixsensor. – Текст: электронный // Nixsensor: сайт. – URL: <https://www.nixsensor.com/free-colorconverter/?srsltid=AfmBOorFkY9JWz1WPJHPCYxatrSkatZVCsdstzMTjPDDcMKZGkl ygq7j> (дата обращения: 17.04.2025).
18. Литунов, С. Н. Оперативный спектрофотометрический метод количественной оценки загрязняющих факторов / С. Н. Литунов, И. А. Сысуев, А. С. Хлыбов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2022. – № 4. – С. 206–216.
19. Color Grab. – Текст: электронный // Color Grab: сайт. – URL: <https://color-grab.ru.uptodown.com/android> (дата обращения: 17.04.2025).

References

1. Qingguo Shi, Yihuai Hu, Fei Gao. Prioritization of key practices for marine diesel engine maintenance activities using 2-tuple linguistic term set and DEMATEL. *Ocean Engineering*. 2023. V. 286. Part 2. P. 115644.
2. Voznitskiy I. V., Punda A. S. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Marine internal combustion engines]. Moscow, Morkniga Publ., 2010, vol. 2, 382 p.
3. Rogozin N. A., Papok K. K. *Slovar' po toplivam, maslam, smazkam, prisadkam i spetsial'nym zhidkostyam* [Dictionary of fuels, oils, lubricants, additives and special liquids]. Moscow, Khimiya Publ., 1975, 392 p.
4. Lukanin V. N., Morozov K. A., Hachiyani A. S. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. V 3 kn. Kn. 1. Teoriya DOZ rabochikh protsessov* [Internal combustion engines. In 3 books. Book 1. Theory of DOZ working processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1995, 368 p.
5. Demidova N. P., Marchenko A. A., Onishchenko O. A. Osnovnye pokazateli sudovogo topliva i ikh osnovnye ekspluatatsionnye svoystva [Main indicators of marine fuel and their main operational properties]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 32, pp. 6–11.
6. Mamaeva G. G. Vozrastanie mikrobiologicheskoy aktivnosti v protsesse biodegradatsii dizel'nogo topliva: laboratornye opyty (Pol'sha) [Increase of microbiological

activity during biodegradation of diesel fuel: laboratory experiments (Poland)] *Ekologicheskaya bezopasnost' v APK. Referativnyy zhurnal*, 2007, no. 4, p. 915.

7. Voznitskiy I. V. *Praktika ispol'zovaniya morskikh topliv na sudakh* [Practice of using marine fuels on ships]. Saint-Petersburg, GMA im. Makarova Publ., 2005, 124 p.

8. Standarty kachestva sudovykh topliv i primeneniye prisadok v sudokhodnoy otrasli [Marine Fuel Quality Standards and Additives Application in the Shipping Industry]. Available at: <https://www.topreg.ru/stati-i-obzori/standarty-kachestva-sudovykh-topliv-i-primeneniye-prisadok-v-sudokhodnoy-otrasli> (accessed 17 April 2025).

9. Sinyavskiy N. Ya., Korneva I. P., Kostrikova N. A. Spektry otrazheniya vidimogo diapazona i kolorimetriya sudovykh motornykh masel [Visible Reflectance Spectra and Colorimetry of Marine Motor Oils]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2024, no. 3–1 (65), pp. 131–137.

10. Rybakov A. A., Zimin V. D., Sadykov N. N. Spektrofotometriya kak metod podbora kislotnykh sostavov dlya intensivatsii dobychi [Spectrophotometry as a method for selecting acid compositions for intensifying production]. *Neftyanaya provintsiya*, 2020, no. 2 (22), pp. 95–105.

11. Wolak A., Molenda J., Zajac G., Janocha P. Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy. *Measurement*. 2021. V. 186. P. 110–141.

12. Macian V., Tormos B., Garcia-Barbera A., Balaguer A. Application assessment of UV–vis and NIR spectroscopy for the quantification of fuel dilution problems on used engine oils. *Fuel*, 2023. V. 333. Part 1. P. 126350.

13. Vasilenko P. A., Kornienko S. G. Opredelenie sodержaniya nefteproduktov v pochve s estestvennoy vlazhnost'yu IK-spektrometricheskim metodom [Determination of the content of petroleum products in soil with natural moisture by IR spectrometric method]. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2022, vol. 77, no. 5, pp. 433–437.

14. Belov M. L., Nguen M. B. Vybora diapazonov registratsii lazerno-indutsirovannogo fluoretsentnogo izlucheniya dlya zadachi obnaruzheniya razlivov dizel'nogo topliva [Selection of laser-induced fluorescence emission detection ranges for diesel fuel spill detection]. *Kontenant*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 52–67.

15. Tsvetovye koordinaty [Color coordinates]. Available at: https://science.fandom.com/ru/wiki/Cvetovye_koordinaty (accessed 17 April 2025).

16. Tsvetovye prostranstva: bol'shoy razbor [Color Spaces: a big analysis]. Available at: <https://skillbox.ru/media/design/rgb-cmyk-lab/> (accessed 17 April 2025).

17. Nixsensor. Available at: <https://www.nixsensor.com/free-colorconverter/?srsltid=AfmBOorFkY9JWz1WPJHPCYxatrSkatZVCsdstzMTjPDDcMKZGk1ygq7j> (accessed 17 April 2025).

18. Litunov S. N., Sysuev I. A., Khlybov A. S. Operativnyy spektrofotometricheskoy metod kolichestvennoy otsenki zagryaznyayushchikh faktorov [Operational spectrophotometric method for quantitative assessment of polluting factors]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 4, pp. 206–216.

19. Color Grab. Available at: <https://color-grab.ru.uptodown.com/android> (accessed 17 April 2025).

Информация об авторах

И. П. Корнева – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры физики
С. Н. Виноградов – курсант Морского института КГТУ

Information about the authors

I. P. Korneva – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Physics

S. N. Vinogradov – cadet of the Marine Institute of KSTU

Статья поступила в редакцию 30.05.2025; одобрена после рецензирования 10.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

The article was submitted 30.05.2025; approved after reviewing 10.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.

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 31.07.2025. Выход в свет 01.08.2025. Формат 60 x 88 (1/8).
Печ. л. 16. Уч.-изд. л. 10,2. Тираж 1000 экз. Заказ № 36.