

ИЗВЕСТИЯ

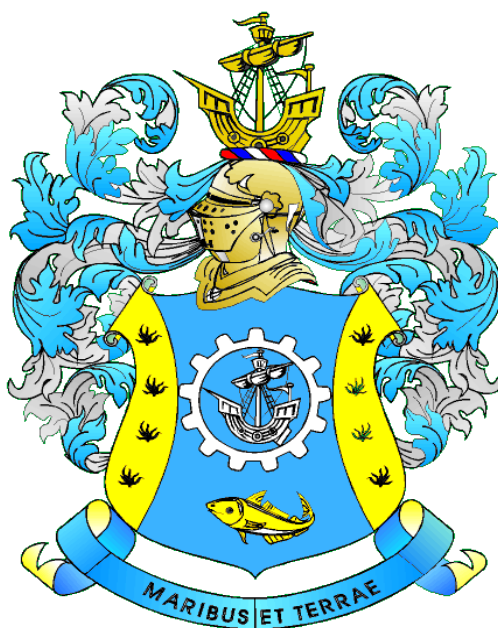
КГТУ

2026

№ 82

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

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

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

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

В. В. Брюханов, д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник НОЦ «Фундаментальная и прикладная фотоника. 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. Научно-образовательного центра судостроения, морской инфраструктуры и техники, Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В. А. Панфилов, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, Российский государственный

аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, г. Москва, Россия;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции: 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1;

тел.: (4012) 99-59-01, 99-59-10; факс: (4012) 91-68-46;

сайт: www.klgtu.ru; E-mail: svetlana.suprunova@klgtu.ru

© ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
2026



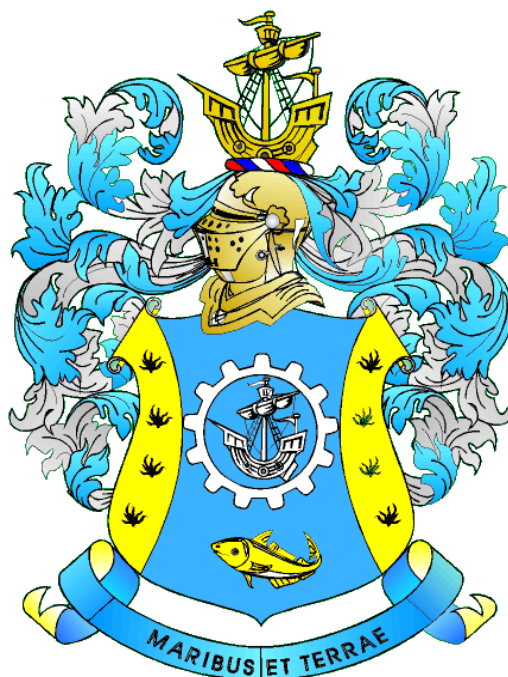
KSTU NEWS

2026

№ 82

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

- Жернаков И. А., Никитенко А. И., Тюлин Д. Ю., Горячев Д. В.,
Солодовник А. В. Структура и количественные характеристики зоопланктона
Иваньковского водохранилища в вегетационный сезон 2025 г. 11

Техника и технология пищевых производств

- Воробьев В. И., Чернега О. П., Ленц К. Е. Влияние стабилизирующих
рыбных добавок на текстурные и органолептические свойства шоколадных
муссов 29
- Наумов В. А. Динамика слива жидкости Шведова-Бингама из резервуара
через цилиндрическую трубу (на примере рыбного жира) 44
- Ульрих Е. В. Подбор рациональных параметров экстракции
полисахаридов водорослей с использованием ферментативного
гидролиза 66

Сельское хозяйство и природопользование

- Анциферова О. А., Демидова Л. М., Чернявская А. А. Опыт
бонитировки пахотных почв Калининградской области на основе
почвенно-экологического индекса 83

Судостроение, машиностроение и энергетика

- Несин Д. Ю., Остюченко Г. С. Классификация архитектурных типов
судов с фотоэлектрическими панелями 101

CONTENT

Biology, ecology and fisheries

- Zhernakov I. A., Nikitenko A. I., Tyulin D. Yu., Goryachev D. V., Solodovnik A. V. Structure and quantitative characteristics of zooplankton in the Ivankovo reservoir during the growing season of 2025 11

Processes and technology of food manufacturing

- Vorob'ev V. I., Chernega O. P., Lents K. E. The effect of stabilizing fish additives on the textural and organoleptic properties of chocolate mousses 29
- Naumov V. A. Dynamics of Shvedov-Bingham liquid discharge from the tank through the cylindrical pipe (using fish oil as an example) 44
- Ulrikh E. V. Selection of rational parameters for the extraction of algae polysaccharides using enzymatic hydrolysis 66

Agriculture and environmental management

- Antsiferova O. A., Demidova L. M., Chernyavskaya A. A. Experience in rating arable soils in the Kaliningrad region based on the soil-ecological index 83

Shipbuilding, machine manufacturing and power engineering

- Nesin D. Yu., Ostyuchenko G. S. Classification of architectural types of ships with photovoltaic panels 101

БИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ И РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья

УДК 639.27/.29

DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-11-25

Структура и количественные характеристики зоопланктона Иваньковского водохранилища в вегетационный сезон 2025 г.

Илья Алексеевич Жернаков¹, Алексей Иванович Никитенко²✉, Дмитрий Юрьевич Тюлин³, Дмитрий Владимирович Горячев⁴, Аделина Владимировна Солодовник⁵

^{1,2,3,4,5} Филиал по пресноводному рыбному хозяйству ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», п. Рыбное, Россия

¹ ilazernakov52010@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2572-911X>

² alexey_nikitenko90@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8123-5810>

³ dmityul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7979-336X>

⁴ gdv1892@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9750-2546>

⁵ a.solodovnik@vniiprh.vniro.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3921-8562>

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного мониторинга зоопланктонного сообщества Иваньковского водохранилища – крупнейшего источника питьевого водоснабжения г. Москвы и одного из старейших водоемов Верхней Волги. Исследования проводились в вегетационный сезон 2025 г. на 17 станциях, охватывающих все четыре плеса водохранилища. Обнаружено 55 таксонов: 30 коловраток, 20 ветвистоусых и 5 веслоногих ракообразных. Средняя биомасса зоопланктона составила 0,395 г/м³, что по классификации М. Л. Пидгайко соответствует «очень малокормному» водоему. Сравнение с данными предшествующих лет показало снижение биомассы в 1,5 раза относительно периода 2013–2017 гг. (с 0,619 до 0,395 г/м³) и в 2,1 раза относительно 2021 г. (с 0,847 до 0,395 г/м³). Если в 2013–2017 гг. водохранилище входило в число наиболее продуктивных в Волжско-Камском каскаде, уступая лишь Угличскому, то к 2025 г. его кормовая база опустилась до уровня Рыбинского и Куйбышевского водохранилищ. Пространственная неоднородность сохранялась: максимум биомассы отмечен в Средневожском плесе (0,631 г/м³), минимум – в Верхневожском (0,063 г/м³). Индексы биоразнообразия (Шеннона, Симпсона, Пиелу) возрастали от весны к лету и снижались осенью, за исключением станции 30а, где летом зафиксировано доминирование *Brachionus angularis* (85 %), а осенью – максимальное выравнивание. Полученные данные свидетельствуют о существенном снижении кормовой базы за последнее десятилетие, что требует выявления причин и пересмотра рыбохозяйственной стратегии.

Ключевые слова: Иваньковское водохранилище, зоопланктон, кормовая база, многолетняя динамика, биомасса, трофический статус, очень малокормный водоем, Волжско-Камский каскад.

© Жернаков И. А., Никитенко А. И., Тюлин Д. Ю., Горячев Д. В., Солодовник А. В., 2026

Для цитирования: Жернаков И. А., Никитенко А. И., Тюлин Д. Ю., Горячев Д. В., Солодовник А. В. Структура и количественные характеристики зоопланктона Иваньковского водохранилища в вегетационный сезон 2025 г. // Известия КГТУ. 2026. № 82. С. 11–25. DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-11-25.

Original article

Structure and Quantitative Characteristics of Zooplankton in the Ivankovo Reservoir during the Growing Season of 2025

Il'ya A. Zhernakov¹, Aleksey I. Nikitenko^{2✉}, Dmitriy Yu. Tyulin³, Dmitriy V. Goryachev⁴, Adelina V. Solodovnik⁵

^{1,2,3,4,5} Freshwater Fisheries Branch of the FSBSI "All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography", Rybnoye settlement, Russia

¹ ilazernakov52010@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2572-911X>

² alexey_nikitenko90@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8123-5810>

³ dmityul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7979-336X>

⁴ gdv1892@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9750-2546>

⁵ a.solodovnik@vniiprh.vniro.ru, <https://orcid.org/0009-0005-3921-8562>

Abstract. This paper presents the results of a comprehensive monitoring study on the zooplankton community of the Ivankovo Reservoir, the largest source of drinking water supply for Moscow and one of the oldest water bodies in the Upper Volga basin. Field investigations were conducted during the growing season of 2025 at 17 sampling stations covering all four reaches of the reservoir. A total of 55 taxa were recorded, including 30 rotifers, 20 cladocerans, and 5 copepods. The mean zooplankton biomass amounted to 0.395 g/m³, which, according to the classification of M. L. Pidgayko, characterizes the reservoir as "very low-food" water body. A comparative analysis with previous data revealed a 1.5-fold decline in biomass relative to the 2013–2017 period (from 0.619 to 0.395 g/m³) and a 2.1-fold decline relative to 2021 (from 0.847 to 0.395 g/m³). Whereas in 2013–2017 the Ivankovo Reservoir ranked among the most productive water bodies in the Volga–Kama cascade, second only to the Uglich Reservoir, by 2025 its forage base had dropped to levels previously typical of the Rybinsk and Kuibyshev reservoirs. Spatial heterogeneity persisted, with maximum biomass recorded in the Middle Volga reach (0.631 g/m³) and minimum in the Upper Volga reach (0.063 g/m³). Biodiversity indices (Shannon, Simpson, and Pielou) regularly increased from spring to summer and decreased in autumn, except at station 30a, where summer was marked by strong dominance of *Brachionus angularis* (85 %) and autumn by maximum evenness. The obtained findings indicate a substantial decline in the reservoir's forage base over the past decade, necessitating identification of the underlying causes (winterkill phenomena, changes in trophic status, climatic factors) and a revision of the existing fishery management strategy.

Keywords: Ivankovo Reservoir, zooplankton, forage base, long-term dynamics, biomass, trophic status, very low-food water body, Volga-Kama Cascade.

For citation: Zhernakov I. A., Nikitenko A. I., Tyulin D. Yu., Goryachev D. V., Solodovnik A. V. Structure and quantitative characteristics of zooplankton in the

Ivankovo reservoir during the growing season of 2025. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(82):11–25. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-11-25.

ВВЕДЕНИЕ

Заполненное в 1937 г. Ивановское водохранилище является одним из старейших водохранилищ Верхней Волги, соединяя реку с гидросистемой канала им. Москвы [1, 2] и служа основным источником водоснабжения г. Москвы и ряда других населенных пунктов [3].

Площадь водного зеркала водохранилища достигает 327 км², объем воды – 1,12 млн км³ [4, 5]. Благодаря значительной мелководности (доля акватории с глубинами менее 2 м составляет 48 % площади при нормальном подпорном уровне) [6, 7] водоем быстро прогревается в теплый период года. По морфометрическим особенностям Ивановское водохранилище разделено на четыре плеса: Верхневолжский, Средневолжский, Нижневолжский и Шошинский [4, 8].

Зоопланктон играет ключевую роль в функционировании водных экосистем. Являясь вторичным звеном трофической цепи и основным потребителем фито- и бактериопланктона [9], он участвует в процессах самоочищения и регуляции качества воды. Для рыбного хозяйства зоопланктон имеет первостепенное значение как кормовая база: он служит пищей для молоди всех видов рыб, для планктонофагов на всех этапах онтогенеза, а также для бентофагов при недостатке донных организмов [10]. При этом кормовая ценность разных групп неодинакова: коловратки значимы преимущественно для личинок, тогда как ракообразные (ветвистоусые и веслоногие) – для молоди и взрослых рыб младших возрастных категорий [11].

Несмотря на длительную историю гидробиологических исследований Ивановского водохранилища [12, 13] целенаправленных работ по оценке состояния зоопланктона в последние годы не проводилось. Большинство публикаций относятся к 1970–1980-м гг. или сосредоточены на участках в зоне влияния подогретых вод Конаковской ГРЭС [12]. Данные о современном (2025 г.) качественном и количественном составе зоопланктона, его сезонной динамике и пространственной неоднородности по четырем плесам отсутствуют. Между тем мониторинг кормовой базы необходим для оценки рыбохозяйственного потенциала водоема и разработки мер по его рациональному использованию.

Цель настоящей работы – оценить состояние зоопланктонного сообщества Ивановского водохранилища в вегетационный сезон 2025 г. на основе качественных и количественных показателей, их сезонной и пространственной динамики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водоем находится в Калининском, Конаковском и Кимрском районах Тверской области, а также близ г. Дубны Московской области.

На акватории водохранилища было расположено 17 станций (рис. 1), закрепленных с помощью GPS-навигатора: Шошинский плес (д. Безбородово) – станции 3, 3а, 3б; Верхневолжский плес (д. Слобода) – станции 4, 4а, 4б; Средневолжский плес (д. Плоски – 6, 6а, 6б; г. Конаково – 30, 30а, 30б) – 6 станций; Нижневолжский плес (д. Харлово – 18, 18а, 18б; г. Дубна – 17, 17а) – 5 станций. Места

отбора располагались в открытых и прибрежных частях водоема, что позволило учесть пространственную неоднородность распределения зоопланктона.



Рис. 1. Картосхема отбора проб зоопланктона Иваньковского водохранилища в 2025 г.

Fig. 1. Map of zooplankton sampling in the Ivankovo Reservoir in 2025

Пробы отбирали в три сезона 2025 г. – весной (первая декада мая), летом (первая декада июля) и осенью (первая декада сентября). Зоопланктон собирали протяжками сетью Джели от дна (газ № 49, размер ячеек 134 мкм). Отобранные пробы фиксировали 4 %-м нейтральным формалином и этикетировали.

В лабораторных условиях пробы просчитывали под бинокулярным микроскопом «Микромед МС-4-ZOOMLED» в камере Богорова. Организмы определяли с использованием определителей [14, 15] и микроскопа «Микромед 3» (вар. 3–20). При определении учитывали современные таксономические ревизии.

Численность организмов пересчитывали на 1 м³ воды. Биомассу рассчитывали с использованием стандартных таблиц индивидуальных масс беспозвоночных либо по уравнениям зависимости «длина – масса» для соответствующих таксонов [16].

Для оценки структуры сообщества рассчитывали: индекс Шеннона (H) – меру видового разнообразия с учетом выравненности; индекс Симпсона ($1 - D$) – вероятность принадлежности двух случайно выбранных особей к разным видам; индекс выравненности Пielу (J) – равномерность распределения численности между видами (при $J > 0,7$ распределение считали равномерным, при $J < 0,3$ – наличие выраженного доминанта); индекс доминирования Бергера-Паркера (d) – долю самого многочисленного вида в сообществе [17].

Из-за малых абсолютных значений численности исходные данные перед расчетом индексов масштабировали (умножали на 1000) для корректной работы алгоритмов в среде PAST.

Для выявления пространственной структуры сообщества проводили иерархический кластерный анализ. Перед анализом данные о численности трансформировали по формуле $\log(x+1)$ для нормализации распределения и снижения влияния сверхдоминирующих видов. Сходство между станциями оценивали по евклидову расстоянию, дендрограммы строили методом парно-группового среднего (UPGMA). Все расчеты выполнены в программе PAST [18].

Трофический статус озер определяли по средней за вегетационный сезон биомассе зоопланктона согласно классификации М. Л. Пидгайко с соавторами [19]: очень малокормные ($< 0,5$ г/м³), малокормные (0,5–1,0), средnekормные (1,0–2,0), выше средней кормности (2,0–5,0), высококормные (5,0–10,0), очень высококормные ($> 10,0$ г/м³).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В связи с большой площадью и мелководностью водохранилища температурный режим в разных плесах существенно различался (рис. 2).

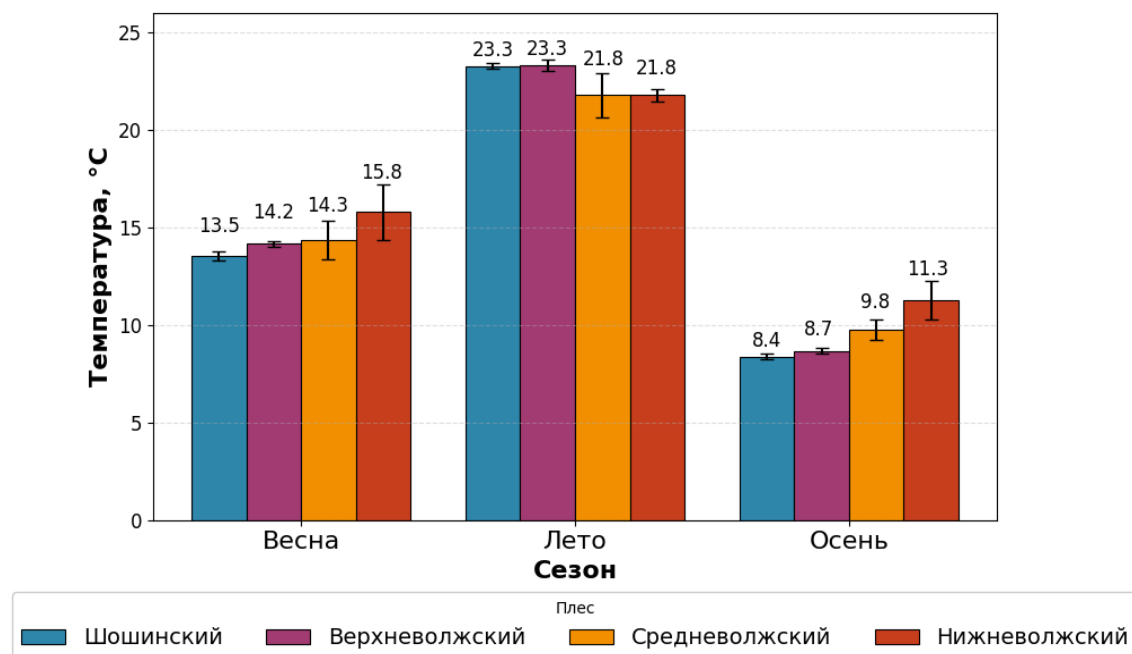


Рис. 2. Средняя температура воды (°C) в плесах Иваньковского водохранилища в вегетационный сезон 2025 г.

Fig. 2. Average water temperature (°C) in the reaches of the Ivankovsky Reservoir during the growing season of 2025

Летом мелководные Верхневолжский и Шошинский плесы прогревались до 23,3°C, тогда как более глубокие проточные Средневолжский и Нижневолжский

были на 1,5°C прохладнее. Весной и осенью наиболее теплым оставался Нижневожский плес (15,8 и 11,3°C соответственно).

За вегетационный сезон 2025 г. в пробах обнаружено 55 таксонов зоопланктона: 30 видов коловраток (Rotifera), 20 – ветвистоусых ракообразных (Cladocera) и 5 – веслоногих (Copepoda). Наиболее часто встречались *Brachionus angularis* (Gosse, 1851), *Asplanchna priodonta* (Gosse, 1850), *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller, 1776) и *Bosmina longirostris* (O. F. Müller, 1776). Летом отмечены крупные хищные ветвистоусые *Leptodora kindtii* (Focke, 1844) и *Polyphemus pediculus* (Linnaeus, 1758), а также личинки дрейссены (Veliger). В Нижневожском плесе зафиксирован вид *Limnospira frontosa* (Sars, 1862).

Среднесезонные значения численности и биомассы зоопланктона по водохранилищу в целом составили 30,34±10,08 тыс. экз./м³ и 0,395±0,130 г/м³ соответственно (табл. 1). Наиболее продуктивным оказался Средневожский плес, где эти показатели достигли 53,91±15,66 тыс. экз./м³ и 0,631±0,150 г/м³. В Шошинском плесе численность и биомасса составили 30,50±7,55 тыс. экз./м³ и 0,578±0,140 г/м³, в Нижневожском – 32,32±9,79 тыс. экз./м³ и 0,308±0,080 г/м³. Минимальные показатели зафиксированы в Верхневожском плесе – 4,63±1,04 тыс. экз./м³ и 0,063±0,010 г/м³.

Таблица 1. Среднесезонная численность и биомасса зоопланктона по отдельным плесам Иваньковского водохранилища и по водоему в целом в 2025 г.

Table 1. Average seasonal abundance and biomass of zooplankton in individual reaches of the Ivankovo Reservoir and in the reservoir as a whole in 2025

Группы	Rotifera		Cladocera		Copepoda		Итого	
Плеса	N	B	N	B	N	B	N	B
Верхневожский	3,63	0,043	0,58	0,017	0,41	0,003	4,63	0,063
Средневожский	49,29	0,510	3,24	0,106	1,38	0,014	53,91	0,631
Нижневожский	30,35	0,264	1,40	0,039	0,57	0,005	32,32	0,308
Шошинский	25,09	0,489	4,71	0,081	0,70	0,009	30,50	0,578
Среднее	27,09	0,327	2,48	0,061	0,77	0,008	30,34	0,395

Примечание. N – численность, тыс. экз./м³; B – биомасса, г/м³

Иваньковское водохранилище в 2025 г. относится к очень малокормным водоемам. Лишь Средневожский и Шошинский плеса могут быть охарактеризованы как малокормные (биомасса 0,5–1,0 г/м³).

Значения индексов Шеннона, Симпсона и выравненности Пиелу закономерно возрастали от весны к лету и снижались осенью, за исключением индекса выравненности Пиелу. Исключением стала станция 30а (Средневожский плес), где летом отмечено резкое доминирование *Brachionus angularis* (доля 85 %, индекс Бергера-Паркера 0,85±0,04), а осенью – максимальное для водоема выравнивание (индекс Шеннона 2,38±0,1, индекс Бергера-Паркера 0,14±0,04) (табл. 2).

Кластеризация станций по численности зоопланктона выявила выраженную пространственную неоднородность.

Таблица 2. Количество таксонов (S), индекс доминирования Симпсона ($I-D$), индекс Шеннона (H), индекс выравнинности Пиелу (J) и индекс Бергера-Паркера (d) на определенных станциях в разные сезоны
Table 2. Number of taxa (S), Simpson's dominance index ($I-D$), Shannon's index (H), Pielou's evenness index (J), and Berger-Parker's index (d) at specific stations during different seasons

№ станции Название индекса	3а	3	3б	4а	4	4б	6а	6	6б	30а	30	30б	17	17б	18а	18
Весна																
S	8	7	10	8	12	8	7	8	8	14	13	9	12	12	6	9
$I-D$	0,57	0,50	0,43	0,53	0,60	0,79	0,47	0,47	0,35	0,53	0,57	0,34	0,35	0,48	0,63	0,52
H	1,01	0,83	0,80	1,09	1,31	1,79	1,02	0,85	0,66	0,93	1,14	0,77	0,71	0,76	1,16	0,83
J	0,48	0,42	0,35	0,52	0,52	0,85	0,52	0,41	0,31	0,35	0,44	0,35	0,28	0,30	0,65	0,37
d	0,51	0,60	0,70	0,65	0,57	0,31	0,70	0,67	0,78	0,53	0,57	0,80	0,78	0,61	0,42	0,51
Лето																
S	27	21	23	9	13	16	19	19	19	29	25	23	28	20	14	17
$I-D$	0,81	0,61	0,77	0,72	0,72	0,67	0,73	0,86	0,76	0,26	0,85	0,79	0,79	0,66	0,82	0,33
H	2,20	1,37	1,85	1,55	1,58	1,48	1,95	2,27	1,97	0,72	2,13	1,90	2,05	1,56	2,03	0,87
J	0,66	0,45	0,59	0,70	0,61	0,53	0,66	0,77	0,67	0,21	0,66	0,60	0,61	0,52	0,77	0,30
d	0,29	0,58	0,33	0,44	0,40	0,42	0,49	0,23	0,43	0,85	0,22	0,31	0,38	0,49	0,31	0,80
Осень																
S	19	29	16	10	5	4	17	14	11	14	12	13	10	8	10	13
$I-D$	0,82	0,82	0,78	0,82	0,23	0,73	0,77	0,78	0,74	0,89	0,65	0,54	0,87	0,83	0,75	0,81
H	1,98	2,17	2,12	1,97	0,52	1,36	1,91	1,73	1,74	2,38	1,38	1,19	2,15	1,95	1,72	2,01
J	0,67	0,64	0,76	0,84	0,31	0,96	0,67	0,65	0,72	0,89	0,55	0,46	0,89	0,92	0,74	0,77
d	0,24	0,32	0,43	0,28	0,87	0,40	0,32	0,26	0,43	0,14	0,54	0,65	0,20	0,30	0,37	0,28

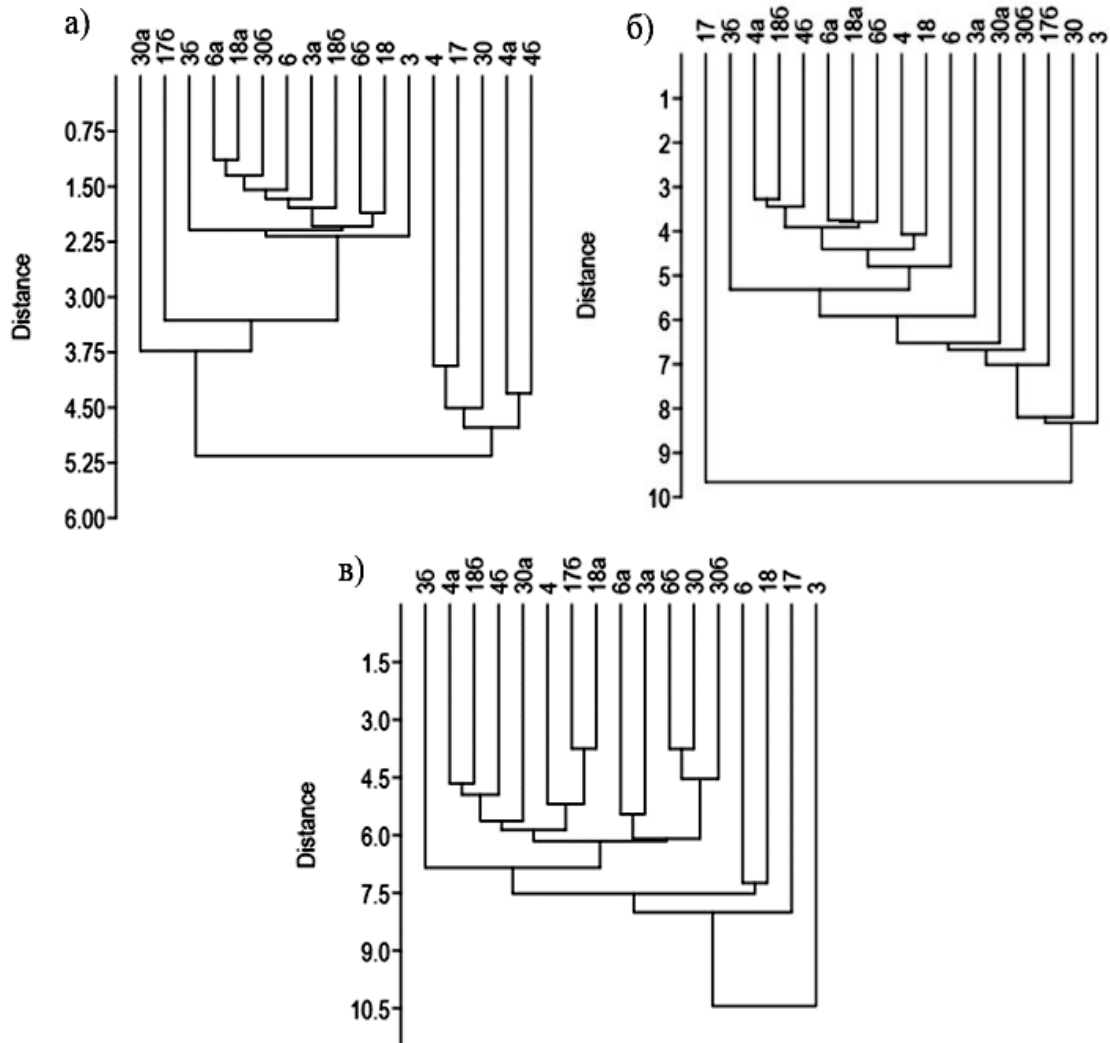


Рис. 3. Дендрограммы сходства станций по численности зоопланктона: а – весна (май 2025 г.), б – лето (июль 2025 г.), в – осень (сентябрь 2025 г.). По вертикальной оси – евклидово расстояние (мера несходства). Цифры – номера станций (см. рис. 1).

Fig. 3. Dendrograms of station similarity based on zooplankton abundance: (a) spring (May 2025), (b) summer (July 2025), (c) autumn (September 2025). The vertical axis represents Euclidean distance (measure of dissimilarity). Numbers indicate stations (see fig. 1).

Весной (рис. 3) выделились две основные группы станций. Наиболее обособленной оказалась группа, включающая станции 4, 4а, 46, 30 и 17, что, вероятно, связано с гидрологическим режимом этих участков в период половодья.

Летом (рис. 3б) особенно выделялась станция 17 (Нижневолжский плес), сочетавшая высокое видовое богатство с низкой общей численностью, что указывает на специфические условия в районе г. Дубны. Осенью (рис. 3в) наиболее контрастной была станция 3 (Шошинский плес), на которой зафиксировано максимальное число таксонов (29).

ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственная неоднородность температурного режима – типичная особенность крупных равнинных водохранилищ [1]. Быстрое весеннее прогревание мелководных участков создает благоприятные условия для раннего развития зоопланктона, однако летний перегрев (свыше 23 °C) может угнетать некоторые холодолюбивые виды ветвистоусых, например, *Daphnia longiremis* (G. O. Sars, 1862) [9].

Обнаруженный в Иваньковском водохранилище состав зоопланктона типичен для эвтрофных и мезотрофных водоемов Верхней Волги. Доминирование коловраток *B. angularis* и *A. priodonta*, а также ветвистоусых *C. sphaericus* и *B. longirostris* характерно для водохранилищ волжского каскада с умеренным антропогенным воздействием [13]. Сходный состав отмечен в Рыбинском [13] и Горьковском водохранилищах [20]. В Нижневолжском плесе зафиксирован *Limnospira frontosa*. В системах биоиндикации этот вид характеризуется как α -мезосапробный, что указывает на его способность существовать в условиях значительного органического загрязнения. При этом литературные данные свидетельствуют о предпочтении видом водоемов с низкой продуктивностью и пониженным содержанием кальция, что может быть связано с ослаблением конкурентного давления со стороны других видов ветвистоусых рачков. Таким образом, присутствие *L. frontosa* в Нижневолжском плесе отражает его высокую экологическую пластичность и может указывать на специфический гидрохимический режим данного участка. Вероятно, это связано с более интенсивным водообменом в этом плесе и меньшей эвтрофикацией по сравнению с мелководными, хорошо прогреваемыми Шошинским и Верхневолжским плесами. Стоит отметить, что в период с 2016 по 2022 гг. в водохранилище массово развивался *Acanthocyclops americanus* (Marsh, 1892), который является теплолюбивым пелагическим видом [21].

Согласно классификации М. Л. Пидгайко с коллегами [19] Иваньковское водохранилище в 2025 г. относится к очень малокормным водоемам (средняя биомасса зоопланктона 0,395 г/м³). Прямое сопоставление с данными В. И. Лазаревой с соавторами [13] показывает, что за период 2013–2017 гг. общая биомасса зоопланктона в Иваньковском водохранилище составляла 0,619 г/м³, что в 1,5 раза выше показателей 2025 г. В 2013–2017 гг. этот водоем был одним из наиболее продуктивных в Волжско-Камском каскаде, уступая лишь Угличскому. Аналогичная ситуация наблюдалась и в 2021 году: биомасса зоопланктона тогда составила 0,847 г/м³ [22], что в 2,1 раза превышает значение, полученное нами в 2025 г. Таким образом, к 2025 г. кормовая база Иваньковского водохранилища опустилась до уровня, характерного ранее для Рыбинского и Куйбышевского водохранилищ (табл. 3).

Столь низкая кормность Иваньковского водохранилища может быть объяснена несколькими факторами: большой долей мелководной зоны, способствующей зарастанию высшей водной растительностью и сокращению пелагической зоны [1]; транзитным гидрологическим режимом, приводящим к вымыванию планктона в нижележащие участки Волги, а также многолетними изменениями трофического статуса (снижением эвтрофикации) ряда волжских водохранилищ в последние десятилетия [3].

Таблица 3. Сравнение общей биомассы зоопланктона (г/м³) в Иваньковском водохранилище в 2025 г. (наши данные) с данными по водохранилищам Волжско-Камского каскада за 2013–2021 гг. [13, 22].

Table 3. Comparison of the total zooplankton biomass (g/m³) in the Ivankovo Reservoir in 2025 (our data) with data from the reservoirs of the Volga-Kama cascade for 2013–2021 [13, 22]

Водоем	Общая биомасса зоопланктона (г/м ³)	Отношение к нашим данным
Наши данные (2025)	0,395	–
Иваньковское (2013–2017) [13]	0,619	выше в 1,5 раза
Рыбинское (2013–2017)	0,139	ниже в 2,8 раза
Горьковское (2015–2017)	0,066	ниже в ~5,9 раз
Чебоксарское (2015–2017)	0,100	ниже в 4 раза
Куйбышевское (2015–2017)	0,121	ниже в 3,2 раза
Саратовское (2015, 2017)	0,073	ниже в 5,4 раза
Волгоградское (2017)	0,048	ниже в 8,2 раза
Камское (2016)	0,060	ниже в 6,5 раз
Иваньковское (2021) [22]	0,847	выше в 2,1 раза

Наиболее продуктивным в 2025 г. оказался Средневожский плес (0,631 г/м³), что, вероятно, связано с поступлением биогенных элементов из г. Конаково и притоков, а также с оптимальным для развития зоопланктона гидрологическим режимом (умеренная проточность, достаточная глубина). Шошинский плес (0,578 г/м³) также показал относительно высокую биомассу, что может быть обусловлено его изолированностью от основного русла и меньшим вымыванием. Минимальные показатели Верхневожского плеса (0,063 г/м³) требуют дополнительного изучения. Возможно, это связано с локальными условиями (зарастание, заиливание, особенности водообмена) или с недостаточным охватом станций в этом плесе.

Значения индексов биоразнообразия (Шеннона, Симпсона) последовательно возрастали от весны к лету и снижались осенью, что соответствует классической сезонной динамике планктонных сообществ [17].

Станция 30а (Средневожский плес) показала уникальную динамику: летом здесь отмечено резкое доминирование одного вида (*B. angularis*, индекс $d = 0,85$), а осенью – максимальное для всего водоема выравнивание ($d = 0,14$, $H = 2,38$). Это может указывать на смену гидрологического режима на данном участке или на локальное цветение воды в летний период.

Низкая кормность Иваньковского водохранилища (очень малокормный водоем по классификации М. Л. Пидгайко) напрямую ограничивает его рыбопродукционный потенциал. Зоопланктон является основным кормом для молоди большинства промысловых видов (лещ, плотва, густера, судак, окунь) на ранних этапах развития [23]. При биомассе зоопланктона менее 0,5 г/м³ выживаемость личинок рыб в природных условиях резко снижается [24].

Низкий уровень продуктивности кормовой базы обуславливает необходимость разработки комплексных мелиоративных мероприятий. При этом любое целенаправленное воздействие на биологическую продуктивность водного объекта

должно опираться на результаты предварительного углублённого анализа гидрохимического режима и количественной оценки баланса биогенных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В вегетационный сезон 2025 г. в зоопланктоне Иваньковского водохранилища идентифицировано 55 таксонов. Средняя биомасса зоопланктона составила 0,395 г/м³, что по классификации М. Л. Пидгайко с соавторами соответствует очень малокормному водоему. Наиболее продуктивным был Средневожский плес (0,631 г/м³), наименее – Верхневожский (0,063 г/м³), что подтверждает выраженную пространственную неоднородность распределения зоопланктона в пределах водохранилища.

Сравнение с данными предшествующих исследований выявило устойчивую тенденцию к снижению количественных показателей зоопланктона: по сравнению с периодом 2013–2017 гг. общая биомасса сократилась в 1,5 раза (с 0,619 до 0,395 г/м³), а относительно 2021 г. – в 2,1 раза (с 0,847 до 0,395 г/м³). Таким образом, к 2025 г. кормовая база Иваньковского водохранилища опустилась до уровня, характерного ранее для Рыбинского и Куйбышевского водохранилищ, что требует пристального внимания со стороны рыбохозяйственных и природоохранных организаций.

Полученные данные указывают на тенденцию к снижению количественных показателей зоопланктона по сравнению с периодом 2013 – 2021 гг. Это может свидетельствовать о перестройке трофического статуса водоема или быть следствием специфических гидрометеорологических условий 2025 г. Полученные данные могут служить референсными значениями для экологического мониторинга и оценки эффективности будущих рыбохозяйственных мероприятий.

Поскольку исследование охватывает только один вегетационный сезон, выводы носят предварительный характер. Для выявления устойчивых трендов и причин наблюдаемой депрессии зоопланктона необходим многолетний мониторинг с охватом большего числа станций и сезонов.

Список источников

1. Иваньковское водохранилище и его жизнь / под ред. Н. В. Буторина. – Ленинград: Наука, 1978. – 304 с.
2. Промысел на водоемах Тверской области: историческая ретроспектива и современность / Д. В. Горячев, А. И. Никитенко, Д. А. Гвоздарев [и др.]. – DOI: 10.36038/0234-2774-2024-25-2-75-88 // Вопросы рыболовства. – 2024. – Т. 25, № 2. – С. 75–88.
3. Влияние уровня режима Иваньковского водохранилища (Средняя Волга) на состояние запасов и промысел обитающих в нем рыб / А. И. Никитенко, Д. В. Горячев, Д. В. Артеменков [и др.]. – DOI: 10.36038/0131-6184-2025-3-92-103 // Рыбное хозяйство. – 2025. – № 3. – С. 92–103.
4. Никаноров, Ю. И. Иваньковское водохранилище / Ю. И. Никаноров // Водохранилища Волжско-Камского каскада и их рыбохозяйственное значение. – 1975. – Т. 102. – С. 5–25.

5. О возобновлении промысла на Иваньковском водохранилище / Д. В. Горячев, А. И. Никитенко, М. Ю. Амелин [и др.]. – DOI: 10.36038/0234-2774-2023-24-1-154-164 // Вопросы рыболовства. – 2023. – Т. 24, № 1. – С. 154–164.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР / под ред. Ю. Е. Яблокова. – Москва: Гидрометеиздат, 1973. – Т. 10. – 475 с.
7. Состояние запасов водных биологических ресурсов Иваньковского и Угличского водохранилищ / Д. В. Горячев, А. И. Никитенко, Н. Н. Клец [и др.]. – DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-1-25-37 // Вопросы рыболовства. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 25–37.
8. Динамика запасов и биологические показатели основных промысловых видов рыб Иваньковского водохранилища за период 1998–2021 гг., их освоение промыслом / А. И. Никитенко, Д. В. Горячев, В. Ю. Жарикова [и др.]. – DOI: 10.36038/0234-2774-2023-24-3-172-194 // Вопросы рыболовства. – 2023. – Т. 24, № 3. – С. 172–194.
9. Крылов, А. В. Зоопланктон равнинных малых рек / А. В. Крылов. – Москва: Наука, 2005. – 263 с.
10. Czerniawski, R. Zooplankton Size as a Factor Determining the Food Selectivity of Roach (*Rutilus Rutilus*) in Water Basin Outlets / R. Czerniawski, T. Krepski. – DOI: 10.3390/w11061281 // Water. – 2019. – Vol. 11, № 6. – P. 1281.
11. Dhont, J. Rotifers, Artemia and copepods as live feeds for fish larvae in aquaculture / J. Dhont, K. Dierckens, J. Stottrup [et al.]. – DOI: 10.1533/9780857097460 // Advances in Aquaculture Hatchery Technology. – Cambridge: Woodhead, 2013. – P. 157–202.
12. Ривьер, И. К. Зоопланктон Иваньковского водохранилища в зоне влияния подогретых вод Конаковской ГРЭС / И. К. Ривьер // Труды Института биологии внутренних вод Академии наук СССР. – 1975. – С. 211–219.
13. Лазарева, В. И. Особенности структуры и распределения позднелетнего (август) зоопланктона в водохранилищах Волги / В. И. Лазарева, Р. З. Сабитова, Е. А. Соколова. – DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0011 // Труды ИБВВ РАН. – 2018. – № 82. – С. 28–51.
14. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / под ред. С. Я. Цалолыхина, В. Р. Алексеева. – Санкт-Петербург: Товарищество научных изданий КМК, 2010. – Т. 1. – 495 с.
15. Чертопруд, М. В. Краткий определитель беспозвоночных пресных вод центра Европейской России / М. В. Чертопруд, Е. С. Чертопруд. – 4-е изд. – Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2022. – 370 с.
16. Винберг, Г. Г. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Г. Г. Винберг, Г. М. Лаврентьева // Л.: ГосНИОРХ, Зоолог. ин-т АН СССР, 1982. – 33 с.
17. Шитиков, В. К. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг, Т. Д. Зинченко. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
18. Hammer, O. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis / O. Hammer, D. A. T. Harper, P. D. Ryan // Palaeontologia Electronica. – 2001. – Vol. 4, № 1. – P. 1–9.

19. Краткая биолого-продукционная характеристика водоемов северо-запада СССР / М. Л. Пидгайко, Б. М. Александров, Ц. И. Иоффе [и др.] // Известия ГосНИОРХ. – 1968. – Т. 67. – С. 205–228.

20. Обилие, распределение и смертность гидробионтов на речном участке в зоне влияния подогретых вод ГРЭС / Ю. В. Герасимов, С. Э. Болотов, А. И. Цветков, Э. С. Борисенко. – DOI: 10.31857/S0320965223060116 // Биология внутренних вод. – 2023. – № 6. – С. 747–761.

21. Лазарева, В. И. Распространение и значение чужеродного вида *Acanthocyclops americanus* (Marsh, 1892) (Crustacea, Cyclopoida) в зоопланктоне водохранилищ Волго-Камского каскада / В. И. Лазарева // Актуальные проблемы изучения ракообразных. – Севастополь: Институт природно-технических систем, 2024. – С. 56.

22. Зоопланктон водохранилищ р. Волги: структура, обилие и динамика / В. И. Лазарева, С. М. Жданова, Р. З. Сабитова, Е. А. Соколова // Биология внутренних вод. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 151–166.

23. Шмакова, З. И. Рекомендации по повышению кормовой базы и контролю гидробиологического режима водоемов фермерских хозяйств / З. И. Шмакова, И. Ю. Бадаева, С. С. Усакова. – Дмитров: ВНИИПРХ, 2015. – 18 с.

24. Богатова, И. Б. Теоретические основы и новые методы создания естественной кормовой базы для рыбоводства / И. Б. Богатова // Избранные труды ВНИИПРХ. – Дмитров: ВНИИПРХ, 2002. – Т. 3–4. – С. 242–257.

References

1. The Ivankovo Reservoir and its life / edited by N. V. Butorin. – Leningrad: Nauka Publ., 1978. – 304 p.

2. Fishing in the Water Bodies of the Tver Region: historical retrospective and modern times / D. V. Goryachev, A. I. Nikitenko, D. A. Gvozdev [et al.]. – DOI: 10.36038/0234-2774-2024-25-2-75-88 // Fisheries issues. – 2024. – Vol. 25, № 2. – P. 75–88.

3. Influence of the level regime of the Ivankovsky Reservoir (Middle Volga) on the state of stocks and fishing of fish living in it / A. I. Nikitenko, D. V. Goryachev, D. V. Artemenkov [et al.]. – DOI: 10.36038/0131-6184-2025-3-92-103 // Fisheries. – 2025. – № 3. – P. 92–103.

4. Nikanorov, Yu. I. Ivankovskoye Reservoir / Yu. I. Nikanorov // Reservoirs of the Volga-Kama Cascade and their Fisheries Importance. – 1975. – Vol. 102. – P. 5–25.

5. On the resumption of fishing in the Ivankovo Reservoir / D. V. Goryachev, A. I. Nikitenko, M. Yu. Amelin [et al.]. – DOI: 10.36038/0234-2774-2023-24-1-154-164 // Fisheries issues. – 2023. – Vol. 24, № 1. – P. 154–164.

6. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR / edited by Yu. E. Yablokov. – Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1973. – Vol. 10. – 475 p.

7. The state of the reserves of aquatic biological resources in the Ivankovo and Uglich reservoirs / D. V. Goryachev, A. I. Nikitenko, N. N. Klets [et al.]. – DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-1-25-37 // Fisheries issues. – 2021. – Vol. 22, № 1. – P. 25–37.

8. Dynamics of stocks and biological indicators of the main commercial fish species in the Ivankovo Reservoir for the period 1998-2021, and their exploitation by

fishing / A. I. Nikitenko, D. V. Goryachev, V. Yu. Zharikova [et al.]. – DOI: 10.36038/0234-2774-2023-24-3-172-194 // Fisheries issues. – 2023. – Vol. 24, № 3. – P. 172–194.

9. Krylov, A. V. Zooplankton of lowland small rivers / A. V. Krylov. – Moscow: Nauka Publ., 2005. – 263 p.

10. Czerniawski, R. Zooplankton Size as a Factor Determining the Food Selectivity of Roach (*Rutilus Rutilus*) in Water Basin Outlets / R. Czerniawski, T. Krepski. – DOI: 10.3390/w11061281 // Water. – 2019. – Vol. 11, № 6. – P. 1281.

11. Dhont, J. Rotifers, Artemia and copepods as live feeds for fish larvae in aquaculture / J. Dhont, K. Dierckens, J. Stottrup [et al.]. – DOI: 10.1533/9780857097460 // Advances in Aquaculture Hatchery Technology. – Cambridge: Woodhead, 2013. – P. 157–202.

12. Rivier, I. K. Zooplankton of the Ivankovsky Reservoir in the zone of influence of the heated waters of the Konakovskaya GRES / I. K. Rivier // Proceedings of the Institute of Inland Water Biology of the USSR Academy of Sciences. – 1975. – P. 211–219.

13. Lazareva, V. I. Features of the structure and distribution of late summer (august) zooplankton in the Volga Reservoirs / V. I. Lazareva, R. Z. Sabitova, E. A. Sokolova. – DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0011 // Transactions of IBIW RAS. – 2018. – № 82. – P. 28–51.

14. Identification guide of freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories / edited by S. Ya. Tsalolikhin, V. R. Alekseev. – Saint-Petersburg, Scientific Press KMK Publ., 2010. – Vol. 1. – 495 p.

15. Chertoprud, M. V. A Brief Identification Guide of Freshwater Invertebrates in the center of European Russia / M. V. Chertoprud, E. S. Chertoprud. – 4th ed. – Moscow: KMK Scientific Press Publ., 2022. – 370 p.

16. Vinberg, G. G. Methodological recommendations for the collection and processing of materials in hydrobiological studies on freshwater bodies. Zooplankton and its production / G. G. Vinberg, G. M. Lavrentyeva. – Leningrad: GosNIORKh, Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences, 1982. – 33 p.

17. Shitikov, V. K. Quantitative Hydroecology: methods of system identification / V. K. Shitikov, G. S. Rozenberg, T. D. Zinchenko. – Tolyatti, IEB RAS Publ., 2003. – 463 p.

18. Hammer, O. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis / O. Hammer, D. A. T. Harper, P. D. Ryan // Palaeontologia Electronica. – 2001. – Vol. 4, № 1. – P. 1–9.

19. A brief biological and productive characteristic of the water bodies of the North-West of the USSR / M. L. Pidgayko, B. M. Aleksandrov, Ts. I. Ioffe [et al.] // Izvestiya GosNIORKh. – 1968. – Vol. 67. – P. 205–228.

20. Abundance, distribution and mortality of aquatic organisms in the river area in the zone of influence of heated waters of GRES / Yu. V. Gerasimov, S. E. Bolotov, A. I. Tsvetkov, E. S. Borisenko. – DOI: 10.31857/S0320965223060116 // Inland Water Biology. – 2023. – № 6. – P. 747–761.

21. Lazareva, V. I. Distribution and significance of the alien species *Acanthocyclops americanus* (Marsh, 1892) (Crustacea, Cyclopoida) in the zooplankton of the Volga-Kama cascade reservoirs / V. I. Lazareva // Actual Problems of the Study of Crustaceans. – Sevastopol: Institute of Natural and Technical Systems, 2024. – P. 56.

22. Zooplankton of the Volga reservoirs: structure, abundance and dynamics / V. I. Lazareva, S. M. Zhdanova, R. Z. Sabitova, E. A. Sokolova // Inland Water Biology. – 2024. – Vol. 17, № 1. – P. 151–166.

23. Shmakova, Z. I. Recommendations for improving the feed base and controlling the hydrobiological regime of farm ponds / Z. I. Shmakova, I. Yu. Badaeva, S. S. Uskova. – Dmitrov: VNIIPRKh Publ., 2015, 18 p.

24. Bogatova, I. B. Theoretical foundations and new methods for creating a natural feed base for fish farming / I. B. Bogatova // Selected works VNIIPRKh. Dmitrov: 2002. – Vol. 3–4. – P. 242–257.

Информация об авторах

И. А. Жернаков – главный специалист

А. И. Никитенко – кандидат биологических наук, руководитель группы

Д. Ю. Тюлин – кандидат биологических наук, главный специалист

Д. В. Горячев – руководитель научного направления

А. В. Солодовник – младший специалист

Information about the authors

I. A. Zhernakov – Main Specialist

A. I. Nikitenko – Candidate of Biological Sciences, Group Leader

D. Yu. Tyulin – Candidate of Biological Sciences, Head Specialist

D. V. Goryachev – Head of the Scientific Department

A. V. Solodovnik – Junior Specialist

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.06.2026; одобрена после рецензирования 10.07.2026; принята к публикации 13.07.2026.

The article was submitted 28.06.2026; approved after reviewing 10.07.2026; accepted for publication 13.07.2026.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Научная статья

УДК 664

DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-29-43

Влияние стабилизирующих рыбных добавок на текстурные и органолептические свойства шоколадных муссов

Виктор Иванович Воробьев¹, Ольга Павловна Чернега²✉, Кристина Евгеньевна Ленц³

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

¹ viktor.vorobev@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8209-7851>

² olga.chernega@klgtu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4150-2731>

³ lents30@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7793-2419>

Аннотация. Актуальность исследования вызвана возможностью вовлечения в промышленное производство значительного количества побочного сырья – рыбьей кожи, используемой для получения гидрата рыбного коллагена, и применения коллагена в качестве стабилизатора текстуры шоколадных муссов. Целью работы является оценка влияния рыбных добавок коллагена и желатина, применяемых в качестве стабилизатора, на текстурные и органолептические свойства получаемых шоколадных муссов. Показана пищевая ценность исследуемых рыбных стабилизирующих добавок (коллагена и желатина), а также желатина говяжьего. Установлена величина плотности образцов шоколадных муссов с говяжьим желатином ($0,849 \text{ г/см}^3$), рыбным коллагеном ($0,827 \text{ г/см}^3$) и рыбным желатином ($0,756 \text{ г/см}^3$). Представлены показатели текстуры для охлажденных и размороженных муссов с рыбным коллагеном и желатином соответственно: для охлажденных – твердость ($2,00 \pm 0,49 \text{ Н}$ и $1,38 \pm 0,42 \text{ Н}$), адгезивность ($2,8 \pm 0,40 \text{ мДж}$ и $2,40 \pm 0,40 \text{ мДж}$), когезивность ($0,84 \pm 0,14$ и $0,74 \pm 0,21$), эластичность ($0,41 \pm 0,14$ и $0,30 \pm 1,12$), упругость ($3,33 \pm 0,56 \text{ мм}$ и $2,16 \pm 1,47 \text{ мм}$), жевательность ($4,90 \pm 0,40 \text{ мДж}$ и $2,10 \pm 1,20 \text{ мДж}$), средняя пиковая нагрузка ($1,83 \pm 0,56 \text{ Н}$ и $1,26 \pm 0,14 \text{ Н}$); для размороженных – твердость ($3,16 \pm 0,70 \text{ Н}$ и $1,47 \pm 0,14 \text{ Н}$), адгезивность ($2,67 \pm 1,45 \text{ мДж}$ и $1,70 \pm 0,70 \text{ мДж}$), когезивность ($0,77 \pm 0,21$ и $0,72 \pm 0,35$), эластичность ($0,42 \pm 0,14$ и $0,22 \pm 0,42$), упругость ($4,00 \pm 0,35 \text{ мм}$ и $2,49 \pm 0,70 \text{ мм}$), жевательность ($8,33 \pm 1,20 \text{ мДж}$ и $2,60 \pm 2,0 \text{ мДж}$), средняя пиковая нагрузка ($2,91 \pm 0,63 \text{ Н}$ и $1,26 \pm 0,14 \text{ Н}$). Дана органолептическая оценка образцов шоколадных муссов с применением стабилизирующих рыбных добавок, а также предложены варианты их использования при производстве десертной продукции.

Ключевые слова: стабилизирующие рыбные добавки, рыбный коллаген и желатин, желатин говяжий, шоколадный мусс, текстура мусса, пищевая ценность.

Финансирование: Исследование выполнено в соответствии с утвержденным планом тематик научных исследований ФГБОУ ВО «КГТУ» за счет средств Федерального бюджета (бюджетный цикл 2025–2027), рег. № 1022062900061-5 «Разработка и совершенствование инновационных процессов пищевой инженерии»

Для цитирования: Воробьев В. И., Чернега О. П., Ленц К. Е. Влияние стабилизирующих рыбных добавок на текстурные и органолептические свойства шоколадных муссов // Известия КГТУ. 2026. № 82. С. 29–43. DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-29-43.

Original article

The effect of stabilizing fish additives on the textural and organoleptic properties of chocolate mousses

Viktor I. Vorob'ev¹, Ol'ga P. Chernega²✉, Kristina E. Lents³

¹ viktor.vorobev@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8209-7851>

² olga.chernega@klgtu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4150-2731>

³ lents30@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7793-2419>

Abstract. The relevance of the study is due to the potential for the industrial use of a significant amount of by-product raw material – fish skin – for the production of fish collagen hydrate, which is used as a texture stabilizer in chocolate mousses. The aim of the study is to evaluate the effect of fish collagen and gelatin additives, used as stabilizers, on the textural and organoleptic properties of the resulting chocolate mousses. The nutritional value of the studied fish stabilizing additives (collagen and gelatin), as well as beef gelatin, is demonstrated. The density of chocolate mousse samples has been determined: 0,849 g/cm³ for those with beef gelatin, 0,827 g/cm³ for those with fish collagen, and 0,756 g/cm³ for those with fish gelatin. The texture parameters for chilled and defrosted mousses with fish collagen and gelatin are presented, respectively: for chilled ones – hardness (2,00±0,49 N and 1,38±0,42 N), adhesiveness (2,8±0,40 mJ and 2,40±0,40 mJ), cohesivity (0,84±0,14 and 0,74±0,21), elasticity (0,41±0,14 and 0,30±1,12), springiness (3,33±0,56 mm and 2,16±1,47 mm), chewiness (4,90±0,40 mJ and 2,10±1,20 mJ), average peak load (1,83±0,56 N and 1,26±0,14 N); for defrosted ones – hardness (3,16±0,70 N and 1,47±0,14 N), adhesiveness (2,67±1,45 mJ and 1,70±0,70 mJ), cohesivity (0,77±0,21 and 0,72±0,35), elasticity (0,42±0,14 and 0,22±0,42), resilience (4,00±0,35 mm and 2,49±0,70 mm), chewiness (8,33±1,20 mJ and 2,60±2,0 mJ), average peak load (2,91±0,63 N and 1,26±0,14 N). An organoleptic assessment of chocolate mousse samples using stabilizing fish additives is given, and options for their use in the production of dessert products are proposed.

Keywords: stabilizing fish additives, fish collagen and gelatin, beef gelatin, chocolate mousse, mousse texture, nutritional value.

Funding: The study was conducted in accordance with the approved plan of research topics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KSTU", implemented using federal budget funds (budget cycle 2025-2027) with reg. №1022062900061-5 "Development and improvement of innovative processes in food engineering".

For citation: Vorob'ev V. I., Chernega O. P., Lents K. E. The effect of stabilizing fish additives on the textural and organoleptic properties of chocolate mousses. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(82):29–43. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-29-43.

ВВЕДЕНИЕ

По прогнозам среднегодовой темп роста (CAGR) потребительского спроса в мире на кондитерские изделия на период с 2026 по 2033 год составляет примерно 3,5 %, при этом высокие темпы роста будет иметь сегмент наиболее востребованных и прибыльных шоколадных изделий (включая муссы) с размером рынка 300 миллиардов долларов США к 2033 году [1].

Слово «мусс» с французского языка переводится как «пена», тем самым подчеркивается нежная и воздушная текстура получаемого десерта, который полюбили миллионы людей [2]. Происхождение этого блюда неизвестно, но установлено, что в 1894 году французские повара взбивали рыбные и овощные закуски, закрепляя их желатином и называя муссовыми изделиями. Впоследствии художник Анри Тулуз-Лотрек соединил взбитые яичные белки с шоколадом и назвал получившийся десерт «шоколадный майонез» [3]. Традиционный французский мусс считался важным блюдом национальной кухни, которое подавалось на каждой королевской трапезе.

Известные мировые производители шоколадных муссов – Barry Callebaut AG (Швейцария/Бельгия), Nestlé и Lindt & Sprüngli (Швейцария), Danone (Франция), Müller (Германия), Ferrero Group и Master Martini (Италия) и др. компании [4, 5].

Основными трендами производства шоколадных муссов являются:

- наличие «чистой этикетки», указывающей на применение простых ингредиентов в составе рецептуры;
- «минимизация», связанная с использованием небольшого количества ингредиентов в рецептуре мусса;
- «персонализация» – изготовление небольших по объему шоколадных муссов (ассорти), имеющих различную вкусовую и цветовую гамму, позволяющих потребителю насладиться и выбрать лучшее для себя лакомство;
- «здоровье» – применение в рецептурах только натуральных ингредиентов и функциональных добавок;
- снижение содержания сахара при отсутствии консервантов и применении протеинов;
- внедрение ИИ-технологий в процесс получения и сбыта кондитерских изделий [6].

Известно множество рецептов шоколадных муссов с различными добавками, но их базовыми составляющими являются преимущественно шоколад, сливки, масло, яйца. В качестве стабилизатора текстуры и формы сбивных изделий применяются гидроколлоиды животного и растительного происхождения (белковые гидролизаты, желатин, агар-агар, пектин и др.) [7–9].

Желатин, получаемый преимущественно из свиной шкуры, а также спилка и костей крупного рогатого скота, наряду с преимуществами имеет и существенные ограничения. Он не подходит для потребителей, соблюдающих религиозные

нормы. Агар-агар, в свою очередь, не обладает высокой пищевой ценностью, так как содержит небольшое количество белков. В связи с наличием в Калининградском регионе значительного количества практически неиспользуемого сырья (отходы от разделки рыбы в виде кожи и чешуи) и разработанных экономически приемлемых технологий пищевых коллагенсодержащих добавок на основе данного сырья имеется практический интерес их применения в качестве альтернативной замены желатина животного происхождения на гидрат рыбного коллагена в составе рецептур кондитерских изделий.

Известны способы получения муссов и желе с использованием в качестве структурообразователя рыбного желатина в сочетании с другими стабилизаторами пищевых систем [10, 11].

Целью работы является оценка влияния рыбных добавок коллагена и желатина, применяемых в качестве стабилизатора, на текстурные и органолептические свойства получаемых шоколадных муссов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления шоколадного мусса в качестве ингредиентов использовали лиофилизат гидрата рыбного коллагена (рыбный коллаген), полученный на кафедре химии ФГБОУ ВО «КГТУ»; сливки 33 %-ой жирности по ТУ 105112-145-05268977-2014; желатин пищевой П-220 (тип Б) по ГОСТ 11293-2017 «Желатин. Технические условия»; желатин рыбный по ТУ 20.59.60-001-36848964-2019 «Желатин пищевой. Технические условия» 250 Блюм; молочный шоколад по ГОСТ Р 70337-2022 «Шоколад. Общие технические условия»; горький шоколад по СТО 96436727-008-2016 «Шоколад. Технические условия».

Инструментальную оценку текстурных характеристик муссов проводили с помощью текстурометра Brookfield CT3 Texture Analyzer с использованием акрилового цилиндрического зонда диаметром 38 мм, скоростью погружения 2 мм/с и нагрузкой 0,5 Н, глубиной погружения 5 мм (рис. 2).

Прочность студня из рыбного коллагена устанавливали с помощью текстурометра Brookfield CT3 Texture Analyzer по методике выполнения измерения с использованием акрилового цилиндрического зонда диаметром 12,7 мм, погружая его в пробу на глубину 4 см при скорости движения 1 мм/с после усилия касания 7 г. Полученная при этом максимальная величина усилия нагрузки в граммах интерпретируется как сила Блюма. Пробу готовили по ГОСТ 11293-2017 «Желатин. Технические условия», п. 8.11.3. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение результатов двух определений.

В готовых контрольном и опытных образцах шоколадных муссов определяли органолептические, физико-химические и реологические показатели. Общий химический анализ проводили в аккредитованной испытательной лаборатории ООО «Калининградский испытательный центр» (г. Калининград). Химические показатели образцов шоколадных муссов определяли в соответствии со следующей документацией: определение массовой доли белка по ГОСТ Р 54607.7-2016; жира по ГОСТ Р 54607.5-2015; влаги по ГОСТ Р 54607.4-2015; общей золы по ГОСТ Р 54607.10-2017. Значение массовой доли углеводов во всех образцах определяли расчетным методом в соответствии с МУ №4237-86 от 29.12.86 г.

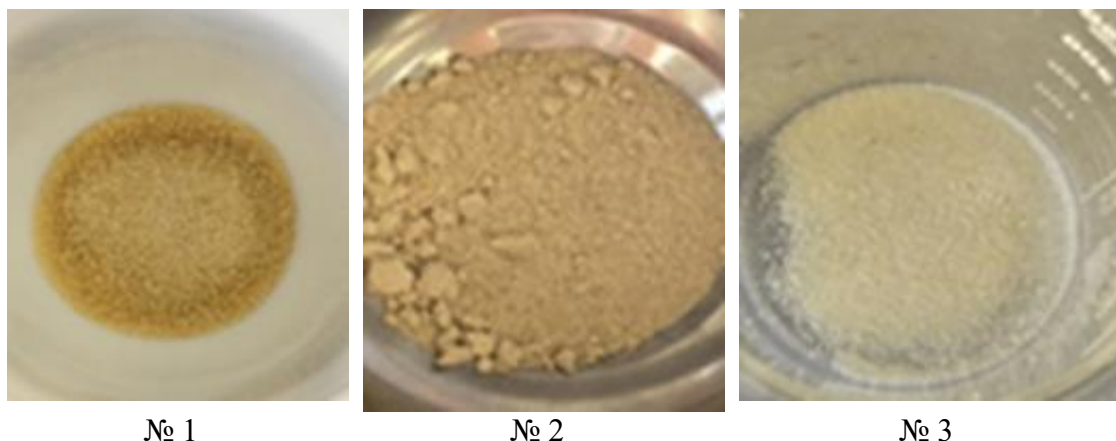
В табл. 1 представлена пищевая ценность применяемых стабилизирующих компонентов текстуры муссов.

Таблица 1. Пищевая ценность стабилизирующих добавок муссов
Table 1. Nutritional value of stabilizing components of mousses

Наименование структурного компонента	Влага, г	Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г	Энергетическая ценность, Ккал/ кДж
Желатин говяжий	11,7	87,2	0,4	0,7	360/ 1506
Коллаген рыбный (порошок-лиофилизат)	8,0±0,7	30,0±0,3	4,2±0,7	55,8±1,7	381/ 1594
Желатин рыбный	13,3	86,7	менее 0,05	0,0	347/ 1452

Примечание. Значения пищевой ценности желатина говяжьего и рыбного приведены согласно данным производителя

Внешний вид стабилизирующих компонентов шоколадных муссов представлен на рис. 1.



№ 1

№ 2

№ 3

Рис. 1. Стабилизирующие компоненты шоколадных муссов: № 1 – желатин говяжий; № 2 – рыбный коллаген; № 3 – рыбный желатин

Fig. 1. Stabilizing components of chocolate mousses: № 1 – beef gelatin; № 2 – fish collagen; № 3 – fish gelatin

Текстурные показатели муссов, их плотность и органолептическую оценку определяли на кафедре технологии продуктов питания ФГБОУ ВО «КГТУ». Выявление и исключение грубых промахов в полученных результатах осуществлялось с применением критерия Шовене.

Плотность определяли как отношение массы мусса (m, г) к объему посуды (V , см³) [12, 13], органолептическую оценку – в соответствии с ГОСТ 31986-2012.

Измерения проводили в трехкратном повторении. Для обработки полученных экспериментальных данных использовали программу Microsoft Excel (рис. 2).

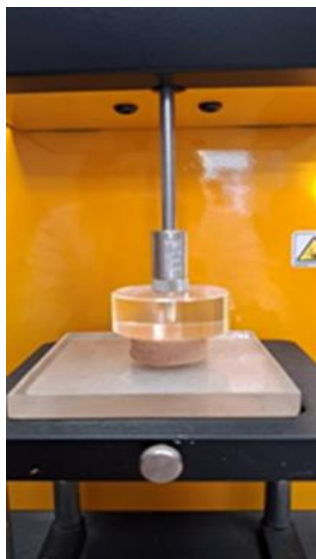


Рис. 2. Внешний вид исследуемого образца мусса на приборе Brookfield CT3 Texture Analyzer

Fig. 2. Appearance of the mousse sample being tested on the Brookfield CT3 Texture Analyzer

Рецептуры образцов шоколадного мусса, представлены в табл. 2. В качестве контроля за основу была взята рецептура мусса из книги с рецептурами муссовых тортов [14].

Таблица 2. Рецептуры образцов шоколадного мусса
Table 2. Recipes for experimental samples of chocolate mousse

Наименование ингредиентов	Масса (нетто) составляющих образцов мусса, г		
	Контроль	Образец № 1	Образец № 2
Сливки, 33 % жирности	45,0	43,0	45,0
Молочный шоколад	23,0	23,0	23,0
Горький шоколад, 70 % какао	8,0	8,0	8,0
Молоко, 3,2 % жирности	22,5	21,5	22,6
Желатин говяжий	1,5	–	–
Желатин рыбный	–	–	1,4
Коллаген рыбный	–	4,5	–
Выход	100,0	100,0	100,0

Процесс приготовления шоколадного мусса осуществляли следующим образом: оба вида желатина (рыбный и говяжий) и коллаген замачивали в холодной воде на 5–7 мин. Молоко нагревали, добавляли к нему набухший желатин/коллаген, перемешивали до получения однородной смеси. Полученную смесь выливали к растопленному шоколаду и тщательно перемешивали. Сливки взбивали до мягких пиков и аккуратно смешивали с остывшей шоколадной смесью. Готовый мусс разливали по формам. Далее одну часть образцов помещали в холодильник для застудивания при температуре 4 °С, другую – в морозильную камеру с температурой среды минус 18 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью определения количества внесения рыбного коллагена как стабилизирующего компонента была установлена прочность коллагенового студня. В качестве контроля взят студень из говяжьего желатина. Внешний вид студней в разрезе представлен на рис. 3. Среднее арифметическое значение двух параллельных измерений для студня из говяжьего желатина составило 210 Блюм, для рыбного коллагена – 70 Блюм.



Рис. 3. Образцы студней: а – желатиновый студень;
б – коллагеновый студень

Fig. 3. Jellied samples: a – gelatin jelly; b – collagen jelly

Для исследования возможности применения рыбного коллагена в качестве стабилизирующего компонента сбивных кондитерских изделий, согласно вышеизложенным рецептурам (табл. 2), были приготовлены следующие контрольный и опытные образцы шоколадных муссов с добавками: контроль с желатином говяжьим; образец № 1 с рыбным коллагеном; образец № 2 с рыбным желатином.

Известно, что для получения муссов, не расплавляющихся при комнатной температуре, в рецептуру вводят в среднем от 2,5 до 4 % желатина. [15]. Так как отечественными производителями была заявлена высокая прочность геля промышленных образцов говяжьего и рыбного желатина (легирующая способность 220 и 250 Блюм соответственно), то количество их внесения составило соответственно 1,4 и 1,5 % на 100 г продукта, процент внесения рыбного коллагена – 4,5 % на 100 г.

Образцы контрольного и опытных шоколадных муссов со стабилизирующими добавками представлены на рис. 4.



Рис. 4. Образцы шоколадных муссов со стабилизирующими добавками:
а – контроль; б – образец №1; в – образец № 2

Fig. 4. Samples of chocolate mousses with stabilizing additives: a – control;
b – sample № 1; c – sample № 2

Для оценки стабильности муссов определяли параметры их текстур и плотность. Плотность контрольного и опытных образцов шоколадных муссов представлена на рис. 5.

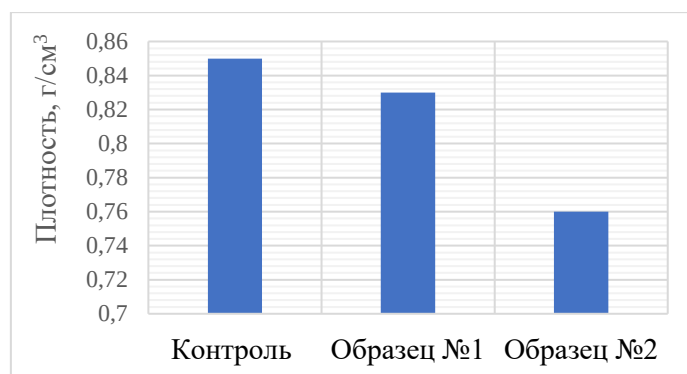


Рис. 5. Плотность образцов шоколадных муссов в зависимости от стабилизирующей добавки: контроль – с желатином говяжьим; образец № 1 – с рыбным коллагеном; образец № 2 – с рыбным желатином

Fig. 5. Density of chocolate mousse samples depending on the stabilizing additive: control – with beef gelatin; sample № 1– with fish collagen; sample № 2 – with fish gelatin

Установленная величина плотности для сбивных десертов была различной в зависимости от применяемого стабилизатора. Как видно из рис. 5, наибольшей плотностью обладали муссы с желатином говяжьим (0,849 г/см³) и рыбным коллагеном (0,827 г/см³), а наименьшей – с рыбным желатином (0,769 г/см³). Это говорит о том, что желатин говяжий и рыбный коллаген позволяют получить плотный, высокостабильный мусс, обладающий отличной несущей способностью для сборки многослойных тортов.

Пищевая ценность контрольного и опытных образцов шоколадного мусса представлена в табл. 3.

Таблица 3. Пищевая ценность образцов шоколадных муссов в 100 г продукта
Table 3. Nutritional value of chocolate mousse samples per 100 g of product

Шоколадный мусс с добавками	Массовая доля, %					Энергетическая ценность, ккал
	влага	жир	белок	зола	углеводы	
Контроль (с говяжьим желатином)	55,1±0,4	20,8±0,5	4,52±0,15	1,095±0,009	18,5±1,1	279,3
Образец № 1 (с рыбным коллагеном)	55,8±0,4	18,1±0,5	4,33±0,15	1,09±0,009	20,7±1,1	263,0
Образец № 2 (с рыбным желатином)	55,4±0,3	20,3±0,5	4,46±0,15	1,095±0,009	18,7±1,1	275,3

Согласно табл. 3 опытный образец № 1 с рыбным коллагеном имел близкие массовые доли белка, влаги и золы с контролем и образцом № 2, количество углеводов в рыбном коллагене было больше по сравнению с контролем и образцом № 2 (2,2 и 2,0 % соответственно) в связи с наличием яблочного сока в рыбном коллагене.

В табл. 4 представлены текстурные характеристики охлажденных и размороженных контрольного и опытных образцов шоколадных муссов.

Таблица 4. Параметры текстуры контрольного и опытных охлажденных и размороженных образцов шоколадных муссов

Table 4. Texture parameters of control and experimental chilled and defrosted chocolate mousse samples

Наименование параметра текстуры	Наименование образцов шоколадных муссов		
	Контроль	Образец № 1	Образец № 2
Охлажденный			
Твердость, Н	2,20±0,28	2,00±0,49	1,38±0,42
Адгезивность, мДж	2,6±0,90	2,8±0,40	2,40±0,40
Когезивность	0,96±0,07	0,84±0,14	0,74±0,21
Эластичность	0,48±0,07	0,41±0,14	0,30±1,12
Упругость, мм	3,80±0,42	3,33±0,56	2,16±1,47
Индекс упругости	0,78±0,14	0,68±0,14	0,45±0,56
Жевательность, мДж	7,73±1,61	4,90±0,40	2,10±1,20
Средняя пиковая нагрузка, Н	2,12±0,56	1,83±0,56	1,26±0,14
Размороженный			
Твердость, Н	3,40±1,68	3,16±0,70	1,47±0,14
Адгезивность, Дж	2,51±0,32	2,67±1,45	1,70±0,70
Когезивность	0,78±0,07	0,77±0,21	0,72±0,35
Эластичность	0,42±0,14	0,42±0,14	0,22±0,42
Упругость, мм	3,82±0,49	4,00±0,35	2,49±0,70
Индекс упругости	0,79±0,14	0,83±0,07	0,52±0,14
Жевательность, мДж	8,70±1,23	8,33±1,20	2,60±2,0
Средняя пиковая нагрузка, Н	3,14±1,47	2,91±0,63	1,26±0,14

Согласно табл. 4 охлажденные шоколадные муссы с желатином говяжьим и с рыбным коллагеном характеризуются наибольшей твердостью (среднее значение 2,20±0,282 Н, 2,00±0,49 Н соответственно) среди представленных образцов, что указывает на их более плотную структуру. Шоколадный мусс с рыбным желатином обладает наименьшей твердостью (1,38±0,42 Н). Полученные данные текстуры шоколадных образцов (табл. 4) согласуются с их плотностью (рис. 5).

Наибольшая способность сцепления с поверхностью (адгезивность) зафиксирована у образцов с рыбным коллагеном. Высокая когезивность всех образцов свидетельствует о хорошем сцеплении частиц в муссовых изделиях.

Мусс с рыбным желатином обладал наименьшей эластичностью (0,30±0,14) и упругостью (2,16±1,47) по сравнению с другими образцами (табл. 4). Низкая эластичность образца указывает на меньшую способность восстанавливать форму после нажатия, как и пониженный индекс упругости, показывающий более низкие восстановительные свойства текстуры.

Высокий индекс упругости образцов муссов с желатином говяжьим ($0,78 \pm 0,14$) и рыбным коллагеном ($0,68 \pm 0,14$) говорит о хороших восстановительных свойствах при применении обеих стабилизирующих добавок.

Значения жевательности показывают необходимость работы, которую надо затратить для разрушения структуры мусса до состояния его проглатывания. Чем выше число жевательности пищевого изделия, тем более плотную и резинистую структуру он имеет. Значение жевательности охлажденных образцов мусса ($7,73 \pm 1,61$ мДж) характеризует структуру как близкую к пуддингу или мармеладу ($4,90 \pm 0,40$ мДж), соответствует классической структуре мусса, а значение жевательности $2,10 \pm 1,20$ мДж характеризует его как нежный «невесомый», где преобладает воздушная фаза (пена). Необходимо отметить, что низкие значения жевательности указывают на нестабильность структуры – мусс может «потечь» при комнатной температуре.

Разница в значении упругости и жевательности обусловлена свойствами коллагена и желатина. Температура плавления говяжьего желатина выше, чем температура плавления рыбного коллагена и желатина [16, 17]. Соответственно, муссы с говяжьим желатином обладают более высокой жевательностью, поскольку их структура требует больших усилий для разрушения.

Значение средней пиковой нагрузки для охлажденного мусса с желатином говяжьим ($2,12 \pm 0,56$ Н) характеризует его как «крепкий», хорошо держащий форму; показатель нагрузки ($1,83 \pm 0,56$ Н) с рыбным коллагеном говорит о сбалансированной текстуре, сохраняющей форму при комнатной температуре и оставаясь нежной, а значение нагрузки ($1,26 \pm 0,14$ Н) для образца с рыбным желатином характеризует мусс как слишком «воздушный», с нестабильной, легко деформирующейся при слабом касании текстурой.

Для оценки возможности применения стабилизирующих компонентов при изготовлении шоколадных муссов в мороженных десертах также определяли текстурные характеристики после размораживания во всех опытных образцах.

Следует отметить, что все образцы после хранения в морозильной камере в течение суток уплотнились. Об этом свидетельствуют значения твердости, жевательности и пиковой нагрузки после размораживания. Высокий индекс упругости у образцов с добавлением желатина говяжьего и рыбного коллагена говорит о хороших восстановительных свойствах шоколадных муссов даже после размораживания. Зависимость адгезивности, эластичности и индекса упругости от стабилизирующих добавок идентична охлажденным муссам.

Когезивность у всех образцов муссов уменьшилась. Наблюдаемая разница когезивности между значениями охлажденного и размороженного муссов говорит о том, что стабильность структуры мусса сохранилась. Наличие гидроколлоида коллагена в муссе при замораживании способствует перераспределению влаги и препятствует образованию крупных кристаллов льда, что при последующем размораживании предотвращает выделение значительного ее количества из мусса, о чем свидетельствует небольшое снижение показателя адгезивности. Также в процессе замораживания происходит уплотнение коллагеновых волокон, что приводит к образованию дополнительных связей между волокнами, которые становятся толще, образуя плотную структуру, в результате чего твердость мусса увеличивается [18–20].

Проведенная органолептическая оценка опытных образцов шоколадных муссов коррелирует с текстурными характеристиками охлажденных и размороженных шоколадных муссов:

- с говяжьим желатином охлажденные и размороженные образцы имели упругую, плотную и стабильную при комнатной температуре консистенцию, близкую по текстуре к пудингу. Запах, цвет и вкус муссов свойственны компонентам рецептуры;

- с рыбным коллагеном охлажденные и размороженные образцы имели достаточно плотную, упругую, нежную и стабильную при комнатной температуре консистенцию, соответствующую классической структуре мусса. Запах, цвет и вкус муссов свойственны компонентам рецептуры;

- с рыбным желатином охлажденные и размороженные образцы имели наименьшую плотность, нежную, воздушную консистенцию, нестабильную при комнатной температуре (текучесть), оставляющую жидкий след. Запах, цвет и вкус муссов свойственны компонентам рецептуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование связано с изучением влияния рыбных добавок коллагена и желатина на текстурные и органолептические свойства шоколадных муссов.

В результате исследования текстурных свойств контрольного и опытных образцов шоколадных муссов с добавлением в качестве стабилизаторов говяжьего желатина, рыбного коллагена и рыбного желатина были получены соответственно следующие показатели: для охлажденных – твердость $2,20 \pm 0,28$ Н, $2,00 \pm 0,49$ Н, $1,38 \pm 0,42$ Н, жевательность $7,73 \pm 1,61$ мДж, $4,90 \pm 0,40$ мДж, $2,10 \pm 1,20$ мДж; для размороженных – твердость $3,40 \pm 1,68$ Н, $3,16 \pm 0,70$ Н, $1,47 \pm 0,14$ Н, жевательность $8,70 \pm 1,23$ мДж, $8,33 \pm 1,20$ мДж, $2,60 \pm 2,0$ мДж. Снижение показателя жевательности и твердости у муссов с рыбным желатином по отношению к контролю обусловлено более низкой молекулярной массой рыбной добавки. Реологические показатели шоколадных муссов с рыбным коллагеном по отношению к контролю имеют близкие значения, так как молекулярная масса рыбного коллагена предположительно соответствует молекулярной массе говяжьего желатина. В процессе замораживания и оттаивания показатели когезивности всех образцов муссов имели тенденцию к снижению, но целостность структуры сохранялась.

Мусс с говяжьим желатином подходит для нижних слоев тортов и как самостоятельный десерт в стаканчиках, а с рыбным коллагеном актуален для муссовых тортов, отлично заполняет сложные силиконовые формы, не образуя пустот, также может подаваться как самостоятельный десерт в индивидуальных стаканчиках. Мусс с рыбным желатином применим для верхних многослойных десертов, легких муссовых пирожных, а также как самостоятельный десерт с учетом условий подачи потребителю.

Дальнейшие исследования будут направлены на установление хранимостойкости шоколадных муссов с рыбным коллагеном в зависимости от температуры хранения.

Список источников

1. Global confectioneries market size by type (chocolate confectioneries, gummy confectioneries), by end-user preferences (health-conscious consumers, parents and families), by distribution channels (online retail, offline retail), by flavor profiles (traditional flavors, exotic flavors), by target demographics (children, teenagers), by geographic scope and forecast. – Текст: электронный // Verified market reports: сайт. – URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/confectioneries-market/> (дата обращения: 8.03.2026).
2. Мусс: воздушное волшебство вкуса и текстуры. – Текст: электронный // Koolinar.ru: сайт. – URL: <https://www.koolinar.ru/article/show/4295/muss-vozdushnoe-volshebstvo-vkusa-i-tekstury> (дата обращения: 8.03.2026).
3. Муссовые пирожные в современном кондитерском мире. – Текст: электронный // Информио: сайт. – URL: <https://www.informio.ru/publications/id8677/Mussovye-pirozhnye-v-sovremennom-konditerskom-mire> (дата обращения: 8.03.2026).
4. Производители шоколада: чьи марки представлены на рынке. – Текст: электронный // Комсомольская правда: сайт. – URL: <https://www.kp.ru/guide/proizvoditeli-shokolada.html?ysclid=mm4mb2faws20167013> (дата обращения: 8.03.2026).
5. Отчет о размере и доле рынка шоколада, 2025–2034 гг. – Текст: электронный // Global Market Insights Inc.: сайт. – URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/chocolate-market> (дата обращения: 28.02.2026).
6. Тренды в кондитерском бизнесе 2025: что действительно нравится клиентам. – Текст: электронный // Кондитория: сайт. – URL: <https://conditoria.ru/sladkie-zametki-konditorii/trendy-v-konditerskom-biznese-2025-chto-dejstvitelno-nravitsja-klientam> (дата обращения: 8.03.2026).
7. Загустители и стабилизаторы: что следует о них знать... – Текст: электронный // Шокодел: сайт. – URL: https://chocodel.com/news/zagustiteli_i_stabilizatory_chno_sleduet_nikh_znat/ (дата обращения: 8.03.2026).
8. Ходырева, З. Р. Разработка муссов с использованием плодово-ягодного сырья / З. Р. Ходырева, А. А. Степанова // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/2. – С. 149–152.
9. Неповинных, Н. В. Пищевые гидроколлоиды: классификация, функциональные свойства и применение / Н. В. Неповинных, О. Н. Петрова. – DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-1-66-72 // Пищевые системы. – 2025. – Т. 8, №1 – С. 66–72.
10. Патент № 112314664А. Китайская Народная Республика, МПК A21D13/80; A21D2/18; A21D2/26; A21D2/34; A21D2/36; A23C19/09; A23C19/093. Глазурь для малинового мусса, способ ее приготовления и нанесения, а также малиновый муссовый торт: № 202011139463.8: заявл. 22.10.2020: опубл. 02.05.2021 / Чжан Сюэцин; Чжан Чжанвэнь.; заявитель COFCO FENGTONG (Beijing) FOOD CO., LTD. 17 с. // Worldwide.espacenet.com: патенты. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/074310923/publication/CN112314664A?q=ti%20all%20%22Raspberry%20Mousse%20Cake%22&queryLang=en%3Ade%3Afr> (дата обращения: 28.02.2026).

11. Патент № 111264663А. Китайская Народная Республика, МПК А23Г3/34; А23Г3/42; А23Г3/44; А23Г3/48; А23Г7/00. Кекс с киви и рыбным желатином и способ его производства: №202010208177.6: заявл.23.03.2020: опубл. 06.12.2020 / Ту Цунгаи; Ли Цзинлин; Ван Хуей; Ша Сяомэй; Чжан Лу; Лю Цзюнь.; заявитель Университет JIANGXI. 12 с. // Worldwide.espacenet.com: патенты. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/070992620/publication/CN111264663A?q=ti%20all%20%22Kiwi%20and%20fish%20gelatin%20cake%22&queryLang=en%3Ade%3Afr> (дата обращения: 28.02.2026).
12. Исследование процесса пенообразования и реологических свойств сбивных десертов из растительного сырья / Д. С. Мухамбеткалиева, А. Р. Абушаева, М. К. Садыгова, Н. А. Семилет. – DOI: 10.37493/2307-910X.2024.2.10 // Современная наука и инновации. – 2024. – № 2. – С. 99–117.
13. Молчанова, Е. Н. Обоснование использования фасоли в технологии десертного мусса / Е. Н. Молчанова, И. Д. Щеголева, Ю. Д. Арнаутова. – DOI: 10.20914/2310-1202-2021-4-88-94 // Вестник ВГУИТ. – 2021. – Т. 83, № 4. – С. 88–94.
14. Аксенова, А. И. Муссовые торты. Легче легкого! / А. И. Аксенова. – М: Эксмо, 2023. – 144 с. – ISBN 978-5-04-109417-1.
15. Сафонова, М. А. Основные виды желатина и его применение в пищевой промышленности / М. А. Сафонова, Д. С. Антонова // Вестник магистратуры. – 2017. – № 11–2 (74) – С. 19–22.
16. Islam, J. Recent advancements in marine collagen: exploring new sources, processing approaches, and nutritional applications / J. Islam, K. E. Mis Solval. – DOI: 10.3390/md23050190 // Mar. Drugs. – 2025. – № 23 (190). – P. 1–31.
17. Rezaeivandchali, N. Collagen biomaterials: from traditional animal sources to marine and recombinant alternatives / N. Rezaeivandchali, L. Hebbard, C. McFarlane. – DOI: 10.1155/ijbm/7969177 // International Journal of Biomaterials. – 2026. – P. 1–24.
18. Stabilising frozen dairy mousses by low molecular weight gelatin peptides / B. Duquenne, B. Vergauwen, C. Capdepon [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.04.001 // Food hydrocolloids. – 2016. – Vol. 60. – P. 317–323.
19. Гурский, И. А. Размороженные продукты с сохраненной микро- и макроструктурой / И. А. Гурский, А. В. Ландиховская, А. А. Творогова. – DOI: 10.21323/2618-9771-2022-5-3-195-201 // Пищевые системы. – 2022. – Т. 5, № 3. – С. 195–201.
20. Долгополова, С. В. Перспективные направления использования коллагена при производстве кулинарной продукции / С. В. Долгополова // Наука 21 века: вопросы, гипотезы, ответы. – 2014. – № 4. – С. 101–104.

Reference

1. Global confectioneries market size by type (chocolate confectioneries, gummy confectioneries), by end-user preferences (health-conscious consumers, parents and families), by distribution channels (online retail, offline retail), by flavor profiles (traditional flavors, exotic flavors), by target demographics (children, teenagers), by geographic scope and forecast. – Text: electronic // Verified market reports: site. – URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/confectioneries-market/> (accessed on 8.03.2026).

2. Mousse: the airy magic of taste and texture. – Text: electronic // Koolinar.ru: site. – URL: <https://www.koolinar.ru/article/show/4295/muss-vozdushnoe-volshebstvo-vkusa-i-tekstury> (accessed on 8.03.2026).
3. Mousse cakes in the modern confectionery world. – Text: electronic // Informio: site. – URL: <https://www.informio.ru/publications/id8677/Mussovye-pirozhnye-v-sovremennom-konditerskom-mire> (accessed on 8.03.2026).
4. Chocolate manufacturers: whose brands are represented on the market. – Text: electronic // Komsomolskaya Pravda: site. – URL: <https://www.kp.ru/guide/proizvoditeli-shokolada.html?ysclid=mm4mb2faws20167013> (accessed on 8.03.2026).
5. Chocolate Market Size and Share Report, 2025–2034 – Text: electronic // Global Market Insights Inc.: site. – URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/chocolate-market> (accessed on 8.03.2026).
6. Confectionery Business Trends 2025: What Customers Really Like. – Text: electronic // Konditoria: site. – URL: <https://conditoria.ru/sladkie-zametki-konditorii/trendy-v-konditerskom-biznese-2025-chto-dejstvitelno-nravitsja-klientam> (accessed on 8.03.2026).
7. Thickeners and stabilizers: what you should know about them... – Text: electronic // Shokodel: site. – URL: https://chocodel.com/news/zagustiteli_i_stabilizatory_chto_sleduet_nikh_znat/ (accessed on 8.03.2026).
8. Khodyreva, Z. R. Development of mousses using fruit and berry raw materials / Z. R. Khodyreva, A. A. Stepanova // Polzunovsky Vestnik. – 2012. – № 2/2. – P. 149–152.
9. Nepovinnykh, N. V. Food hydrocolloids: classification, functional properties and application / N. V. Nepovinnykh, O. N. Petrova. – DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-1-66-72 // Food systems. – 2025. – Vol. 8, № 1 – P. 66–72.
10. Patent №112314664A People's Republic of China, IPC A21D13/80; A21D2/18; A21D2/26; A21D2/34; A21D2/36; A23C19/09; A23C19/093. Raspberry mousse glaze, method of preparation and application, and raspberry mousse cake: № 202011139463.8: filed 22.10.2020: published 02.05.2021 / Zhang Xiuji; Zhang Zhangwen. – 17 p. // Woldwide.espacenet.com: patents URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/074310923/publication/CN112314664A?q=ti%20all%20%22Raspberry%20Mousse%20Cake%22&queryLang=en%3Ade%3Afr> (accessed on 28.02.2026).
11. Patent №111264663A. People's Republic of China, IPC A23G3/34; A23G3/42; A23G3/44; A23G3/48; A23G7/00. Kiwi and fish gelatin cake and its production method: No. 202010208177.6: filed 23.03.2020: published 06.12.2020 / Tu Conghai; Li Jingling; Wang Hui; Sha Xiaomei; Zhang Lu; Liu Jun. – 12 p. // Woldwide.espacenet.com: patents URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/070992620/publication/CN111264663A?q=ti%20all%20%22Kiwi%20and%20fish%20gelatin%20cake%22&queryLang=en%3Ade%3Afr> (accessed on 28.02.2026).
12. Study of the foaming process and rheological properties of aerated desserts from plant-based raw materials / D. S. Mukhambetkalieva, A. R. Abushaeva, M. K. Sadygova, N. A. Semilet. – DOI: 10.37493/2307-910X.2024.2.10 // Modern science and innovation. – 2024. – № 2. – P. 99–117.
13. Molchanova, E. N. Justification for the use of beans in dessert mousse technology / E. N. Molchanova, I. D. Shchegoleva, Yu. D. Arnautova. – DOI: 10.20914/2310-1202-2021-4-88-94 // VSUET Bulletin. – 2021. – Vol. 83, № 4. – P. 88–94.

14. Aksenova, A. I. Mousse Cakes. As Easy as pie! / A. I. Aksenova. – M: Eksmo, 2023. – 144 p. – ISBN 978-5-04-109417-1.
15. Safonova, M. A. Main types of gelatin and its application in the food industry / M. A. Safonova, D. S. Antonova // Magistracy Bulletin. – 2017. – № 11–2 (74) – P. 19–22.
16. Islam, J. Recent advancements in marine collagen: exploring new sources, processing approaches, and nutritional applications / J. Islam, K. E. Mis Solval. – DOI: 10.3390/md23050190 // Mar. Drugs. – 2025. – № 23 (190). – P. 1–31.
17. Rezaeivandchali, N. Collagen biomaterials: from traditional animal sources to marine and recombinant alternatives / N. Rezaeivandchali, L. Hebbard, C. McFarlane. – DOI: 10.1155/ijbm/7969177 // International Journal of Biomaterials. – 2026. – P. 1–24.
18. Stabilising frozen dairy mousses by low molecular weight gelatin peptides / B. Duquenne, B. Vergauwen, C. Capdepon [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.04.001 // Food hydrocolloids. – 2016. – Vol. 60. – P. 317–323.
19. Gursky, I. A. Thawed products with preserved micro- and macrostructure / I. A. Gursky, A. V. Landikhovskaya, A. A. Tvorogova. – DOI: 10.21323/2618-9771-2022-5-3-195-201 // Food systems. – 2022. – Vol. 5, № 3. – P. 195–201.
20. Dolgopolova, S. V. Promising areas of collagen use in the production of culinary products / S. V. Dolgopolova // Science of the 21st century: questions, hypotheses, answers. – 2014. – № 4. – P. 101–104.

Информация об авторах

В. И. Воробьев – кандидат технических наук, доцент кафедры химии
О. П. Чернега – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания
К. Е. Ленц – магистр 2-го года обучения кафедры технологии продуктов питания

Information about the authors

V. I. Vorobev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Chemistry
O. P. Chernega – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Food Technology
K. E. Lents – 2nd year Master's student, Department of Food Technology

Вклад авторов

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

Contribution of the authors

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

Статья поступила в редакцию 15.05.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 10.06.2026.

The article was submitted 15.05.2026; approved after reviewing 25.05.2026; accepted for publication 10.06.2026.

Научная статья

УДК 664.325+621.6.057.4

DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-44-65

Динамика слива жидкости Шведова-Бингама из резервуара через цилиндрическую трубу (на примере рыбного жира)

Владимир Аркадьевич Наумов

Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

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

Аннотация. В процессе очистки и применения рыбного жира (РЖ) нередко используется течение по трубопроводу под действием силы тяжести. Экспериментальные исследования ряда авторов показали, что реологические свойства РЖ хорошо описываются моделью вязко-пластичной жидкости Шведова-Бингама (ЖШБ), причем по мере очистки РЖ предельное напряжение σ и пластическая вязкость η уменьшаются. Особенностью задачи является снижение перепада давления по мере уменьшения глубины слоя ЖШБ в резервуаре. В результате характеристики движения ЖШБ (радиус и скорость квазитвердого течения, коэффициент Кориолиса и др.) изменяются в процессе слива. В общем случае динамика слива ЖШБ из резервуара через цилиндрическую трубу в нестационарной постановке описывается системой двух дифференциальных уравнений. Приведение этой системы уравнений к безразмерной форме позволило определить 6 критериев подобия поставленной задачи Коши: аналог числа Струхала Str , отношение длины всего трубопровода и его вертикальной части к исходной глубине ЖШБ в резервуаре (соответственно, l и a), модифицированное число Рейнольдса, отношение сил предельного касательного напряжения к силам тяжести Θ , отношение сил тяжести к силам инерции Ψ . Первые 3 критерия определяются геометрическими параметрами гидравлической системы, три последних зависят от реологических свойств ЖШБ. Задача Коши была решена численным методом. Результаты численного анализа показали, чем больше значение Str , тем меньшая скорость течения в трубе может быть достигнута и больше время ее достижения. При $Str < 1$ задачу можно решать в квазистационарном приближении. В качестве примера была решена задача динамики слива образцов РЖ сома из резервуара. Установлено, что время полного слива РЖ из резервуара уменьшается по стадиям очистки, причем для неочищенного РЖ это время значительно больше, чем у других образцов РЖ. Во всех исследованных условиях число Бингама оставалось больше единицы, что говорит о невозможности использования реологической модели ньютоновской жидкости.

Ключевые слова: рыбный жир, стадии очистки, модель Шведова-Бингама, динамика слива, задача Коши, критерии подобия, численный анализ.

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

Для цитирования: Наумов В. А. Динамика слива жидкости Шведова-Бингама из резервуара через цилиндрическую трубу (на примере рыбного жира) // Известия КГТУ. 2026. № 82. С. 44–65. DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-44-65.

Original article

Dynamics of Shvedov-Bingham liquid discharge from the tank through the cylindrical pipe (using fish oil as an example)

Vladimir A. Naumov

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

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

Abstract. Gravity flow is often used in the process of cleaning and applying fish oil (FO). Experimental studies by a number of authors have shown that the rheological properties of FO are well described by the Shvedov-Bingham viscous-plastic fluid (SBL) model. Moreover, as the rye is cleaned, the limiting stress σ and the plastic viscosity η_n decrease. A special feature of the task is to reduce the pressure drop as the depth of the SBL layer in the tank decreases. As a result, the characteristics of the SBL motion (the radius and velocity of the quasi-solid flow, the Coriolis coefficient, etc.) change during the discharge process. In the general case, the dynamics of the discharge of liquid fuel from the tank through a cylindrical pipe in a non-stationary formulation is described by a system of two differential equations. Reducing this system of equations to a dimensionless form made it possible to determine 6 criteria for the similarity of the Cauchy problem: the analogue of the Strouhal number Str , the ratio of the length of the entire pipeline and its vertical part to the initial depth of the reservoir (respectively, l and a), the modified Reynolds number, the ratio of the forces of marginal tangential stress to gravity forces Θ , the ratio gravity to inertia forces. The first 3 criteria are determined by the geometric parameters of the hydraulic system, the last three depend on the rheological properties of the hydraulic fluid. The Cauchy problem has been solved numerically. The results of the numerical analysis shows that the higher the value of Str is, the lower the flow rate in the pipe can be achieved and the longer the time to achieve it. For $Str < 1$, the problem can be solved in the quasi-stationary approximation. As an example, the problem of dynamics of the discharge of FO samples from the tank has been solved. It has been found that the time for the complete discharge of FO from the tank decreases according to the stages of purification. Moreover, for unpeeled FO, this time is much longer than for other OF samples. In all the conditions studied, the Bingham number remained large, which indicates the impossibility of using the rheological model of a Newtonian fluid.

Keywords: fish oil, purification stages, Shvedov-Bingham model, drain dynamics, Cauchy problem, similarity criteria, numerical analysis.

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. Dynamics of Shvedov-Bingham liquid discharge from the tank through the cylindrical pipe (using fish oil as an example). *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(82):44–65. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-44-65.

ВВЕДЕНИЕ

Значимость рыбного жира (РЖ) как важной добавки в питании человека в настоящее время не подвергается сомнению [1–3]. Многочисленные исследования направлены на совершенствование технологических процессов производства и изучение свойств РЖ [4–7]. Интересные и перспективные для широкого применения исследования проводятся в направлении использования РЖ для подкормки животных [8–10]. Последнее время заметно больше исследований, направленных на усовершенствование оборудования для производства и применения РЖ [11–13], в том числе насосного оборудования для трубопроводного транспортирования РЖ [14, 15]. Однако вне внимания исследователей остался нередко используемый процесс самотечного движения РЖ по трубопроводу (под действием силы тяжести).

Необходимо отметить, что РЖ относится к неньютоновским жидкостям. Исследования [15–17] показали, что реологические свойства РЖ хорошо описываются моделью Шведова-Бингама:

$$\sigma_B = \sigma + \eta \cdot \omega, \quad (1)$$

где σ_B – касательное напряжение, Па; σ – предельное напряжение сдвига, Па; η – пластическая (динамическая) вязкость, Па·с; ω – сдвиг (градиент) скорости, с⁻¹.

Свойства жидкости Шведова-Бингама (ЖШБ) довольно хорошо изучены, они включены в учебники и учебные пособия. Современные исследования касаются различных течений ЖШБ в сложных условиях, в том числе в технологических аппаратах и установках. Так, монография [18] посвящена проблеме исследования течений ЖШБ в каналах и полостях с изменяемыми по времени и пространству формами их стенок. Результаты исследования могут быть использованы в проектных расчетах проточных частей агрегатов с деформируемыми рабочими органами.

В [19] приближенным методом решена задача Гретца-Нуссельта для неизотермического течения ЖШБ в цилиндрической трубе. Решение получено в виде ряда Фурье-Бесселя. Учитывалось внутреннее тепловыделение за счет вязкой диссипации. Получены выражения для температуры и локального числа Нуссельта. Представлены результаты численного анализа решения.

В [20] модель Шведова-Бингама использована для исследования течения битумного вяжущего в цилиндрической трубе; определена зависимость расхода ЖШБ от перепада давления, получены зависимости для радиального профиля продольной скорости и эффективной вязкости течения. Авторы констатируют справедливость известного вывода: при малых числах Бингама ($Bn < 0,1$) можно использовать в расчетах модель ньютоновской жидкости.

В [21] были рассмотрены течения ЖШБ в сходящихся и расходящихся (линейно или экспоненциально) трубах. Теоретически исследовано влияние формы стенки на перепад давления и на поверхность, которая отделяет область квазитвердого течения от периферийной области. Результаты показывают, что влияние амплитуды изменения стенки значительно усиливается с увеличением объемного расхода (или создаваемой разности давлений). Показано, что разность давлений, необходимая для достижения заданного объемного расхода в сужающейся трубе, выше, чем в расширяющейся.

В [22] течение в процессе формования гипсокартона описано с помощью модели ЖШБ. Найдены предельные значения перепадов давления, при которых реализуется один из трех возможных режимов течения ЖШБ (чисто пластическое течение; пластическое и вязкое течения одновременно; неподвижность среды). Получены аналитические выражения для компонент тензора напряжений и скорости течения ЖШБ. Авторы полагают, что полученные формулы для перепада давления и объемного расхода гипсовой смеси в рамках модели ЖШБ позволят управлять процессом формования листового гипсокартона.

В [23] предпринята попытка определения закономерностей течения бетонных и растворных смесей на основе модели Шведова-Бингама с изменяющейся вязкостью при протекании ЖШБ по длинным круглым трубам, причем вязкость Бингама должна определяться экспериментально. На основе уравнения Букингема-Рейнера найдены зависимости для описания рабочего процесса подачи бетонных и растворных смесей по круглым трубам в режиме ламинарного течения. Приведены зависимости определения расхода и требуемой мощности при непрерывной подаче бетонных и растворных смесей по трубопроводу, а также при изменении давления на входе.

Задача, наиболее близкая рассматриваемой в данной статье, была решена в работах [24, 25]. Рассмотрен нестационарный слив ЖШБ из резервуара через цилиндрическую трубу под действием силы тяжести. Задача решена аналитически, получена формула для времени полного слива ЖШБ из резервуара. При решении величина радиуса квазитвердого течения ЖШБ в центральной части трубы считалась неизменной ($R_0 = \text{const}$), однако известно [18–20], что эта величина зависит от перепада давления на длине трубы. Перепад давления уменьшается по мере уменьшения глубины слоя ЖШБ в резервуаре H , поэтому полученные в [24] результаты будут справедливы в ограниченных условиях. Кроме того, авторы использовали гипотезу квазистационарного течения, не доказав ее справедливости. Приведено только размерное решение, критерии подобия задачи не определены.

В [26] задача истечения из резервуара через цилиндрическую трубу была решена численным методом в нестационарной постановке, найдены критерии подобия, но только для степенной жидкости, причем считалось, что уровень жидкости в резервуаре поддерживался постоянный.

Целью данной статьи является разработка математической модели динамики слива ЖБШ из резервуара через цилиндрическую трубу в нестационарной постановке, включая определение критериев подобия задачи и анализ их влияния на истечение (на примере рыбного жира).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим истечение РЖ из емкости 1 по трубопроводу 2 (рис. 1). Предварительно труба была заполнена продуктом. В начальный момент задвижка 3 была мгновенно открыта, и началось истечение РЖ. Как было указано выше, для описания реологических свойств РЖ можно использовать модель ЖШБ – формулу (1).

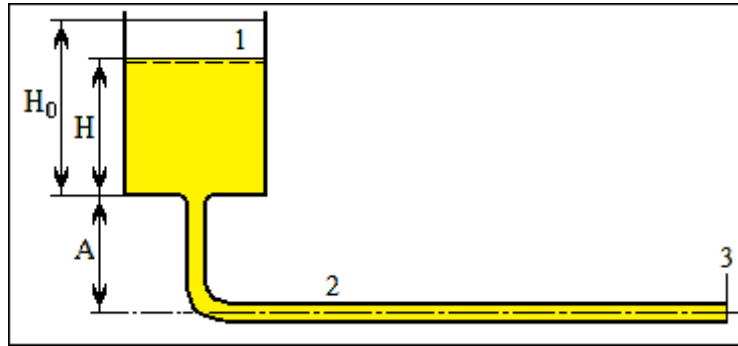


Рис. 1. Гидравлическая схема слива РЖ из резервуара:

1 – резервуар с РЖ, 2 – трубопровод, 3 – задвижка

Fig. 1. Hydraulic scheme for draining FO from the tank:

1 – tank with FO, 2 – pipeline, 3 – valve

Течение ЖШБ в круглой трубе хорошо изучено. Радиус квазитвердого течения ЖШБ в центре круглой трубы определяется по известной формуле [18–21]:

$$R_0 = 2\sigma \cdot |\Delta L / \Delta P|. \quad (2)$$

Как в [24, 25], модуль перепада давления на длине трубопровода L считаем по высоте столба жидкости:

$$|\Delta P| / \Delta L = \rho \cdot g \cdot (H + A) / L = \rho \cdot g \cdot H_0 \cdot (h + a) / L, \quad (3)$$

где H – слой жидкости в емкости, который в начальный момент времени равен H_0 , а в дальнейшем уменьшается; $h = H/H_0$, $a = A/H_0$.

Подставив (3) в (2), получим для относительной величины радиуса

$$r_0 = R_0 / R = \Theta \cdot / (h + a), \quad \Theta = 4\sigma \cdot L / (\rho \cdot g \cdot d \cdot H_0), \quad (4)$$

где $R = 0,5d$ – внутренний радиус трубы, м; Θ – безразмерный комплекс. Видно, что со снижением h в процессе слива жидкости величина r_0 будет уменьшаться.

Средняя (по расходу) скорость ЖШБ в круглой трубе определяется по известной формуле Букингема-Рейнера:

$$W = (1/32) \cdot |\Delta P / \Delta L| \cdot (d^2 / \eta) \cdot [1 - (4/3) \cdot (r_0) + (1/3) \cdot (r_0)^4]. \quad (5)$$

Если бы жидкость была ньютоновской ($\sigma = 0$), из формулы (5) с учетом (3) получается скорость при начальной глубине слоя жидкости ($H = H_0$):

$$W_M = W_{M0} (1 + a), \quad W_{M0} = (1/32) \cdot d^2 \cdot \rho \cdot g \cdot H_0 / (L \cdot \eta). \quad (6)$$

Величину W_{M0} примем в качестве характерного значения скорости, тогда из (5) и (6) следует формула для безразмерной средней скорости течения ЖШБ в цилиндрической трубе:

$$w = W / W_{M0} = [1 - (4/3) \cdot (r_0) + (1/3) \cdot (r_0)^4] \cdot (h + a). \quad (7)$$

Скорость центральной части течения ЖШБ в трубе [18, 19]:

$$U_0 = (1/16) \cdot |\Delta P / \Delta L| \cdot d^2 \cdot (1 - r_0)^2 / \eta. \quad (8)$$

Запишем (8) в безразмерной форме:

$$u_0 = U_0 / W_{M0} = 2 \cdot (1 - r_0)^2 \cdot (h + a) = 2 \cdot [1 - \Theta / (h + a)]^2 \cdot (h + a). \quad (9)$$

Безразмерная скорость в периферийной части течения ЖШБ в трубе:

$$u = U / W_{M0} = 2 \cdot [(1 - r^2) \cdot (h + a) - 2 \cdot \Theta \cdot (1 - r)], \quad (10)$$

где $r = 2R/d$ – относительный локальный радиус.

Полагаем, что на всем протяжении потока скорость движения жидкости одинакова и плавно изменяется по времени вместе с изменением глубины слоя ЖШБ в резервуаре. Тогда нестационарное уравнение Бернулли представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка [26, 27]:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dW}{dt} = (H(t) + A) - H_L(W) - \alpha \cdot \frac{W^2}{2g}, \quad W(0) = 0, \quad (11)$$

где L – общая длина трубопровода, м; g – ускорение свободного падения м/с²; $W = 4Q/(\pi d^2)$ – средняя (по расходу Q) скорость движения ЖШБ, м/с; d – внутренний диаметр трубы, м; H – уровень ЖШБ в емкости в момент времени t , м; α – коэффициент неравномерности профиля продольной скорости U (коэффициент Кориолиса); H_L – потери напора по длине трубопровода, м:

$$H_L = 0,5 \lambda L/d W^2/g, \quad (12)$$

где λ – безразмерный коэффициент потерь напора из-за трения по длине трубы.

В данной статье полагаем, что гидравлические потери в местных сопротивлениях (плавный вход в трубопровод, плавный поворот, полностью открытая задвижка) малы по сравнению с потерями по длине трубопровода, ими можно пренебречь. В противном случае можно заменить фактическую длину трубы эквивалентной длиной, учитывающей эти потери.

В [28, 29] экспериментально и теоретически было показано, что коэффициент потерь λ при течении неньютоновских жидкостей в трубопроводе можно находить по формулам ньютоновской жидкости, но вместо обычных чисел Рейнольдса следует подставлять модифицированное значение, для ЖШБ – Re_B [28]:

$$\lambda = 64/Re_B, \quad Re_B = \frac{W \cdot d \cdot \rho}{\frac{\sigma \cdot d}{8 \cdot W} + \eta \cdot \left(\frac{3m+1}{4m} \right)} = \frac{w \cdot Re_0}{\frac{\Theta}{w} + \left(\frac{3m+1}{4m} \right)}. \quad (13)$$

$$Re_0 = \frac{W_{M0} \cdot d \cdot \rho}{\eta}, \quad m = \frac{8W \cdot \eta / d}{8W \cdot \eta / d + \sigma} = \frac{1}{1 + \Theta / w}. \quad (14)$$

Кроме числа Рейнольдса Re_B , для характеристики течения ЖШБ будем использовать число Бингама Bn :

$$Bn = \frac{\sigma \cdot d}{\eta \cdot W} = \frac{8 \cdot \Theta}{w}. \quad (15)$$

Динамика уменьшения объема жидкости V в емкости описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = -Q \quad \text{или} \quad S_1 \cdot \frac{dH}{dt} = -W \cdot S_0, \quad H(0) = H_0, \quad (16)$$

где $S_0 = 0,25 \cdot \pi d^2 = \text{const}$ – площадь поперечного сечения трубопровода, м²; $S_1 = \text{const}$ – площадь поперечного сечения емкости, м².

Запишем систему дифференциальных уравнений в безразмерной форме:

$$Str \cdot \frac{dw}{d\tau} = \Psi \cdot (h + a) - \left(\alpha + \frac{64}{Re_B} \cdot l \right) \cdot w^2, \quad w(0) = 0, \quad (17)$$

$$\frac{dh}{d\tau} = -w, \quad h(0) = 1, \quad (18)$$

$$Str = \frac{2L \cdot S_0}{S_1 \cdot H_0}, \quad l = \frac{L}{d}, \quad \Psi = \frac{2g \cdot H_0}{W_{M0}^2}, \quad (19)$$

где $\tau = t/t_z$ – безразмерное время, $t_z = S_1 \cdot H_0 / (S_0 \cdot W_{M0})$, с.

В уравнении (17) необходимо определить коэффициент Кориолиса α , который в цилиндрической трубе рассчитывается по известной формуле:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \int_0^R (U(Y))^3 \cdot Y dY}{W^3 \cdot R^2} = \frac{2 \cdot \int_0^1 (u(r))^3 \cdot r dr}{w^3}, \quad (20)$$

где $R_0 = d/2$ – внутренний радиус трубы, м; R – текущий радиус, м; $U(R)$ – зависимость продольной скорости жидкости от текущего радиуса, м/с.

Квазистационарное приближение предполагает, что можно положить $Str=0$. Тогда дифференциальное уравнение (17) вырождается в равенство, из которого безразмерная средняя скорость выражается следующим образом:

$$w = \sqrt{\frac{\Psi \cdot (h + a)}{\alpha + 64 \cdot l / Re_B}}. \quad (21)$$

Заметим, что и α , и Re_B зависят от w , поэтому (20) является алгебраическим уравнением. Выражение (20) подставляется в (18). В квазистационарном приближении задача Коши включает только одно дифференциальное уравнение:

$$\frac{dh}{d\tau} = - \sqrt{\frac{\Psi \cdot (h + a)}{\alpha + 64 \cdot l / Re_B}}, \quad h(0) = 1. \quad (22)$$

Задача Коши (22), как и (17)–(18), не имеет аналитического решения. Решение было найдено численным методом с помощью специальной программы в среде Mathcad, для чего необходимо задать значения параметров, в том числе предельное касательное напряжение σ_0 и динамическую вязкость Бингама η для РЖ. Известно, что величины σ и η зависят от степени (стадии) очистки РЖ. Сырой РЖ (до очистки) обозначим РЖС, после дегуммирования – РЖГ, после нейтрализации – РЖН, после отбеливания – РЖО, после дезодорации – РЖД. В [16] экспериментально исследована вязкость РЖ сома (Catfish Oils) при температуре $T = 25^\circ\text{C}$ в различных стадиях очистки. Сдвиг скорости изменялся от нуля до 1200 c^{-1} . В табл. 1 представлены найденные в [16] реологические параметры РЖ (2-й и 3-й столбцы).

Таблица 1. Параметры модели и критерии подобия для РЖ сома

Table 1. Model parameters and similarity criteria for Catfish Oils

Стадия		σ , Па	η , Па·с	W_{M0} , м/с	Θ	Ψ	Re_0
РЖС	FOU	4,79	0,042	0,536	0,798	34,1	375
РЖГ	FOG	2,41	0,033	0,682	0,401	21,0	608
РЖН	FON	2,42	0,030	0,750	0,403	17,4	735
РЖО	FOB	2,08	0,026	0,866	0,347	13,1	978
РЖД	FOD	1,40	0,024	0,938	0,233	11,1	1149

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Постановка задачи в безразмерной форме показала, что рассматриваемая задача имеет 6 критериев подобия: Str , l , a , Ψ , Θ , Re_0 . Из них только три последних зависят от свойств РЖ. Первые 3 критерия определяются геометрическими параметрами гидравлической системы. Аналог числа Струхала представляет собой от-

ношение удвоенного объема РЖ в трубопроводе к начальному объему РЖ в резервуаре; l – отношение длины трубопровода к его внутреннему диаметру, a – отношение длины вертикальной части трубопровода к начальной глубине РЖ в резервуаре.

По формулам (13), (15) видно, что обычно применяемые для характеристики течения числа Рейнольдса Re_v и Бингама Bn изменяются в процессе слива РЖ из резервуара.

При полном освобождении резервуара ($h = 0$) из условия течения ЖШБ в трубе ($r_0 \leq 1$) следует условие, которому должна удовлетворять длина вертикального участка трубы: $a \geq \Theta$. В противном случае снижение уровня ЖШБ произойдет лишь до уровня $h = \Theta - a$ и прекратится.

По формуле (4) безразмерный радиус квазитвердого течения в центре трубы (БРЦТ) r_0 прямо пропорционален критерию подобия Θ и растет с уменьшением безразмерной глубины слоя в резервуаре h , что иллюстрируется рис. 2. Если $a = 0,25$, то при уменьшении h от 1 до 0 величина r_0 возрастает в 5 раз; если $a = 0,8$ – в 2,25 раза. Чтобы это увеличение составило 10 % и менее, должно выполняться условие $a > 10$. Следовательно, предположение [24] о постоянстве r_0 справедливо только при достаточно большой длине вертикальной части трубопровода.

На рис. 3 представлены результаты расчета безразмерной скорости квазитвердого течения в центре трубы (БСЦТ) u_0 по формуле (9). Величины $u_0 > 1$ объясняются тем, что в качестве характерной скорости выбрано значение W_{M0} (при $a=0$). Чем больше слой ЖШБ в резервуаре или длина вертикальной части трубопровода, тем больше перепад давления в формуле (8). Соответственно, возрастает u_0 на рис. 3. Рост значения Θ приводит к уменьшению БСЦТ, это происходит, в частности, при увеличении общей длины трубопровода, значит, уменьшении $|\Delta P / \Delta L|$. На рис. 3а при $\Theta=0,07$ полное освобождение резервуара приводит к уменьшению БСЦТ с $u_0 = 2,73$ до $u_0 = 0,74$ (в 3,7 раза), тогда как при $\Theta=0,5$ – с 1,92 до 0,16 (в 12 раз). На рис. 3б при $a=0,5$ полное освобождение резервуара приводит к уменьшению БСЦТ с $u_0 = 2,25$ до $u_0 = 0,36$ (примерно в 6,3 раза), тогда как при $a=0,9$ – с 3,04 до 1,09 (в 2,8 раза).

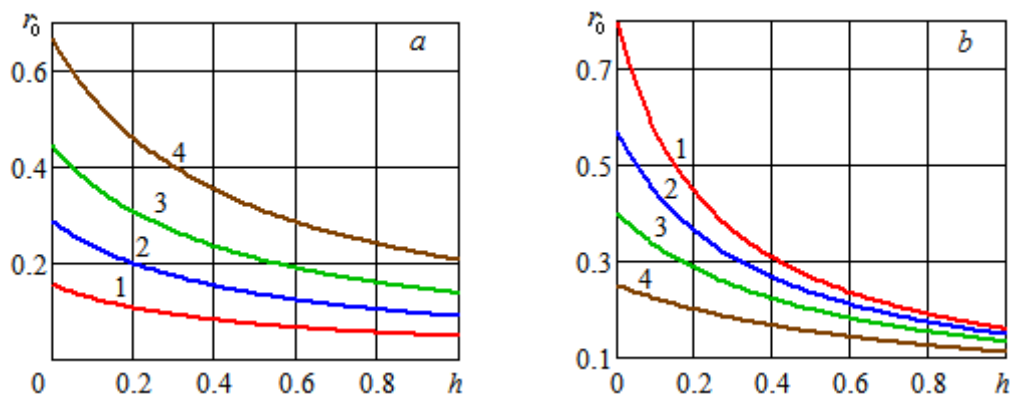


Рис. 2. Зависимость БРЦТ от относительной глубины слоя ЖШБ:
а – при $a = 0,45$ и различных Θ : 1 – $\Theta=0,07$; 2 – $\Theta=0,13$; 3 – $\Theta=0,2$; 4 – $\Theta=0,3$;
б – при $\Theta=0,2$ и различных a : 1 – $a=0,25$; 2 – $a=0,35$; 3 – $a=0,5$; 4 – $a=0,8$
Fig. 2. Dependence of DRCP on the relative depth of the SBL layer:
а – when $a = 0.45$ and various Θ : 1 – $\Theta=0.07$; 2 – $\Theta=0.13$; 3 – $\Theta=0.2$; 4 – $\Theta=0.3$;
б – when $\Theta=0.2$ and different a : 1 – $a=0.25$; 2 – $a=0.35$; 3 – $a=0.5$; 4 – $a=0.8$

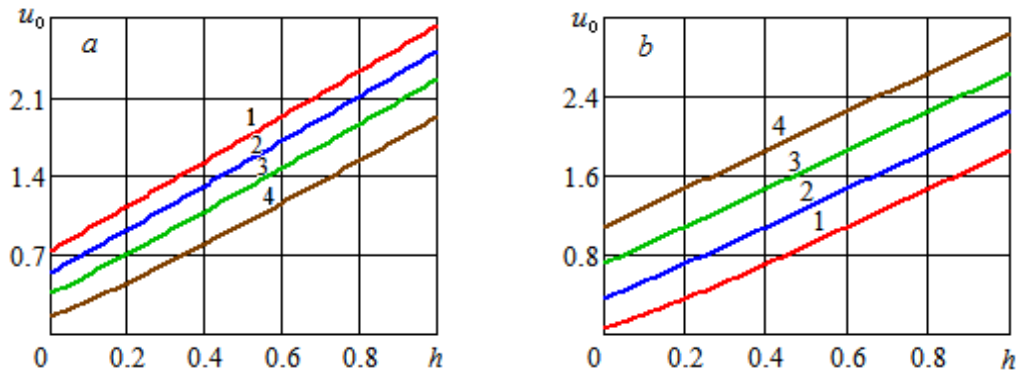


Рис. 3. Зависимость БСЦТ от относительной глубины слоя ЖШБ:
а – при $a = 0,5$ и различных Θ : 1 – $\Theta=0,07$; 2 – $\Theta=0,13$; 3 – $\Theta=0,2$; 4 – $\Theta=0,3$;
б – при $\Theta=0,2$ и различных a : 1 – $a = 0,3$; 2 – $a = 0,5$; 3 – $a = 0,7$; 4 – $a = 0,9$
Fig. 3. Dependence of DSCP on the relative depth of the SBL layer:
а – when $a = 0.5$ and different Θ : 1 – $\Theta=0.07$; 2 – $\Theta=0.13$; 3 – $\Theta=0.2$; 4 – $\Theta=0.3$;
б – when $\Theta=0.2$ and different a : 1 – $a = 0.3$; 2 – $a = 0.5$; 3 – $a = 0.7$; 4 – $a = 0.9$

На рис. 4 показаны профили безразмерной продольной скорости течения ЖШБ в цилиндрической трубе, рассчитанные при разных значениях a и Θ . С увеличением a и уменьшением Θ происходит снижение БРЦТ и возрастание БСЦТ. При $\Theta=0$ получится параболический профиль скорости ньютоновской жидкости.

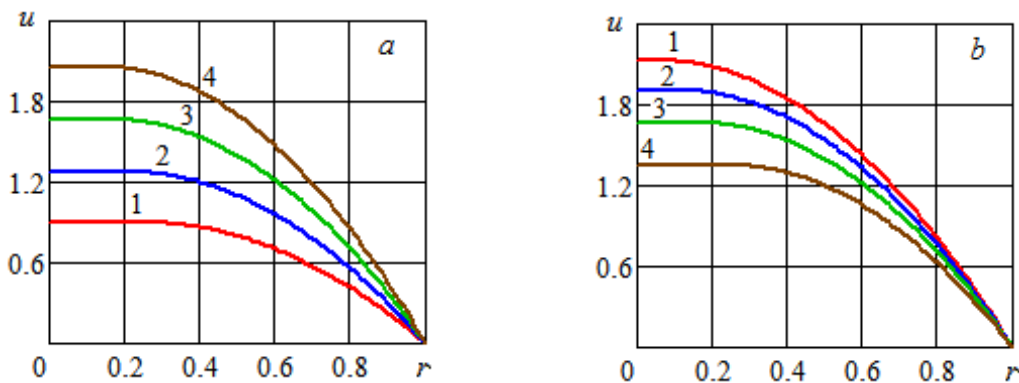


Рис. 4. Профили безразмерной продольной скорости ЖШБ в трубе:
а – при $h=0,5$, $\Theta=0,2$, и разных a : 1 – $a=0,3$; 2 – $a=0,5$; 3 – $a=0,7$; 4 – $a=0,9$;
б – при $h=0,5$, $a=0,4$ и разных Θ : 1 – $\Theta=0,07$; 2 – $\Theta=0,13$; 3 – $\Theta=0,2$; 4 – $\Theta=0,3$
Fig. 4. Profiles of the dimensionless longitudinal velocity SBL in the pipe:
а – at $h=0.5$, $\Theta=0.2$, and different a : 1 – $a=0.3$; 2 – $a=0.5$; 3 – $a=0.7$; 4 – $a=0.9$;
б – at $h=0.5$, $a=0.4$ and different Θ : 1 – $\Theta=0.07$; 2 – $\Theta=0.13$; 3 – $\Theta=0.2$; 4 – $\Theta=0.3$

На рис. 5 представлена рассчитанная по формуле (7) зависимость безразмерной средней скорости w от относительной глубины при разных значениях a и Θ . Чем больше h и a , тем больше располагаемый напор, поэтому и w будет больше. Увеличение же Θ , в том числе из-за повышения σ_0 , ведет к возрастанию потерь энергии и снижению средней скорости. На рис. 5а при $\Theta=0,05$ полное освобождение резервуара приводит к уменьшению w с 1,33 до 0,33 (в 4 раза), тогда как при

$\Theta = 0,4$ – с 1,12 до 0,13 (в 8,7 раз). На рис. 5b при $a = 0,5$ полное освобождение резервуара приводит к уменьшению w с 1,167 до 0,177 (в 6,6 раз), тогда как при $a = 0,9$ – с 1,57 до 0,57 (примерно в 2,8 раза).

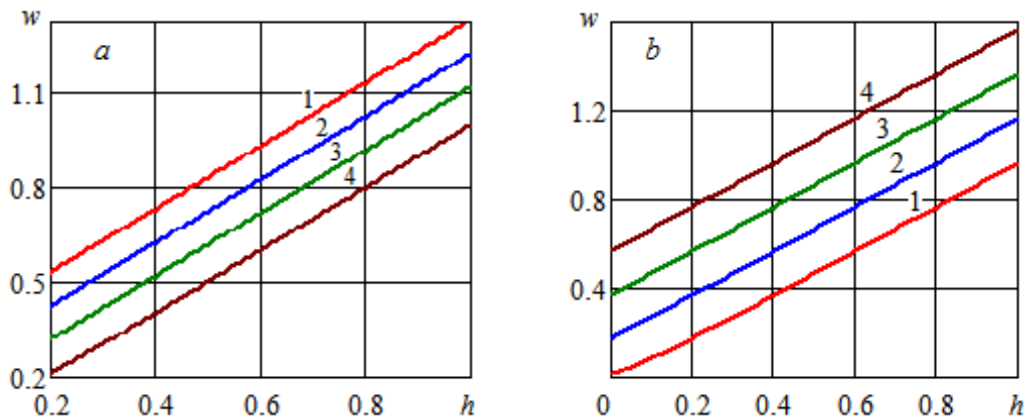


Рис. 5. Зависимость безразмерной средней скорости от относительной глубины:
 а – при $a=0,45$ и разных Θ : 1 – $\Theta=0,05$; 2 – $\Theta=0,13$; 3 – $\Theta=0,2$; 4 – $\Theta=0,3$;
 б – при $\Theta=0,25$ и разных a : 1 – $a=0,3$; 2 – $a=0,5$; 3 – $a=0,7$; 4 – $a=0,9$
 Fig. 5. Dependence of the dimensionless average speed on the relative depth:
 а – at $a=0.45$ and different Θ : 1 – $\Theta=0.05$; 2 – $\Theta=0.13$; 3 – $\Theta=0.2$; 4 – $\Theta=0.3$;
 б – at $\Theta=0.25$ and different a : 1 – $a=0.3$; 2 – $a=0.5$; 3 – $a=0.7$; 4 – $a=0.9$

На рис. 6 представлена рассчитанная по формуле (14) зависимость безразмерной величины m от относительной глубины при разных значениях a и Θ . Увеличение h и a ведет к росту m , а Θ – к снижению. Значение m при $\Theta=0,2$, $a=0,25$, $h=0$ равно всего 0,08; тогда как при $\Theta=0,05$, $a=1,5$, $h=1$ близко к единице ($m=0,98$).

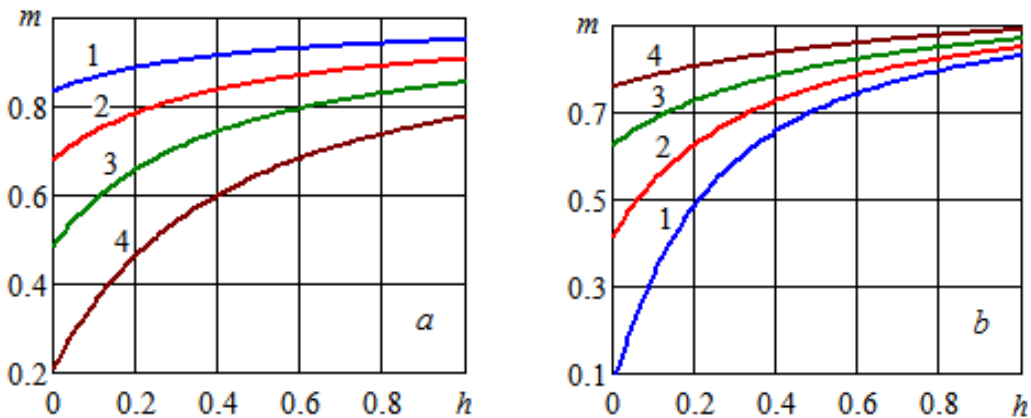


Рис. 6. Зависимость показателя m от относительной глубины слоя:
 а – при $a=0,45$ и разных Θ : 1 – $\Theta=0,07$; 2 – $\Theta=0,13$; 3 – $\Theta=0,2$; 4 – $\Theta=0,3$;
 б – при $\Theta=0,2$ и разных a : 1 – $a=0,25$; 2 – $a=0,4$; 3 – $a=0,6$; 4 – $a=0,9$
 Fig. 6. Dependence of m index on the relative depth of the layer:
 а – at $a=0.45$ and different Θ : 1 – $\Theta=0.07$; 2 – $\Theta=0.13$; 3 – $\Theta=0.2$; 4 – $\Theta=0.3$;
 б – at $\Theta=0.2$ and different a : 1 – $a=0.25$; 2 – $a=0.4$; 3 – $a=0.6$; 4 – $a=0.9$

На рис. 7 представлена рассчитанная по формуле (14) зависимость коэффициента Кориолиса от относительной глубины при разных значениях a и Θ .

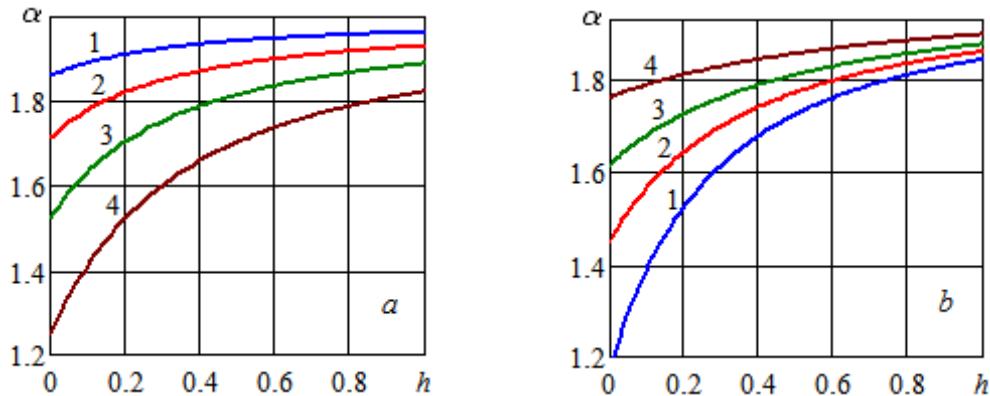


Рис. 7. Зависимость коэффициента Кориолиса от относительной глубины слоя:
 a – при $a=0,4$ и разных Θ : 1 – $\Theta=0,07$; 2 – $\Theta=0,13$; 3 – $\Theta=0,2$; 4 – $\Theta=0,3$;

b – при $\Theta=0,25$ и разных a : 1 – $a=0,3$; 2 – $a=0,45$; 3 – $a=0,6$; 4 – $a=0,9$

Fig. 7. Dependence of the Coriolis coefficient on the relative depth of the layer:

a – at $a=0.4$ and different Θ : 1 – $\Theta=0.07$; 2 – $\Theta=0.13$; 3 – $\Theta=0.2$; 4 – $\Theta=0.3$;

b – at $\Theta=0.25$ and different a : 1 – $a=0.3$; 2 – $a=0.45$; 3 – $a=0.6$; 4 – $a=0.9$

Как было указано выше, увеличение h и a (или уменьшение Θ) ведет к росту u_0 и снижению r_0 ; в результате профиль продольной скорости стремится к параболической форме, $\alpha \rightarrow 2$ (рис. 4). При уменьшении h и a (увеличении Θ) $\alpha \rightarrow 1$. Так $\alpha=1,99$ при $\Theta=0,05$, $a=2,4$, $h=1$; $\alpha=1,16$ при $\Theta=0,25$, $a=0,3$, $h=0$.

На рис. 8 и 9 представлены результаты решения численным методом задачи Коши (17)–(18) при следующих значениях критериев подобия $a=0,5$; $\Psi=6$; $l=50$; $Re_0=160$; $\Theta=0,3$ и различных величинах Str .

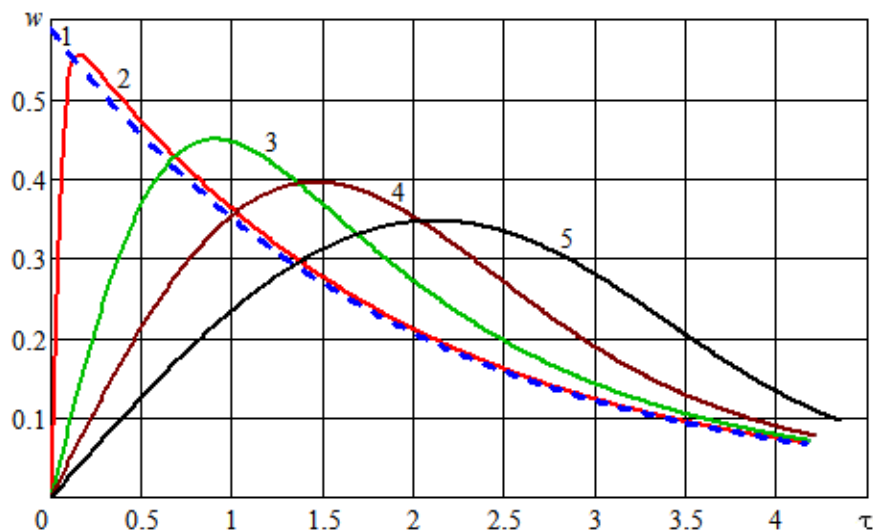


Рис. 8. Динамика средней скорости течения ЖШБ в трубе при разных значениях Str : 1 – $Str=0$, 2 – $Str=1$, 3 – $Str=10$; 4 – $Str=20$, 5 – $Str=35$

Fig. 8. Dynamics of the average velocity of the SBL flow in the pipe at different values Str : 1 – $Str=0$, 2 – $Str=1$, 3 – $Str=10$; 4 – $Str=20$, 5 – $Str=35$

Штриховыми линиями 1 показан результат решения задачи в квазистационарном приближении (22). Видно, что отличие штриховых линий на рис. 8 и 9 от линий 1 ($Str=0$) мало. Следовательно, если $Str \approx 1$ и менее, то задачу можно решать в квазистационарном приближении. Качественно этот результат согласуется с выводом [27], сделанным при анализе нестационарной математической модели простой гидравлической сети с центробежным насосом. Однако в [27] условие применения квазистационарного приближения было получено более жестким $Str \leq 0,1$.

Увеличение Str говорит о возрастании инерционности гидравлической системы. Больше времени τ_m затрачивается на увеличение скорости течения до максимума, а значения максимума w_m снижаются: $\tau_m=0,16$, $w_m=0,55$ при $Str=1$; $\tau_m=0,90$, $w_m=0,45$ при $Str=10$; $\tau_m=1,47$, $w_m=0,39$ при $Str=20$; $\tau_m=2,12$, $w_m=0,35$ при $Str=35$. Динамика снижения уровня ЖШБ в резервуаре также сильно зависит от Str .

На рис. 9, если $\tau=2$, то при $Str=1$ глубина слоя $h=0,27$, при $Str=10$ – $h=0,32$, при $Str=20$ – $h=0,42$, при $Str=35$ – $h=0,57$. Однако в указанных условиях продолжительность полного слива ЖШБ из резервуара τ_E отличается незначительно: $\tau_E=4,19$ при $Str=1$; $\tau_E=4,37$ при $Str=35$ (увеличение всего на 4,4 %).

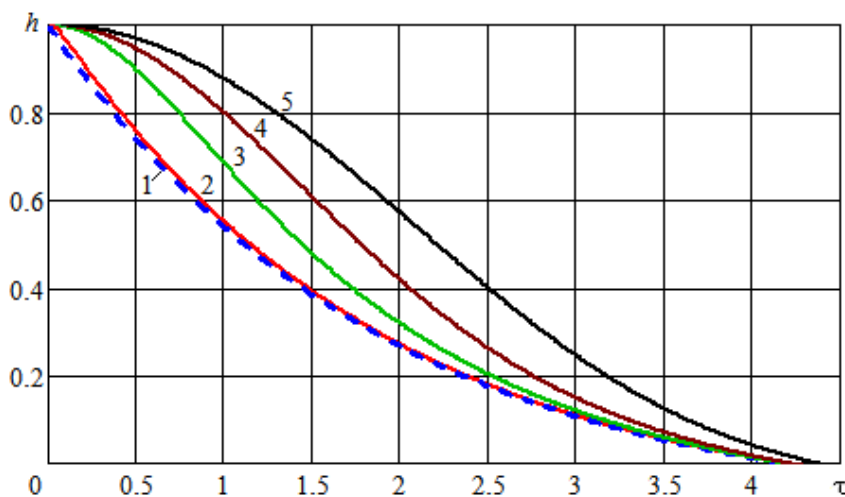


Рис. 9. Динамика уровня ЖШБ в резервуаре. Условия и обозначения, как на рис. 8
Fig. 9. Dynamics of the SBL level in the reservoir. Terms and designations, as shown in Fig. 8

На рис. 10, 11 представлены результаты решения квазистационарной задачи Коши (22) численным методом при $a=0,4$; $\Psi=6$; $l=50$; $Re_0=160$ и разных значениях Ψ . Согласно (19), критерий Ψ характеризует отношение сил тяжести к силам инерции. По рис. 10 начальная средняя скорость заметно увеличивается с ростом Ψ . Так, $w(0)=0,35$ при $\Psi=2$; $w(0)=0,49$ при $\Psi=4$; $w(0)=0,69$ при $\Psi=8$; $w(0)=0,98$ при $\Psi=16$. При этом безразмерное время полного слива ЖШБ из резервуара τ_E по рис. 11 уменьшается и составляет, соответственно, 6,71; 4,74; 3,36; 2,37.

Далее рассмотрим пример расчета, когда бингамовской жидкостью является РЖ при следующих размерных параметрах: $L=6$ м, $d=3$ см, $H_0=50$ см, $S_1=0,06$ м². Значения критериев подобия, не зависящих от свойств РЖ: $l=200$, $Str=0,283 < 1$, поэтому задачу можно решать в квазистационарном приближении. Величина $a=A/H_0$ будет варьировать.

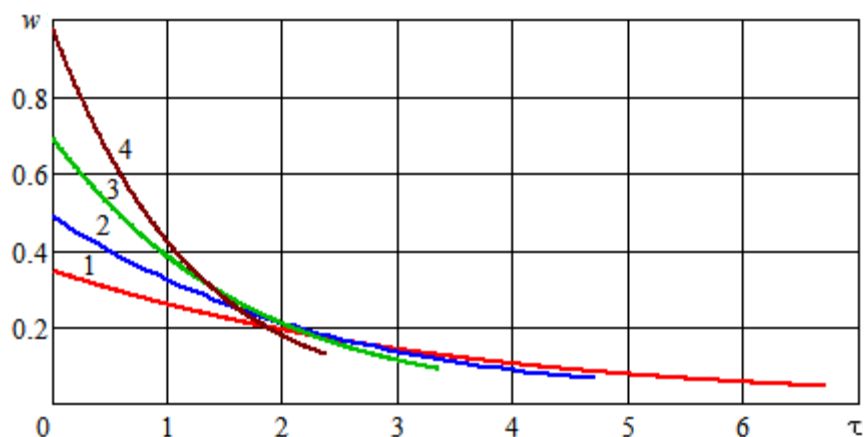


Рис. 10. Динамика средней скорости ЖШБ в трубе ($Str=0$) при разных значениях Ψ : 1 – $\Psi=2$, 2 – $\Psi=4$, 3 – $\Psi=8$, 4 – $\Psi=16$

Fig. 10. Dynamics of the SBL average velocity in the pipe ($Str=0$) at different values Ψ : 1 – $\Psi=2$, 2 – $\Psi=4$, 3 – $\Psi=8$, 4 – $\Psi=16$

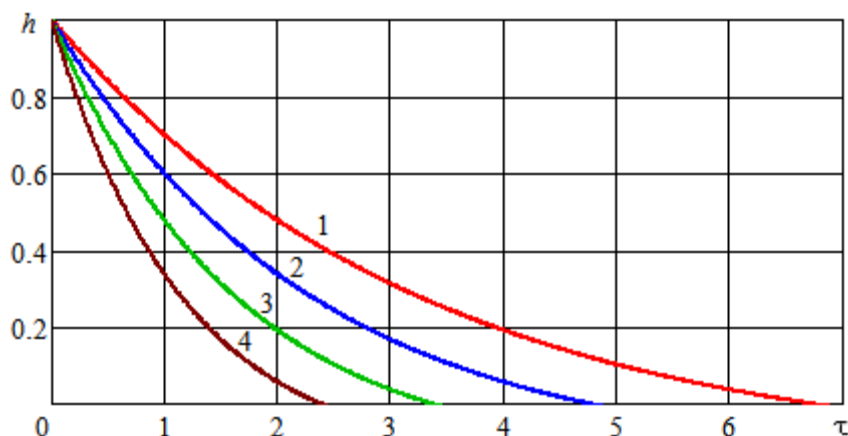


Рис. 11. Динамика уровня ЖШБ в резервуаре. Условия и обозначения, как на рис. 10

Fig. 11. Dynamics of the SBL level in the reservoir. Terms and designations, as shown in Fig. 10

Значения характерной скорости W_{M0} и критериев подобия Θ , Ψ и Re_0 зависят от реологических свойств РЖ. Они были рассчитаны по значениям η и σ для каждой стадии очистки РЖ и внесены в табл. 1 (столбцы 4–7). Из таблицы следует заметное различие значений указанных критериев подобия для стадий очистки. Исключение составляют лишь значения Θ у РЖГ и РЖН. Уменьшение Θ у РЖД по сравнению с РЖС составило 71 %, Ψ – 67,5 %, а вот значение Re_0 увеличилось примерно в 3 раза.

На рис. 12 показаны рассчитанные по формуле (4) зависимости БРЦТ r_0 от безразмерной глубины слоя РЖ в резервуаре h . Вид рис. 12 аналогичен рис. 2. Особенностью является то, что с каждой стадией очистки БРЦТ становится меньше, так как сказывается снижение значений η и σ , причем кривая 1 на рис. 12а, соответствующая РЖС, проходит заметно выше остальных.

Рис. 12b построен для РЖС при различных значениях a . По табл. 1 у РЖС $\Theta=0,798$; при значениях a меньших $0,798$ из резервуара может вытечь только часть РЖС. По рис. 12b это происходит до достижения $r_0 = 1$ (линии 1, 2, и 3). Для линий 4 и 5 условие $a > \Theta$ выполняется, поэтому резервуар освобождается полностью.

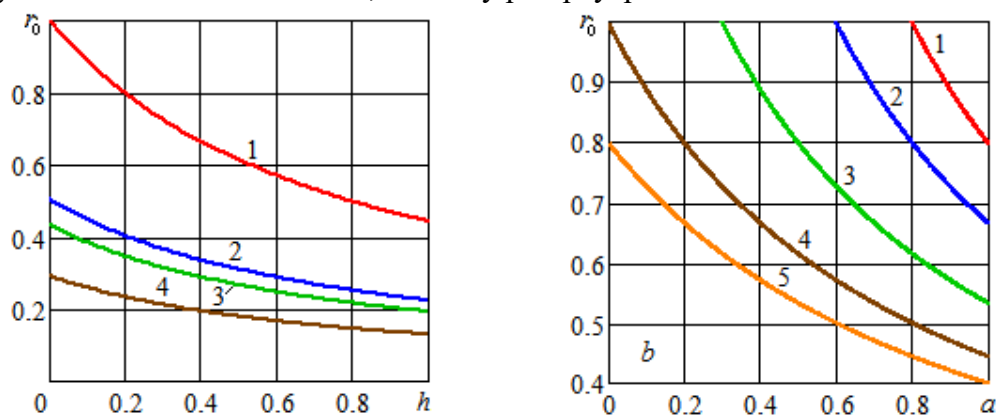


Рис. 12. Изменение БРЦТ течений РЖ; a – зависимость от h при $a = 0,8$: 1 – РЖС, 2 – РЖН, 3 – РЖО, 4 – РЖД; b – зависимость от h для РЖС при различных a : 1 – $a=0$; 2 – $a=0,2$; 3 – $a=0,5$; 4 – $a=0,8$; 5 – $a=1$

Fig. 12. DRCP change in the FO flows; a – dependence on h at $a = 0.8$: 1 – FOU, 2 – FON, 3 – FOB, 4 – FOD; b – dependence on h for FOU at different a : 1 – $a=0$; 2 – $a=0.2$; 3 – $a=0.5$; 4 – $a=0.8$; 5 – $a=1$

На рис. 13–16 представлены результаты расчета (в квазистационарном приближении) динамики слива РЖ из резервуара.

По рис. 13a истечение РЖС (линия 1) происходит значительно медленнее, чем других образцов РЖ. При $a=1$ полное освобождение резервуара с РЖС происходит за 4,3 мин, с РЖД – всего за 43 с. По рис. 13b безразмерная средняя скорость течения в трубе РЖС при полном резервуаре 0,95 (0,51 м/с), тогда как РЖД – 1,52 (1,43 м/с). Причина в том, что при течении РЖС из-за больших гидравлических потерь меньше потенциальной энергии столба жидкости идет на сообщение ей кинетической энергии по сравнению с другими образцами РЖ.

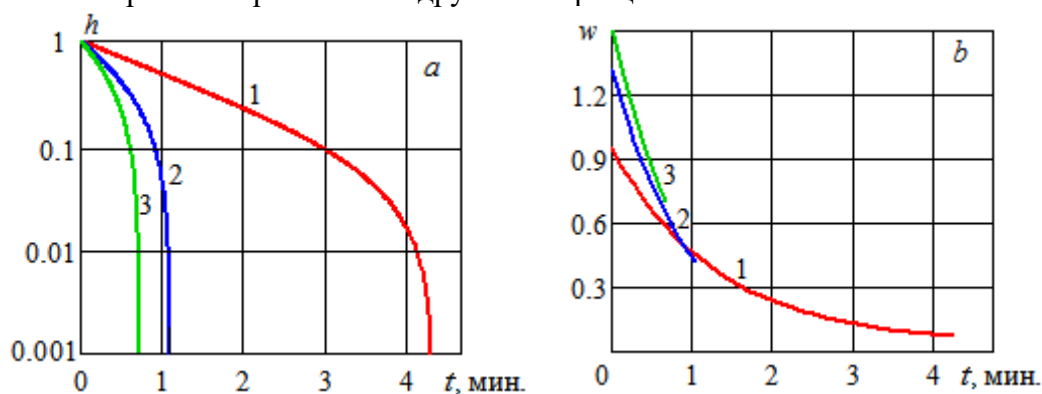


Рис. 13. Динамика слива РЖ из резервуара при $a=1$: a – безразмерный слой РЖ в резервуаре; b – безразмерная средняя скорость в трубе: 1 – РЖС, 2 – РЖН, 3 – РЖД

Fig. 13. Dynamics of the FO discharge from the tank at $a=1$:
 a – dimensionless layer of FO in the tank; b – dimensionless average velocity in the pipe: 1 – FOU, 2 – FON, 3 – FOD

По рис. 14а число Бингама течения в трубе РЖС в начальный момент равно 6,7, а в конечный – 89,7 (не показано на графике), тогда как РЖД, соответственно, 1,11 и 2,70. Значения $Bn > 1$ говорят о том, что для указанных течений нельзя использовать реологическую модель ньютоновской жидкости. По рис. 14b модифицированное число Рейнольдса течения в трубе РЖС в начальный момент равно 175, а в конечный всего 1,8, тогда как РЖД, соответственно, 1655 и 577. Значения $Re_B < 2000$ свидетельствуют, что течение происходит в ламинарном режиме при рассмотренном диапазоне параметров.

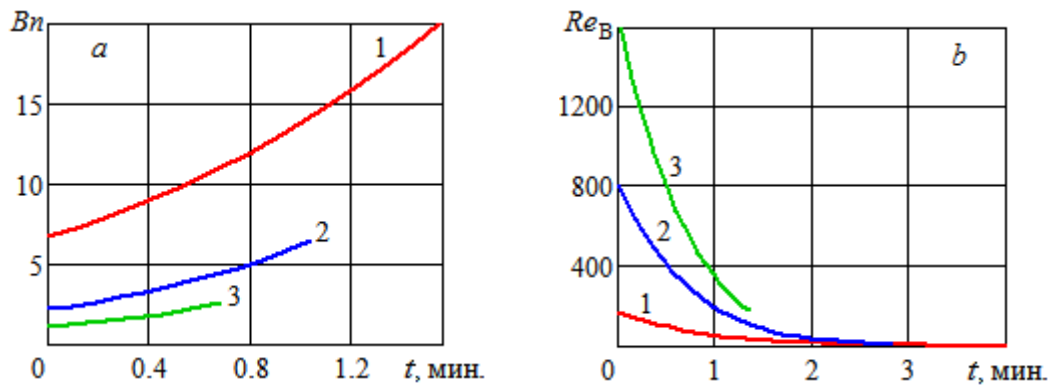


Рис. 14. Изменение чисел Бингама (a) и Рейнольдса (b) в процессе слива РЖ из резервуара при $a = 1$: 1 – РЖС, 2 – РЖН, 3 – РЖД

Fig. 14. Changing in the Bingham (a) and Reynolds (b) numbers during the FO discharge from the tank at $a = 1$: 1 – FOU, 2 – FON, 3 – FOD

По рис. 15а значение m течения в трубе РЖС в начальный момент равно 0,544, а в конечный снижается до 0,082; РЖД – с 0,879 до 0,747. По рис. 15b коэффициент Кориолиса течения в трубе РЖС в начальный момент равен 1,634, а в конечный снижается до 1,198; РЖД – с 1,911 до 1,806. Значения $m < 1$ и $\alpha < 2$ подтверждают необходимость использования в расчетах модель ЖШБ, но у течения РЖД значения m довольно близки к единице, а α – к двум. Поэтому применение реологической модели ньютоновской жидкости для РЖД приведет не к такой большой погрешности, как для РЖС.

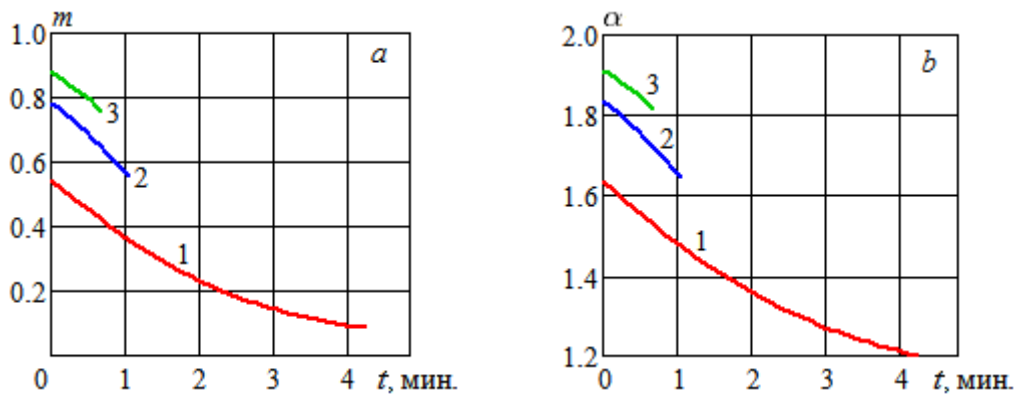


Рис. 15. Изменение значений m (a) и α (b) в процессе слива РЖ из резервуара при $a = 1$: 1 – РЖС, 2 – РЖН, 3 – РЖД

Fig. 15. Changing values of m (a) and α (b) numbers during the FO discharge from the tank at $a = 1$: 1 – FOU, 2 – FON, 3 – FOD

Зависимость времени полного освобождения резервуара t_E от a для трех образцов РЖ показана на рис. 16. Напомним, что величина a не должна быть меньше соответствующего значения Θ . Приближение a к этому значению приводит к резкому увеличению t_E . Каждая последующая стадия очистки влечет уменьшение t_E , но при прочих равных условиях величина t_E у РЖС заметно больше, чем у других образцов РЖ.

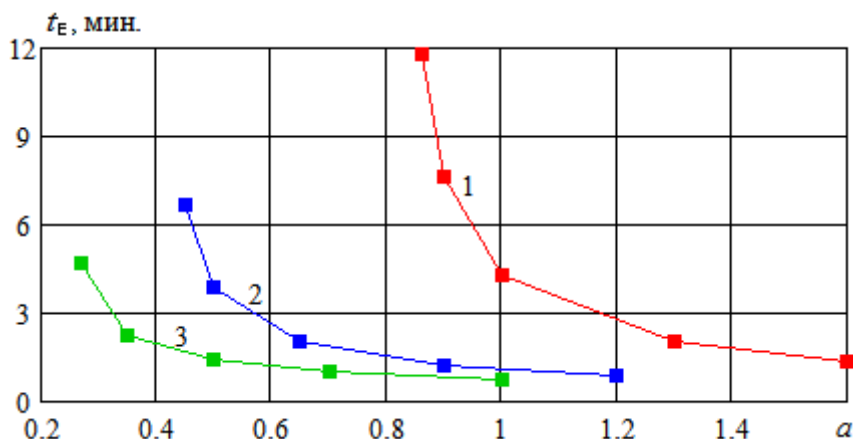


Рис. 16. Зависимость времени полного слива РЖ от a : 1 – РЖС, 2 – РЖН, 3 – РЖД
Fig. 16. Dependence of the time of complete FO discharge on a : 1 – FOU, 2 – FON, 3 – FOD

В табл. 2 представлены результаты расчета слива РЖС для пяти значений a . При увеличении значения a с 0,86 до 1,6 время полного опорожнения резервуара снижается с 11,77 до 1,36 мин. При полном резервуаре ($t=0$) средняя скорость возрастает с 0,440 до 0,818 м/с, Re_B – со 138 до 353, число Бингама уменьшается с 7,81 до 4,14, коэффициент Кориолиса – с 1,60 до 1,73. Эти изменения объясняются увеличением потенциальной энергии столба жидкости с возрастанием вертикального участка трубопровода.

Таблица 2. Результаты расчета истечения РЖС при изменении a
Table 2. Results of calculating the expiration of the FOU when changing a

a	t_E , мин.	$W(0)$, м/с	$W(t_E)$, м/с	$Bn(0)$	$\alpha(0)$	$Re_B(0)$
0,86	11,77	0,440	0,004	7,81	1,60	138
0,9	7,65	0,461	0,011	7,46	1,61	148
1,0	4,31	0,511	0,037	6,70	1,63	175
1,3	2,02	0,665	0,160	5,12	1,69	260
1,6	1,36	0,818	0,307	4,14	1,73	353

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, цель исследования достигнута, разработана математическая модель динамики слива ЖШБ из резервуара через цилиндрическую трубу в нестационарной постановке. Сформулированная система двух дифференциальных уравнений позволила определить 6 критериев подобия поставленной задачи Коши: Str , l , a , Ψ , Θ , Re_0 . Первые 3 критерия определяются геометрическими параметрами гидравлической системы, три последних зависят от реологических свойств ЖШБ.

Особенность задачи заключается в снижении перепада давления по мере уменьшения глубины слоя ЖШБ в резервуаре. Из-за указанного явления характеристики квазитвердого движения ЖШБ (r_0 , u_0 , w , α и др.) зависят от значений критериев подобия a , Θ и текущего значения h . Показано, что для полного слива ЖШБ из резервуара должно выполняться условие $a \geq \Theta$, в противном случае истечение прекратится при уменьшении относительной глубины до значения $h = \Theta - a$.

Задача Коши была решена численным методом. Результаты численного анализа показали, чем больше значение аналога числа Струхала Str , тем меньшая скорость течения в трубе w может быть достигнута и больше время ее достижения. При $Str < 1$ задачу можно решать в квазистационарном приближении, в каждый момент времени рассчитывать w по текущему значению h , как в стационарном течении.

В качестве примера была решена задача динамики слива образцов РЖ сома из резервуара после разных стадий обработки (очистки). Величина реологических параметров РЖ σ и η уменьшается при очистке, поэтому значения критериев подобия Ψ , Θ , Re_0 изменяются. Установлено, что время полного слива РЖ из резервуара t_E уменьшается по стадиям очистки, причем для РЖС это время значительно больше, чем у других образцов РЖ. Во всех исследованных условиях число Бингама оставалось больше единицы, что говорит о невозможности использования реологической модели ньютоновской жидкости. Рассчитанные значения модифицированного числа Рейнольдса подтвердили ламинарный режим течения РЖ в трубе.

Список источников

1. Махутова, О. Н. Незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты в физиологии и метаболизме рыб и человека: значение, потребности, источники / О. Н. Махутова, М. И. Гладышев. – DOI: 10.31857/S0869813920050040 // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова. – 2020. – Т. 106, № 5. – С. 601–621.
2. Advances in therapeutic applications of fish oil: A review / P. Das, A. Dutta, T. Panchali [et al.]. – DOI: 10.1016/j.meaf.2024.100142 // Measurement: Food. – 2024. – Vol. 13. – Paper ID 100142.
3. A sustainable source of freshwater fish oil: Nutritional and functional insights through lipidomics and metabolomics / P. W. Harlina, A. Y. Nasution, I. Musfiroh [et al.]. – DOI: 10.1016/j.lwt.2026.119046 // LWT – Food Science and Technology. – 2026. – Vol. 241. – Paper ID 119046.
4. Высокотехнологичные приемы переработки рыбного сырья, выращенного в Астраханской области / С. В. Золотокопова, Г. И. Касьянов, Е. Ю. Лебедева, А. Р. Айналиева. – DOI: 10.24143/2073-5529-2021-4-134-144 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2021. – № 4. – С. 134–144.
5. Current trends in production and processing of fish oil & its chemical analytical technologies: An overview / S. C. Vaska, P. Muralakar, H. Arunkumar [et al.]. – DOI: 10.48047/ecb/2023.12.si5a.049 // European Chemical Bulletin. – 2023. – Vol. 12. – P. 1705–1725.

6. Исследования по оптимизации ферментативного процесса выделения жира из вторичного рыбного сырья для использования в биотехнологии / О. Я. Мезенова, С. В. Агафонова, Н. Ю. Романенко [и др.]. – DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-43-55 // Вестник Международной академии холода. – 2024. – № 3. – С. 43–55.
7. Сравнительная оценка способов извлечения из вторичного рыбного сырья жира, предназначенного для синтеза продуктов биотехнологии / О. Я. Мезенова, С. В. Агафонова, Н. Ю. Романенко [и др.]. – DOI: 10.48612/dalrybvtuz/2025-71-07 // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2025. – Т. 71, № 1. – С. 59–71.
8. Харитонов, Е. Л. Кормовые и метаболические факторы формирования жирнокислотного состава молока у коров / Е. Л. Харитонов, Д. Е. Панюшкин // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2016. – № 2. – С. 76–106.
9. Malaweera, B. O. Use of seafood processing by-products in the animal feed industry / B. O. Malaweera, W. M. N. M. Wijesundara // Seafood Processing By-Products. Edit. S.K. Kim. – New York: Springer, 2014. – P. 315–339. – ISBN-13978-1461495895.
10. Optimizing omega-3 polyunsaturated fatty acids for healthy ageing: Human intake evidence and dairy cow dietary interventions for milk enrichment / M. Dimopoulou, P. Madesis, A. Dimopoulou, O. Gortzi. – DOI: 10.3390/foods15061079 // Foods. – 2026. – Vol. 15, № 6. – Piper ID 1079.
11. Технология жиров из биологических ресурсов: моногр. / Н. П. Боева, О. В. Бредихина, М. С. Петрова, Ю. А. Баскакова. – Москва: Изд-во ВНИРО, 2016. – 107 с. – ISBN 978-5-85382-475-1.
12. Разработка технологии переработки жировых отходов в продукты технического назначения / С. М. Гайдар, А. М. Пикина, О. М. Лапсарь, И. Г. Голубев. – DOI: 10.33267/2072-9642-2023-3-32-35 // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 3 (309). – С. 32–35.
13. Петров, Б. Ф. Экологические аспекты производства рыбного жира в России / Б. Ф. Петров. – DOI: 10.36038/0131-6184-2024-1-114-121 // Рыбное хозяйство. – 2024. – № 1. – С. 114–121.
14. Akhmedova, N. R. Influence of liquid food products viscosity on lobe pump performance (case of pumping fish oil) / N. R. Akhmedova, O. I. Levicheva, V. A. Naumov. – DOI: 10.24143/2073-5529-2022-3-74-81 // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. – 2022. – № 3. – P. 74–81.
15. Velikanov, N. L. Transportation of fish oil through a pipeline by a single-screw pump / N. L. Velikanov, V. A. Naumov. – DOI: 10.24143/2073-5529-2024-3-95-101 // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry. – 2024. – № 3. – P. 95–101.
16. Effects of purification process on rheological properties of Catfish oil / S. Sathivel, W. Prinyawiwatkul, I. I. Negulescu [et al.]. – DOI: 10.1007/s11746-003-0780-3 // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2003. – Vol. 80, № 8. – P. 829–832.
17. Comparisons of chemical and physical properties of Catfish oils prepared from different extracting processes / S. Sathivel, H. Yin, W. Prinyawiwatkul, J. M. King. – DOI: 10.1111/J.1750-3841.2009.01050.X // Journal of Food Science. – 2009. – Vol. 74, № 2. – P. E70–E76.

18. Гноевой, А. В. Основы теории течений бингамовских сред: моногр. / А. В. Гноевой, Д. М. Климов, В. М. Чесноков. – Москва: Физматлит, 2004. – 272 с. – ISBN: 5-9221-0566-3.
19. Шаповалов, В. М. Задача Гретца-Нуссельта для жидкости Бингама / В. М. Шаповалов. – DOI: 10.1134/S0040364419030165 // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 3. – С. 446–452.
20. Исследование установившегося течения вязкопластического битумного вяжущего, описываемого моделью Шведова–Бингама, в цилиндрической трубе / О. В. Матвиенко, В. П. Базуев, Н. Р. Сабылина [и др.]. – DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-158-177 // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 158–177.
21. Fusi, L. Flow of a Bingham fluid in a pipe of variable radius / L. Fusi, K. D. Housiadas, G. C. Georgiou. – DOI: 10.1016/j.jnnfm.2020.104393 // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2020. – Vol. 285, № 2. – Paper ID 104393.
22. Кумицкий, Б. М. Реологическая модель процесса формования листового гипсокартона / Б. М. Кумицкий, Е. С. Аралов, С. Г. Тульская. – DOI: 10.36622/VSTU.2022.67.3.006 // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2022. – № 3 (67). – С. 61–70.
23. Modeling the flow of a Bingham plastic fluid through a circular pipeline with different wall properties / A. Zadorozhnyi, Y. Chovnyuk, O. Stakhovsky [et al.]. – DOI: 10.1063/5.0124547 // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2490. – Paper ID 050028.
24. Exact solution of tank drainage for Bingham fluid flow circular tube / G. M. Oghai, M. Kamran, S. F. Shah, A. A. Amur. – DOI: 10.21015/vtm.v12i1.1737 // VFAST Transactions on Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 1. – P. 60–70.
25. Series solution of unsteady tank drainage for third order fluid using Adomian decomposition method / S. A. Malik, S. F. Shah, K. N. Memon [et al.]. – DOI: 10.21015/vtm.v12i1.1762 // VFAST Transactions on Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 1. – P. 137–139.
26. Наумов, В. А. Нестационарное истечение плавленого сыра из емкости через цилиндрический трубопровод / В. А. Наумов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2026. – Т. 12, № 1. – С. 28–38.
27. Наумов, В. А. Анализ нестационарной математической модели простой гидравлической сети с центробежным насосом / В. А. Наумов. – DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.064-070 // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – № 4. – С. 64–70.
28. Csizmadia, P. The effect of rheology model of an activated sludge on to the predicted losses by an elbow / P. Csizmadia, S. Till. – DOI: 10.3311/PPme.12348 // Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 62, № 4. – P. 305–311.
29. Bibok, M. Experimental and numerical investigation of the loss coefficient of a 90° pipe bend for power-law fluid / M. Bibok, P. Csizmadia, S. Till. – DOI: 10.3311/PPch.14346 // Periodica Polytechnica. Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 64, № 4. – P. 469–478.

References

1. Makhutova, O. N. Essential polyunsaturated fatty acids in the physiology and metabolism of fish and humans: meaning, needs, sources / O. N. Makhutova, M. I. Gladyshev – DOI: 10.31857/S0869813920050040 // I. M. Sechenov Russian Journal of Physiology. – 2020. – Vol. 106, № 5. – P. 601–621.
2. Advances in therapeutic applications of fish oil: A review / P. Das, A. Dutta, T. Panchali [et al.]. – DOI: 10.1016/j.meaf.2024.100142 // Measurement: Food. – 2024. – Vol. 13. – Paper ID 100142.
3. A sustainable source of freshwater fish oil: Nutritional and functional insights through lipidomics and metabolomics / P. W. Harlina, A. Y. Nasution, I. Musfiroh [et al.]. – DOI: 10.1016/j.lwt.2026.119046 // LWT – Food Science and Technology. – 2026. – Vol. 241. – Paper ID 119046.
4. High-tech methods of processing fish raw materials grown in the Astrakhan region / S. V. Zolotokopova, G. I. Kasyanov, E. Y. Lebedeva, A. R. Ainalieva. – DOI: 10.24143/2073-5529-2021-4-134-144 // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. – 2021. – № 4. – P. 134–144.
5. Current trends in production and processing of fish oil & its chemical analytical technologies: An overview / S. C. Vaska, P. Muralakar, H. Arunkumar [et al.]. – DOI: 10.48047/ecb/2023.12.si5a.049 // European Chemical Bulletin. – 2023. – Vol. 12. – P. 1705–1725.
6. Studies on optimizing the enzymatic process of fat extraction from secondary fish raw materials for use in biotechnology / O. Ya. Mezenova, S. V. Agafonova, N. Yu. Romanenko [et al.]. – DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-43-55 // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. – 2024. – № 3. – P. 43–55.
7. Comparative assessment of methods for extracting fat from secondary fish oil intended for the synthesis of biotechnology products / O. Ya. Mezenova, S. V. Agafonova, N. Yu. Romanenko [et al.]. – DOI: 10.48612/dalrybvtuz/2025-71-07 // Scientific works of Dalrybvtuz. – 2025. – Vol. 71, № 1. – P. 59–71.
8. Kharitonov, E. L. Feed and metabolic factors of the formation of fatty acid composition of milk in cows / E. L. Kharitonov, D. E. Panyushkin // Problems of biology of productive animals. – 2016. – № 2. – P. 76–106.
9. Malaweera, B. O. Use of seafood processing by-products in the animal feed industry / B. O. Malaweera, W. M. N. M. Wijesundara // Seafood Processing By-Products. Edit. S.K. Kim. – New York: Springer, 2014. – P. 315–339. – ISBN-13978-1461495895.
10. Optimizing omega-3 polyunsaturated fatty acids for healthy ageing: Human intake evidence and dairy cow dietary interventions for milk enrichment / M. Dimopoulou, P. Madesis, A. Dimopoulou, O. Gortzi. – DOI: 10.3390/foods15061079 // Foods. – 2026. – Vol. 15, № 6. – Piper ID 1079.
11. Technology of fats from biological resources: monogr. / N. P. Boeva, O. V. Bredikhina, M. S. Petrova, Yu. A. Baskakova. – Moscow: VNIRO Publ. House, 2016. – 107 p. ISBN 978-5-85382-475-1.
12. Development of technology for processing fat waste into technical products / S. M. Gaidar, A. M. Pikina, O. M. Lapsar, I. G. Golubev. – DOI: 10.33267/2072-9642-2023-3-32-35. // Machinery and equipment for rural areas. – 2023. – № 3 (309). – P. 32–35.

13. Petrov, B. F. Ecological aspects of fish oil production in Russia / B. F. Petrov. – DOI: 10.36038/0131-6184-2024-1-114-121 // Fisheries. – 2024. – № 1. – P. 114–121.
14. Akhmedova, N. R. Influence of liquid food products viscosity on lobe pump performance (case of pumping fish oil) / N. R. Akhmedova, O. I. Levicheva, V. A. Naumov. – DOI: 10.24143/2073-5529-2022-3-74-81 // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. – 2022. – № 3. – P. 74–81.
15. Velikanov, N. L. Transportation of fish oil through a pipeline by a single-screw pump / N. L. Velikanov, V. A. Naumov. – DOI: 10.24143/2073-5529-2024-3-95-101 // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry. – 2024. – № 3. – P. 95–101.
16. Effects of purification process on rheological properties of Catfish oil / S. Sathivel, W. Prinyawiwatkul, I. I. Negulescu [et al.]. – DOI: 10.1007/s11746-003-0780-3 // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2003. – Vol. 80, № 8. – P. 829–832.
17. Comparisons of chemical and physical properties of Catfish oils prepared from different extracting processes / S. Sathivel, H. Yin, W. Prinyawiwatkul, J. M. King. – DOI: 10.1111/J.1750-3841.2009.01050.X // Journal of Food Science. – 2009. – Vol. 74, № 2. – P. E70–E76.
18. Gnoevoy, A. V. Fundamentals of the theory of flows of Bingham media: monogr. / A. V. Gnoevoy, D. M. Klimov, V. M. Chesnokov. – Moscow: Fizmatlit, 2004. – 272 p. – ISBN 5-9221-0566-3.
19. Shapovalov, V. M. The Gretz-Nusselt problem for Bingham liquids / V. M. Shapovalov. – DOI: 10.1134 / s0040364419030165 // High temperature thermophysics. – 2019. – Vol. 57, № 3. – P. 446–452.
20. Investigation of the steady flow of a viscoplastic bitumen binder described by the Shvedov–Bingham model in a cylindrical pipe / O. V. Matvienko, V. P. Bazuev, N. R. Sabylina [et al.]. – DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-158-177 // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2019. – Vol. 21, № 3. – P. 158–177.
21. Fusi, L. Flow of a Bingham fluid in a pipe of variable radius / L. Fusi, K. D. Housiadas, G. C. Georgiou. – DOI: 10.1016/j.jnnfm.2020.104393 // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 2020. – Vol. 285, № 2. – Paper ID 104393.
22. Kumitsky, B. M. Rheological model of the sheet drywall forming process / B. M. Kumitsky, E. S. Aralov, S. G. Tulskeya. – DOI: 10.36622/VSTU.2022.67.3.006 // Scientific Journal of Construction and Architecture. – 2022. – № 3 (67). – P. 61–70.
23. Modeling the flow of a Bingham plastic fluid through a circular pipeline with different wall properties / A. Zadorozhnyi, Y. Chovnyuk, O. Stakhovsky [et al.]. – DOI: 10.1063/5.0124547 // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2490. – Paper ID 050028.
24. Exact solution of tank drainage for Bingham fluid flow circular tube / G. M. Oghai, M. Kamran, S. F. Shah, A. A. Amur. – DOI: 10.21015/vtm.v12i1.1737 // VFAST Transactions on Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 1. – P. 60–70.
25. Series solution of unsteady tank drainage for third order fluid using Adomian decomposition method / S. A. Malik, S. F. Shah, K. N. Memon [et al.]. –

DOI: 10.21015/vtm.v12i1.1762 // VFAST Transactions on Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 1. – P. 137–139.

26. Naumov, V. A. Unsteady outflow of processed cheese from a container through a cylindrical pipeline / V. A. Naumov // Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia. – 2026. – Vol. 12, № 1. – P. 28–38.

27. Naumov, V. A. Analysis of a non-stationary mathematical model of a simple hydraulic network with a centrifugal pump / V. A. Naumov. – DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.064-070 // Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University. – 2020. – № 4. – P. 64–70.

28. Csizmadia, P. The effect of rheology model of an activated sludge on to the predicted losses by an elbow / P. Csizmadia, S. Till. – DOI: 10.3311/PPme.12348 // Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 62, № 4. – P. 305–311.

29. Bibok, M. Experimental and numerical investigation of the loss coefficient of a 90° pipe bend for power-law fluid / M. Bibok, P. Csizmadia, S. Till. – DOI: 10.3311/PPch.14346 // Periodica Polytechnica. Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 64, № 4. – P. 469–478.

Информация об авторе

В. А. Наумов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ КГТУ

Information about the author

V. A. Naumov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Research and Development of KSTU

Статья поступила в редакцию 01.06.2026; одобрена после рецензирования 11.06.2026; принята к публикации 20.06.2026.

The article was submitted 01.06.2026; approved after reviewing 11.06.2026; accepted for publication 20.06.2026.

Научная статья

УДК 663.18

DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-66-79

Подбор рациональных параметров экстракции полисахаридов водорослей с использованием ферментативного гидролиза

Елена Викторовна Ульрих

Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

elen.ulrich@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

Аннотация. В последние годы растет интерес к разработке новых полимерных, нетоксичных, биоразлагаемых, извлекаемых из возобновляемых ресурсов материалов, таких как целлюлоза. Целью данной работы являлся подбор рациональных параметров экстракции полисахаридов водорослей (в том числе целлюлозы) с использованием ферментативного гидролиза. Экстракцию полисахаридов из биомассы водорослей проводили с использованием разбавленных минеральных кислот, щелочи и воды. Для гидролиза талломы водорослей разделяли на части, измельчали на куски разных размеров (5–10 см) и высушивание в течение 15 ч в печи при 105–106 °С для облегчения тонкого помола. Высушенную биомассу измельчали до частиц размерами 0,1; 1,0; 5,0 и 10,0 см. Эффективной явилась твердая загрузка с массовой долей 10 %. При проведении гидролиза использовался ферментный препарат «Целлюлаза ультра» для расщепления ксиланов и других некрахмальных полисахаридов. Для определения сахаров применяли спектрофотометрический метод, основанный на взаимодействии сахаров с антроновым реактивом. Содержание полисахаридов в экстрактах, выделенных при 100 °С, варьировало от 0,77±0,09 г для красных водорослей до 1,31±0,14 г для бурых водорослей в зависимости от продолжительности экстракции. Установлено, что рациональными параметрами проведения ферментативной экстракции целлюлозы являются степень измельчения образца 0,1–0,5 см, температурный диапазон 180–200 °С, давление 1,0–1,5 Мпа. Подобранные условия позволяют выделить волокна от светло-бежевого до коричневатого цвета без обугливания. Полученные данные о ферментативном гидролизе водорослей с целью разложения целлюлозы свидетельствуют о том, что эффективность этого процесса и состав изготовленных продуктов в существенной степени зависят от особенностей структуры сырья, сбалансированности и активности целлюлазного комплекса ферментов, а также от применяемых методов гидролиза.

Ключевые слова: полисахариды, экстракция, ферментативный гидролиз, целлюлоза, водоросли.

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

Для цитирования: Ульрих Е. В. Подбор рациональных параметров экстракции полисахаридов водорослей с использованием ферментативного гидролиза // Известия КГТУ. 2026. № 82. С. 66–79. DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-66-79.

Original article

Selection of rational parameters for the extraction of algae polysaccharides using enzymatic hydrolysis

Elena V. Ul'rikh

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
elen.ulrich@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

Abstract. In recent years, there has been a growing interest in the development of new polymeric, non-toxic, biodegradable materials extracted from renewable resources, such as cellulose. The aim of this work is selection of rational parameters for the extraction of algal polysaccharides (including cellulose) using enzymatic hydrolysis. Extraction of polysaccharides from algal biomass has been carried out using dilute mineral acids, alkali and water. For hydrolysis, algae thalli have been divided into parts and crushed into pieces of different sizes (5–10 cm) and dried for 15 hours in an oven at 105–106 °C to facilitate fine grinding. The dried biomass has been crushed to particle sizes of 0.1; 1.0; 5.0 and 10.0 cm. A solid load with a mass fraction of 10% is effective. The hydrolysis has been performed using the enzyme «Cellulase Ultra», which is an enzymatic preparation for the breakdown of xylans and other non-starch polysaccharides. A spectrophotometric method based on the interaction of sugars with an anthrone reagent has been used to determine sugars. The polysaccharide content in extracts isolated at 100 °C ranged from 0.77±0.09 g for red algae to 1.31±0.14 g for brown algae, depending on the extraction duration. It has been established that the following rational parameters for the enzymatic extraction of cellulose are: a sample fineness of 0.1–0.5 cm, a temperature range of 180–200 °C, and a pressure of 1.0–1.5 MPa. The selected conditions allow for the extraction of fibers ranging from light beige to brownish in color without charring. The data obtained on the enzymatic hydrolysis of algae for the decomposition of cellulose indicate that the efficiency of this process and the composition of the resulting products depend significantly on the structural properties of the raw material, the balance and activity of the cellulase enzyme complex, and the hydrolysis methods used.

Keywords: polysaccharides, extraction, enzymatic hydrolysis, cellulose, algae.

Funding: The work was carried out in accordance with the approved plan of research topics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «KSTU», carried out at the expense of the federal budget (budget cycle 2025–2027, registration number of the EGISU R&D card 1124072300009-1 dated 07/23/2024), an

agreement on the provision of a subsidy from the federal budget for financial support for the implementation of a state assignment for the provision of public services (performance of work).

For citation: Ulrikh E. V. Selection of rational parameters for the extraction of algae polysaccharides using enzymatic hydrolysis. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(82):66–79. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-66-79.

ВВЕДЕНИЕ

В прибрежных районах Балтийского моря, где сосредоточена деятельность человека, присутствует большое количество питательных веществ и повышена температура воды, проблема увеличения выброса парниковых газов от гниения избыточной водной растительности становится еще более актуальной [1, 2]. Таким образом, очевидной является актуальность поиска решений по снижению климатической и экологической нагрузки, создаваемой избыточной водной растительностью.

В последние годы растет интерес к разработке новых полимерных, нетоксичных, биоразлагаемых, извлекаемых из возобновляемых ресурсов материалов, таких как целлюлоза [3, 4].

Содержание целлюлозы в водорослях и водных растениях варьирует, у бурых водорослей оно составляет 2–20 %, однако структура целлюлозы может отличаться от целлюлозы высших растений. У высших водных растений, как и у других растений, целлюлоза входит в состав клеточных стенок, придавая им жесткость и структуру [5]. Целлюлоза является основным компонентом клеточной стенки у некоторых водорослей, ее содержание составляет от 2 до 20 %. Структура целлюлозы у водорослей может отличаться от таковой у высших растений [6]. Например, у бурых водорослей ее иногда называют «альгулезой». У некоторых видов целлюлоза при гидролизе дает только глюкозу, в иных случаях состав полимера может включать и другие сахара. Так, у *Rhodymenia palmata* целлюлоза на 50 % состоит из ксилозы. Содержание целлюлозы в высших растениях, как правило, выше, чем у водорослей. Точное содержание целлюлозы варьирует в зависимости от вида растения, его части и возраста. Например, у древесных растений оно составляет 40–50 % от сухого веса. Целлюлоза представляет собой волокнистый полимер, содержащий звенья β -1,4-связанной глюкопиранозы, которые образуют естественную линейную структуру [7]. Биополимеры целлюлозы существуют в пяти различных полиморфах.

На основании литературных данных было установлено, что полисахариды содержатся в биомассе водных растений преимущественно в форме целлюлозы (до 70 %) [8]. Это позволяет сделать вывод о том, что поиск направлений использования целлюлозы в нативном виде или в форме продуктов ее переработки является очень необходимым [9]. Переработка избыточной биомассы водной растительности в ценные продукты позволит получить продукты с добавленной стоимостью при одновременном решении климатических и экологических задач [10].

Целью данной работы является подбор рациональных параметров экстракции полисахаридов водорослей (в том числе целлюлозы) с использованием ферментативного гидролиза.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Биомассу водорослей *Furcellaria*, *Cladophora*, *Ceramium*, *Ulva* и *Fucus* отбирали на побережье Балтийского моря в районе Филинской бухты (54°50'15" с. ш. 20°02'30" в. д.). Пробы производились с 15 мая по 30 августа 2025 г. в период волновой активности, когда на берегу скапливается максимальное количество водорослей.

Образцы доставляли в лабораторию в пластиковых тазах, где из биомассы удаляли крупные посторонние примеси (щепки, листья, фрагменты животных), затем биомассу промывали водопроводной водой для удаления песка и оставшихся мелких примесей. Чистую биомассу сушили на воздухе, потом досушивали при 40 °С в сушильном шкафу с конвекцией. Высушенные водоросли хранились в бумажных пакетах в сухом и хорошо проветриваемом помещении. Непосредственно перед анализом водоросли измельчали ножевым лабораторным измельчителем.

Первоначально проводилась экстракция полисахаридов из биомассы водорослей с использованием разбавленных минеральных кислот, щелочи и воды. В ходе эксперимента было обнаружено, что такие растворители, как 1М растворы серной и соляной кислот, дистиллированная вода, не позволяют выделить полисахариды. В свою очередь, щелочная экстракция 2 %-м раствором гидроксида калия позволила получить значительные выходы полисахаридов. В связи с этим было принято решение использовать данный реагент для проведения многофакторного эксперимента по подбору рациональных параметров экстракции полисахаридов. На основе анализа литературных данных были выбраны соотношения навески к растворителю 1:20 и 1:30. Использование большего объема растворителя не приводит к увеличению выхода продукта, и с точки зрения экологичности процесса было принято решение остановиться на соотношении 1:20.

После выделения полисахаридов провели гидролиз целлюлозы водных растений (в том числе ферментативный). Для этого талломы водорослей разделяли на части, измельчали до размеров 5–10 см и высушивали в течение 15 ч в печи при 105–106 °С для облегчения тонкого помола. Измельчали высушенную биомассу до частиц размерами 0,1; 1,0; 5,0 и 10,0 см. Эффективной была твердая загрузка с массовой долей 10 %, однако известны исследования с 12, 15 и 20 % [11]. При гидролизе использовали ферментный препарат «Целлюлаза ультра» для расщепления ксиланов и других некрахмальных полисахаридов. Действие препарата – гидролиз β -1,4-гликозидных связей в целлюлозе, эффективное расщепление некрахмальных полисахаридов, перевод их из нерастворимой формы в растворимую. Биохимические параметры препарата представлены в табл. 1.

Таблица 1. Биохимические параметры препарата «Целлюлаза ультра»
Table 1. Biochemical parameters of the preparation called «Cellulase Ultra»

Показатель	Значение
Активность, ед/г	2500
Температура	оптимум 50,0–60,0 °С; рабочий диапазон 30,0–65,0 °С
pH	оптимум 4,0–5,0; рабочий диапазон 2,0–7,0
Время	6 ч

Ферментная активность целлюлазы выражается в международных единицах U (или Ед) и равна количеству фермента, которое катализирует превращение 1 мкМ субстрата за 1 мин при установленной температуре. Активность целлюлолитического фермента можно рассчитать по формуле [12]:

$$\Phi A = \frac{PB \cdot \omega \cdot w}{0,18 \cdot t \cdot E},$$

где ΦA – ферментная активность, Ед/г или U/г; PB – редуцирующее вещество, мг/мл; ω – объем ферментного экстракта, мл; E – масса ферментируемого субстрата, г; $0,18$ – количество глюкозы (мг) в 1 mM; t – время реакции (1 ч).

Для определения сахаров использовали спектрофотометрический метод, основанный на взаимодействии сахаров с антроновым реактивом. Сущность метода заключается в расщеплении сложных углеводов до моносахаров в сильно кислой среде с последующей их дегидратацией и образованием гидроксиметилфурфуrolа, образующего при реакции с антроном комплексное соединение синевато-зеленого цвета. Интенсивность образовавшейся окраски прямо пропорциональна содержанию сахаров в реакционной среде. Пропорциональная зависимость интенсивности окраски от содержания сахаров в испытуемом растворе соблюдается в области концентраций моносахаров 0,02–0,10 мг/мл.

При реализации метода в пробирку помещали 3,0 мл раствора испытуемого препарата, охлаждали его в бане со льдом до 0 °С. При охлаждении осторожно приливали 6,0 мл 0,2 %-го антронового реактива, все перемешивали и немедленно нагревали на кипящей водяной бане в течение 5–15 мин. Затем смесь охлаждали и измеряли 2 оптические плотности испытуемого и стандартного растворов на спектрофотометре в максимуме поглощения при длине волны 625 нм в кювете с толщиной слоя 10 мм относительно раствора сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Масса выделенных полисахаридов при варьировании параметров экстракции представлена в табл. 2.

Таблица 2. Масса выделенных полисахаридов при варьировании соотношения биомасса/растворитель

Table 2. Mass of isolated polysaccharides with varying biomass/solvent ratio

Соотношение биомасса/ растворитель	Продолжительность экстракции, ч	Выход полисахаридов, г
Зеленые водоросли		
1:20	1,0	1,13±0,14
1:25	1,0	0,83±0,09
1:30	1,0	0,54±0,06
Бурые водоросли		
1:20	1,0	1,31±0,14
1:25	1,0	1,01±0,11
1:30	1,0	0,69±0,06
Красные водоросли		
1:20	1,0	1,02±0,13
1:25	1,0	0,76±0,08
1:30	1,0	0,51±0,06

Для оценки влияния температуры на эффективность экстракции полисахаридов температуру процесса устанавливали на уровне 20, 60 и 100 °C (рис.).

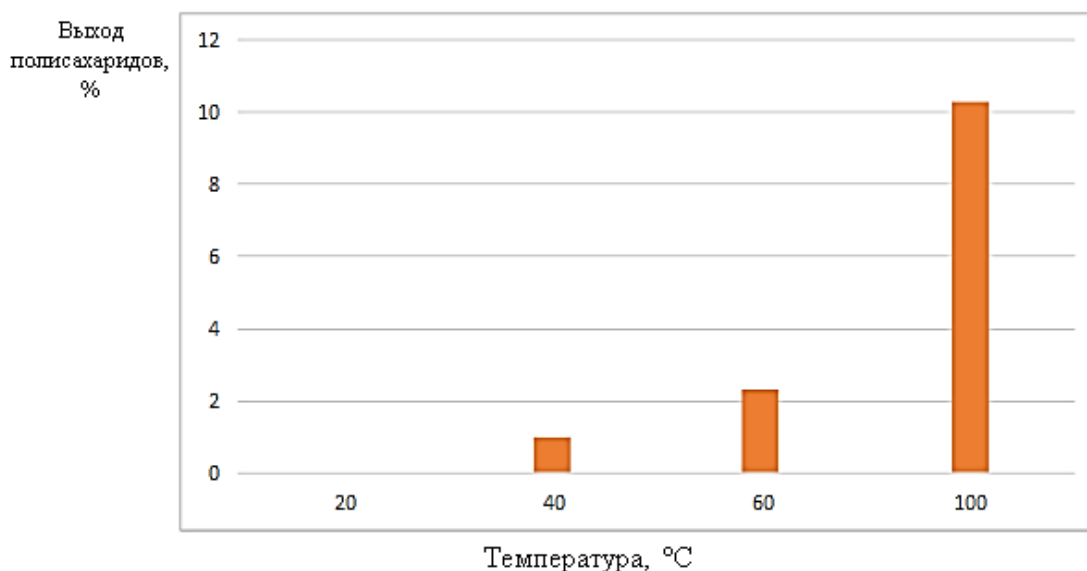


Рис. Влияние температуры экстракции на выход полисахаридов
Fig. Effect of extraction temperature on the yield of polysaccharides

Таким образом, необходимо провести развернутые исследования по оценке влияния продолжительности экстракции на выход полисахаридов. Полученные значения выхода полисахаридов при различной продолжительности процесса приведены в табл. 3.

Таблица 3. Масса выделенных полисахаридов при разной продолжительности экстракции

Table 3. Mass of isolated polysaccharides at different extraction times

Образец	Выход полисахаридов, г, при разной продолжительности экстракции			
	1 ч	2 ч	3 ч	4 ч
Зеленые водоросли	0,30±0,06	0,69±0,09	1,13±0,14	0,89±0,10
Бурые водоросли	0,36±0,06	0,75±0,09	1,31±0,14	1,05±0,11
Красные водоросли	0,28±0,06	0,57±0,09	1,02±0,13	0,77±0,09

Соотношение биомассы и экстрагента в эксперименте составило 1:20, продолжительность экстракции 3 ч (табл. 2, 3). Процесс экстракции при комнатной температуре не привел к выделению полисахаридов, а процент выхода продукта при 60 °C был незначительным. Содержание полисахаридов в экстрактах, выделенных при 100 °C, варьировало от 0,77±0,09 г для красных водорослей до 1,31±0,14 г для бурых водорослей в зависимости от продолжительности экстракции. Исходя из полученных данных сделан вывод о том, что увеличение массы получаемых полисахаридов прямо пропорционально увеличению продолжительности процесса экстракции.

Процентный расчет был выполнен относительно массы взятой навески гидробионтов (3,0 г). Минимальный выход полисахаридов (для красных водорослей) составил $0,28 \pm 0,06$ г, что соответствует 9,16 %, максимальный выход продукта – $1,13 \pm 0,14$ г при 3-х часовом процессе, что составляет 36,11 %. При продолжении извлечения масса полисахаридов уменьшилась и варьировала в пределах $0,77 \pm 0,09$ – $1,05 \pm 0,11$ г. Вероятнее всего, это связано с деструкцией биополимера. Таким образом, оптимальная продолжительность экстракции полисахаридов составила 3 ч.

Результаты эксперимента по ферментативному гидролизу полисахарида целлюлозы приведены в табл. 4. Параметры гидролиза: препарат «Целлюлаза ультра», продолжительность эксперимента 40 мин, соотношение сырья и воды 1:10, степень измельчения растений 1–5 мм, pH 12,5, массовая доля сырья 10 %, температура 180–220 °C, давление 1,0–2,0 МПа.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рациональными параметрами проведения ферментативной экстракции целлюлозы являются следующие: степень измельчения образца 0,1–0,5 см, температурный диапазон 180–200 °C, давление 1,0–1,5 Мпа. Подобранные условия позволяют получить волокна от светло-бежевого до коричневатого цвета без обугливания.

Установлено, что ферментативный гидролиз имеет несколько преимуществ перед химическим гидролизом. При ферментативном гидролизе деградация сахара не происходит, а сам процесс протекает при низких температурах, при этом отмечается высокий выход конечного продукта [13]. В настоящее время усилия исследователей в большей степени направлены на разработку способов ферментативного гидролиза растительного сырья с целью получения целлюлозы [14].

Таблица 4. Результаты эксперимента по проведению ферментативной экстракции целлюлозы

Table 4. Results of the experiment on enzymatic extraction of cellulose

Температура, °C	Давление, Мпа	Результаты	Выход сухой массы, г
180	1,0	Целлюлозное волокно бежевого цвета без обугливания	$0,318 \pm 0,06$
180	1,0		$0,401 \pm 0,06$
180	1,0		$0,215 \pm 0,06$
200	1,5	Целлюлозное волокно коричневатого цвета без обугливания	$0,435 \pm 0,06$
200	1,5		$0,479 \pm 0,06$
200	1,5		$0,401 \pm 0,06$
220	2,0	Целлюлозное волокно темно-коричневого цвета с признаками обугливания	$0,093 \pm 0,06$
220	2,0		$0,042 \pm 0,06$
220	2,0		$0,113 \pm 0,06$

Morán-Aguilar и соавторы [15] показали, что ферментативное производство целлюлозы является востребованным, поскольку не требует агрессивных химикатов, имеет более низкие энергетические потребности и является экологически устойчивым. Потребление энергии снижается за счет необходимости меньшей механической обработки и использования низких температур. После первоначальной

обработки можно применять более низкие температуры и более щадящее механическое воздействие. Ферментативный гидролиз также снижает потребление воды и образование опасных отходов.

Методы ферментативного гидролиза, предложенные Yazdi и др., эффективно устраняют необходимость в кислотах для производства целлюлозы, однако предварительная механическая обработка по-прежнему остается дорогостоящей, учитывая обработку для производства целлюлозы и предварительную обработку перед ферментативным гидролизом [16]. Zadorozhny и др. подробно изучили синергетическую природу ферментов целлюлаз и пришли к выводу, что для восстановления волокон целлюлозы требуется несколько видов целлюлаз [17]. Роль семейства эндоглюканаз целлюлаз заключается в ферментации менее упорядоченных областей подготовленного целлюлозного сырья, что делает кристаллические области более доступными для целлобиогидролаз, которые затем способны переваривать кристаллические области.

Ферментативный гидролиз целлюлозы и гемицеллюлоз происходит под воздействием не отдельных ферментов, а полиферментных систем, вырабатываемых грибами (например, рода *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Phanerochaete*, *Chaetomium*, *Humicola* и др.) и бактериями (*Clostridium*, *Cellulomonas*, *Thermomonospora*, *Microbiospora*, *Streptomyces* и др.) [18].

Гидролиз целлюлозы осуществляется под воздействием синергически действующего комплекса целлюлаз, включающего эндо-1,4-β-глюканазу (1,4-β-глюкан-глюкангидролазу, КФ 3.2.1.4), экзо-1,4-β-глюканазу (экзоцеллобиогидролазу или 1,4-β-D-глюкан-целлобиогидролазу, КФ 3.2.1.91), экзо-1,4-β-глюкозидазу (1,4-β-D-глюкан-гидролазу, КФ 3.2.1.74) и целлобиазу (β-глюкозидазу или β-D-глюкозид-глюкогидролазу, КФ 3.2.1.21), разрушающую целлобиозу до глюкозы [19].

В настоящее время проводятся исследования по применению ферментных препаратов для получения целлюлозы из водорослевого сырья и по получению высокоэффективных, в том числе мутантных штаммов микроорганизмов – продуцентов комплекса ферментов, обладающих высокой активностью по отношению к целлюлозе и гемицеллюлозам.

Получен ферментный препарат [20] на основе рекомбинантного штамма гриба *Penicillium verruculosum*, содержащий в своем составе полисахаридмонооксигеназу из *Myceliophora thermophila* с увеличенной гидролитической активностью к различным видам целлюлозосодержащего сырья (выход продуктов гидролиза из которых повышается на 40 %, а при гидролизе наиболее трудногидролизуемой целлюлозы – на 60 %). Использование смесей мутантных форм целлюлаз *Penicillium verruculosum* позволило увеличить выход микроцеллюлозы при ферментативном гидролизе целлюлозосодержащих материалов (измельченной осиновой древесины) на ~ 30 % по сравнению с композициями исходных ферментов такого же состава [20].

Wu и соавторами установлены основы механизма ферментативного гидролиза целлюлозосодержащего сырья [21], которые впоследствии были трансформированы другими авторами [22]. По современным представлениям [23], ферментативный гидролиз осуществляется при совместном и одновременном синергическом действии комплекса целлюлолитических ферментов, что увеличивает скорость и

глубину процесса гидролиза. Кроме того, важное значение при деструкции биополимеров растительного сырья имеет адсорбционное взаимодействие ферментов на поверхности субстратов [24].

Механизм ферментативного гидролиза гемицеллюлоз, имеющих в отличие от целлюлозы разветвленную структуру, гемицеллюлазами менее изучен. Авторы [25] считают, что для их ферментолитического действия необходимо синергическое действие целлюлаз и высокоспецифичных эндо-1,4-β-D-ксиланаз, экзо-1,4-β-D-ксилозидаз, эндо-1,4-β-D-маннаназ, α-галактозидаз и других ферментов, состав которых зависит от содержания в растительном сырье соответствующих гемицеллюлоз.

Известно, что на эффективность ферментативного гидролиза существенно влияют физико-химические и структурные факторы (величина удельной поверхности, доступной действию целлюлаз, и степень кристалличности – с увеличением степени кристалличности целлюлозы скорость процесса снижается) [26]. Кинетические расчеты показали [27], что скорость ферментативного гидролиза для получения целлюлозы с высокой кристалличностью определяется диффузией молекул фермента в субстрат. С уменьшением степени кристалличности целлюлозы вклад диффузии снижается, в то время как кинетический вклад в суммарную скорость процесса гидролиза возрастает.

Таким образом, теоретические представления о ферментативном гидролизе растительного сырья с целью получения целлюлозы свидетельствует о том, что эффективность этого процесса и состав получаемых продуктов в существенной степени зависят от особенностей структуры сырья, сбалансированности и активности целлюлазного комплекса ферментов, а также от применяемых методов гидролиза [28].

ВЫВОДЫ

Значительные выходы полисахаридов водорослей получали методом щелочной экстракции 2 %-м раствором гидроксида калия, использование большего объема растворителя не привело к увеличению выхода продукта. После выделения полисахаридов проводили гидролиз целлюлозы водорослей ферментом «Целлюлаза ультра», полученным путем направленной ферментации селекционного штамма *Trichoderma reesei* с последующей очисткой и концентрированием. Фермент направлен на гидролиз β-1,4-гликозидных связей в целлюлозе.

Для оценки влияния температуры на эффективность экстракции полисахаридов устанавливали температурный режим 20, 60 и 100 °C. Соотношение биомассы и экстрагента в эксперименте составило 1:20, продолжительность экстракции – 3 ч. Содержание полисахаридов в экстрактах, выделенных при 100 °C, варьировало от 0,77±0,09 г для красных водорослей до 1,31±0,14 г для бурых водорослей в зависимости от продолжительности экстракции. Минимальный выход полисахаридов (для красных водорослей) составил 0,28±0,06 г, что соответствует 9,16 %, максимальный выход продукта – 1,13±0,14 г при 3-х часовом процессе, что составляет 36,11 %. При продолжении извлечения масса полисахаридов уменьшилась и варьировала в пределах 0,77±0,09–1,05±0,11 г. Установлены оптимальные параметры гидролиза целлюлозы: ферментный препарат «Целлюлаза ультра», продолжительность эксперимента 40 мин, соотношение сырья и воды 1:10, степень измельчения растений 1–5 мм, pH 12,5, массовая доля сырья 10 %, температура 180–

220 °С, давление 1,0–2,0 МПа. Подобранные условия позволяют получить волокна от светло-бежевого до коричневатого цвета без обугливания.

В настоящее время целлюлоза имеет существенное применение в фармацевтической и пищевой промышленности в качестве разбавителей, смазочных материалов, дезинтеграторов, связующих веществ и покрытий при производстве таблеток и капсул.

Список источников

1. Projection of Changes in Coastal Water Temperature of the Baltic Sea up to 2100 / M. Ptak, M. Sojka, S. Haddout, T. Amnuaylojaroen. – DOI: 10.3390/forecast8010012 // Forecasting. – 2026. – № 8 (1). – P. 12.
2. Baltic Sea coastal sediment-bound eukaryotes have increased year-round activities under predicted climate change related warming / S. Li, E. Nilsson, L. Seidel [et al.]. – DOI: 10.3389/fmicb.2024.1369102 // Front Microbiol. – 2024. – № 15. – P. 1369102.
3. Marinho, E. Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications / E. Marinho. – DOI: 10.1016/j.scenv.2025.100283 // Sustainable Chemistry for the Environment. – 2025. – № 11. – P. 100283.
4. Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact / R. Dallaev, N. Papež, M. M. Allaham [et al.]. – DOI: 10.3390/polym17141981 // Polymers (Basel). – 2025. – № 17 (14). – P. 1981.
5. Sayam, S. Natural fibers in sustainable materials: extraction technologies, fiber modification, and performance–sustainability relationships / S. Sayam. – DOI: 10.1039/d5ra09029f // RSC Adv. – 2026. – № 16. – P. 10495–10537.
6. Algal cellulose, production and potential use in plastics: Challenges and opportunities / E. Zanchetta, E. Damergi, B. Patel [et al.]. – DOI: 10.1016/j.algal.2021.102288 // Algal Research. – 2021. – № 56. – P. 102288.
7. Adawiyah, R. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from lembang (*Typha angustifolia* L.) / R. Adawiyah, V. Suryanti, I. Pranoto. – DOI: 10.1088/1742-6596/2190/1/012007 // J. Phys.: Conf. Ser. – 2022. – № 2190 (1). – P. 012007.
8. Beyzi, S. B. Chemical, fermentative, nutritive and anti-nutritive composition of common reed (*Phragmites australis*) plant and silage / S. B. Beyzi, I. Ülger, Y. Konca. – DOI: 10.1007/s12649-022-01903-w // Waste and Biomass Valorization. – 2023. – № 14. – P. 927–936.
9. Lai, W.-F. Biodegradable polymer films incorporating aggregation-induced emission luminogens for smart food packaging / W.-F. Lai. – DOI: 10.1039/D5FB00636H // Sustainable Food Technol. – 2026. – № 4. – P. 1211–1224.
10. Şomoghi, R. An Overview of Bio-Based Polymers with Potential for Food Packaging Applications / R. Şomoghi, S. Mihai, F. Oancea. – DOI: 10.3390/polym17172335 // Polymers. – 2025. – № 17 (17). – P. 2335.
11. Hydrothermal liquefaction of *Miscanthus* × *Giganteus*: Preparation of the ideal feedstock / E. Lappa, P. S. Christensen, M. Klemmer [et al.]. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.02.008 // Biomass and Bioenergy. – 2016. – № 87. – P. 17–25.
12. Zhao, C. Mixed culture of recombinant *Trichoderma reesei* and *Aspergillus niger* for cellulase production to increase the cellulose degrading capability / C. Zhao,

- L. Deng, H. Fang. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.03.001 // Biomass and Bioenergy. – 2018. – № 112. – P. 93–98.
13. Influence of Enzymatic Hydrolysis on Composition and Technological Properties of Black Currant (*Ribes nigrum*) Pomace / A. Kairè, J. Jagelavičiūtė, L. Bašinskienė [et al.]. – DOI: 10.3390/app15116207 // Applied Sciences. – 2025. – № 15 (11). – P. 6207.
14. Enzymatic hydrolysis and microbial fermentation: The most favorable biotechnological methods for the release of bioactive peptides / D. E. Cruz-Casas, C. N. Aguilar, J. A. Ascacio-Valdés [et al.]. – DOI: 10.1016/j.fochms.2021.100047 // Food Chem (Oxf). – 2021. – № 3. – P. 100047.
15. Advancing Sustainable Production of High-Performance Cellulose Pulps / M. G. Morán-Aguilar, I. Costa-Trigo, G. A. Bastida [et al.]. – DOI: 10.3390/ma18214968 // Materials. – 2025. – № 18 (21). – P. 4968.
16. Yazdi, E. J. Pretreatment and enzymatic hydrolysis of tertiary cellulose for glucose production / E. J. Yazdi, G.-J. W. Euverink, J. Yue. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.122144 // Industrial Crops and Products. – 2025. – № 237. – P. 122144.
17. Cellulases: key properties, natural sources, and industrial applications / A. V. Zadorozhny, N. M. Slynko, S. V. Bannikova [et al.]. – DOI: 10.18699/vjgb-25-141 // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. – 2025. – № 25 (8). – P. 1348–1360.
18. Isolation of cellulolytic bacteria from the intestine of *Diatraea saccharalis* larvae and evaluation of their capacity to degrade sugarcane biomass / K. I. Dantur, R. Enrique, B. Welin [et al.]. – DOI: 10.1186/s13568-015-0101-z // AMB Express. – 2015. – № 25 (5). – P. 15.
19. Рабинович, М. Л. Целлюлазы микроорганизмов / М. Л. Рабинович, М. С. Мельник, А. В. Болобова // Прикладная биохимия и микробиология. – 2002. – Т. 38. – № 4. – С. 355–373.
20. Ферментативный гидролиз целлюлозы смесями мутантных форм целлюлаз *Penicillium verruculosum* / А. С. Доценко, А. В. Гусаков, А. М. Рожкова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. – 2018. – № 2. – Текст: электронный. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fermentativnyy-gidroliz-tsellyulozysmesyami-mutantnyh-form-tsellyulaz-penicillium-verruculosum> (дата обращения: 02.05.2026).
21. The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis / W. Wu, P. Li, L. Huang [et al.]. – DOI: 10.3390/biomass3010007 // Biomass. – 2023. – № 3 (1). – P. 96–107.
22. Baig, K. S. Interaction of enzymes with lignocellulosic materials: causes, mechanism and influencing factors / K. S. Baig. – DOI: 10.1186/s40643-020-00310-0 // Bioresour. Bioprocess. – 2020. – № 7. – P. 21.
23. Hu, J. The synergistic action of accessory enzymes enhances the hydrolytic potential of a «cellulase mixture» but is highly substrate specific / J. Hu, V. Arantes, A. Pribowo [et al.]. – DOI: 10.1186/1754-6834-6-112 // Biotechnol Biofuels. – 2013. – № 6 (1). – P. 112.
24. Emerging Roles of Biopolymers in Seed Science and Technology / A. M. Velusamy, S. Rathinavelu, V. Shanmugam [et al.]. – DOI: 10.1002/bip.70056 // Biopolymers. – 2025. – № 116 (6). – Article e70056.

25. Current Trends of Cellulosic Ethanol Technology from the Perspective of Industrial Development / G. K. S. Santos, C. E. de Farias Silva, B. M. V da Gama [et al.]. – DOI: 10.3390/fermentation12010048 // Fermentation. – 2026. – № 12 (1). – P. 48.
26. Decreasing the Crystallinity and Degree of Polymerization of Cellulose Increases Its Susceptibility to Enzymatic Hydrolysis and Fermentation by Colon Microbiota / K. Thielemans, Y. De Bondt, L. Comer [et al.]. – DOI: 10.3390/foods12051100 // Foods. – 2023. – № 12 (5). – P. 1100.
27. Koo, B. Drying Effect on Enzymatic Hydrolysis of Cellulose Associated with Porosity and Crystallinity / B. Koo, J. Jo, S.-M. Cho. – DOI: 10.3390/app10165545 // Applied Sciences. – 2020. – № 10 (16). – P. 5545.
28. Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass: Structural Features, Process Aspects, Kinetics, and Computational Tools / D. Santos, J. G. W. Siqueira, M. G. L. da Silva [et al.]. – DOI: 10.3390/biomass6010013 // Biomass. – 2026. – № 6 (1). – P. 13.

References

1. Projection of Changes in Coastal Water Temperature of the Baltic Sea up to 2100 / M. Ptak, M. Sojka, S. Haddout, T. Amnuaylojaroen. – DOI: 10.3390/forecast8010012 // Forecasting. – 2026. – № 8 (1). – P. 12.
2. Baltic Sea coastal sediment-bound eukaryotes have increased year-round activities under predicted climate change related warming / S. Li, E. Nilsson, L. Seidel [et al.]. – DOI: 10.3389/fmicb.2024.1369102 // Front Microbiol. – 2024. – № 15. – P. 1369102.
3. Marinho, E. Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications / E. Marinho. – DOI: 10.1016/j.scenv.2025.100283 // Sustainable Chemistry for the Environment. – 2025. – № 11. – P. 100283.
4. Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact / R. Dallaev, N. Papež, M. M. Allaham [et al.]. – DOI: 10.3390/polym17141981 // Polymers (Basel). – 2025. – № 17 (14). – P. 1981.
5. Sayam, S. Natural fibers in sustainable materials: extraction technologies, fiber modification, and performance–sustainability relationships / S. Sayam. – DOI: 10.1039/d5ra09029f // RSC Adv. – 2026. – № 16. – P. 10495–10537.
6. Algal cellulose, production and potential use in plastics: Challenges and opportunities / E. Zanchetta, E. Damergi, B. Patel [et al.]. – DOI: 10.1016/j.algal.2021.102288 // Algal Research. – 2021. – № 56. – P. 102288.
7. Adawiyah, R. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from lembang (*Typha angustifolia* L.) / R. Adawiyah, V. Suryanti, I. Pranoto. – DOI: 10.1088/1742-6596/2190/1/012007 // J. Phys.: Conf. Ser. – 2022. – № 2190 (1). – P. 012007.
8. Beyzi, S. B. Chemical, fermentative, nutritive and anti-nutritive composition of common reed (*Phragmites australis*) plant and silage / S. B. Beyzi, I. Ülger, Y. Konca. – DOI: 10.1007/s12649-022-01903-w // Waste and Biomass Valorization. – 2023. – № 14. – P. 927–936.
9. Lai, W.-F. Biodegradable polymer films incorporating aggregation-induced emission luminogens for smart food packaging / W.-F. Lai. – DOI: 10.1039/D5FB00636H // Sustainable Food Technol. – 2026. – № 4. – P. 1211–1224.

10. Şomoghi, R. An Overview of Bio-Based Polymers with Potential for Food Packaging Applications / R. Şomoghi, S. Mihai, F. Oancea. – DOI: 10.3390/polym17172335 // Polymers. – 2025. – № 17 (17). – P. 2335.
11. Hydrothermal liquefaction of *Miscanthus* × *Giganteus*: Preparation of the ideal feedstock / E. Lappa, P. S. Christensen, M. Klemmer [et al.]. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.02.008 // Biomass and Bioenergy. – 2016. – № 87. – P. 17–25.
12. Zhao, C. Mixed culture of recombinant *Trichoderma reesei* and *Aspergillus niger* for cellulase production to increase the cellulose degrading capability / C. Zhao, L. Deng, H. Fang. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.03.001 // Biomass and Bioenergy. – 2018. – № 112. – P. 93–98.
13. Influence of Enzymatic Hydrolysis on Composition and Technological Properties of Black Currant (*Ribes nigrum*) Pomace / A. Kairė, J. Jagelavičiūtė, L. Bašinskienė [et al.]. – DOI: 10.3390/app15116207 // Applied Sciences. – 2025. – № 15 (11). – P. 6207.
14. Enzymatic hydrolysis and microbial fermentation: The most favorable biotechnological methods for the release of bioactive peptides / D. E. Cruz-Casas, C. N. Aguilar, J.A. Ascacio-Valdés [et al.]. – DOI: 10.1016/j.fochms.2021.100047 // Food Chem (Oxf). – 2021. – № 3. – P. 100047.
15. Advancing Sustainable Production of High-Performance Cellulose Pulps / M. G. Morán-Aguilar, I. Costa-Trigo, G. A. Bastida [et al.]. – DOI: 10.3390/ma18214968 // Materials. – 2025. – № 18 (21). – P. 4968.
16. Yazdi, E. J. Pretreatment and enzymatic hydrolysis of tertiary cellulose for glucose production / E. J. Yazdi, G.-J. W. Euverink, J. Yue. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.122144 // Industrial Crops and Products. – 2025. – № 237. – P. 122144.
17. Cellulases: key properties, natural sources, and industrial applications / A. V. Zadorozhny, N. M. Slynko, S. V. Bannikova [et al.]. – DOI: 10.18699/vjgb-25-141 // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2025. – № 25 (8). – P. 1348–1360.
18. Isolation of cellulolytic bacteria from the intestine of *Diatraea saccharalis* larvae and evaluation of their capacity to degrade sugarcane biomass / K. I. Dantur, R. Enrique, B. Welin [et al.]. – DOI: 10.1186/s13568-015-0101-z // AMB Express. – 2015. – № 25 (5). – P. 15.
19. Rabinovich, M. L. Cellulases of microorganisms / M. L. Rabinovich, M. S. Melnik, A. V. Bolobova // Applied biochemistry and microbiology. – 2002. – Vol. 38. – № 4. – P. 355–373.
20. Enzymatic hydrolysis of cellulose with mixtures of mutant forms of *Penicillium verruculosum* cellulases / A. S. Dotsenko, A. V. Gusakov, A. M. Rozhkova [et al.] // Bulletin of Moscow University. Series 2: Chemistry. – 2018. – № 2. – Text: electronic. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fermentativnyy-gidroliz-tsellyulozysmesyami-mutantnyh-form-tsellyulaz-penicillium-verruculosum> (accessed on 02.05.2026).
21. The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis / W. Wu, P. Li, L. Huang [et al.]. – DOI: 10.3390/biomass3010007 // Biomass. – 2023. – № 3 (1). – P. 96–107.
22. Baig, K. S. Interaction of enzymes with lignocellulosic materials: causes, mechanism and influencing factors / K. S. Baig. – DOI: 10.1186/s40643-020-00310-0 // Bioresour. Bioprocess. – 2020. – № 7. – P. 21.

23. Hu, J. The synergistic action of accessory enzymes enhances the hydrolytic potential of a «cellulase mixture» but is highly substrate specific / J. Hu, V. Arantes, A. Pribowo [et al.]. – DOI: 10.1186/1754-6834-6-112 // *Biotechnol Biofuels*. – 2013. – № 6 (1). – P. 112.

24. Emerging Roles of Biopolymers in Seed Science and Technology / A. M. Velusamy, S. Rathinavelu, V. Shanmugam [et al.]. – DOI: 10.1002/bip.70056 // *Biopolymers*. – 2025. – № 116 (6). – Article e70056.

25. Current Trends of Cellulosic Ethanol Technology from the Perspective of Industrial Development / G. K. S. Santos, C. E. de Farias Silva, B. M. V da Gama [et al.]. – DOI: 10.3390/fermentation12010048 // *Fermentation*. – 2026. – № 12 (1). – P. 48.

26. Decreasing the Crystallinity and Degree of Polymerization of Cellulose Increases Its Susceptibility to Enzymatic Hydrolysis and Fermentation by Colon Microbiota / K. Thielemans, Y. De Bondt, L. Comer [et al.]. – DOI: 10.3390/foods12051100 // *Foods*. – 2023. – № 12 (5). – P. 1100.

27. Koo, B. Drying Effect on Enzymatic Hydrolysis of Cellulose Associated with Porosity and Crystallinity / B. Koo, J. Jo, S.-M. Cho. – DOI: 10.3390/app10165545 // *Applied Sciences*. – 2020. – № 10 (16). – P. 5545.

28. Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass: Structural Features, Process Aspects, Kinetics, and Computational Tools / D. Santos, J. G. W. Siqueira, M. G. L. da Silva [et al.]. – DOI: 10.3390/biomass6010013 // *Biomass*. – 2026. – № 6 (1). – P. 13.

Информация об авторе

Е. В. Ульрих – доктор технических наук, доцент

Information about the author

E. V. Ulrikh – Doctor of Engineering, Associate Professor

Статья поступила в редакцию 13.05.2026; одобрена после рецензирования 23.05.2026; принята к публикации 07.06.2026.

The article was submitted 13.05.2026; approved after reviewing 23.05.2026; accepted for publication 07.06.2026.

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Научная статья

УДК 631.4

DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-83-97

Опыт бонитировки пахотных почв Калининградской области на основе почвенно-экологического индекса

Ольга Алексеевна Анциферова¹, Лидия Михайловна Демидова²,
Анастасия Алексеевна Чернявская³

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

¹olga.antsiferova@klgtu.mail.ru², <https://orcid.org/0000-0001-5389-7243>

Аннотация. Статья посвящена апробации методик расчета показателей оценки качества пахотных почв на уровне муниципальных округов Калининградской области. В исследовании применен сравнительный анализ выборок типичных почв по значениям почвенно-экологического индекса, бонитета для зерновых культур и «нормативной урожайности» зернового эквивалента. Разнообразие почв в агроландшафтах обусловлено геоморфологическими и литологическими пространственными различиями. Общим фактором, лимитирующим бонитет зерновых культур, является повышенный гидроморфизм глеевых почв. В меньшей степени на качество почв и урожай оказывают влияние легкий или тяжелый гранулометрический состав, каменистость, эрозия. Из агрохимических свойств кислотность почв является основным негативом в Зеленоградском муниципальном округе. Значения почвенно-экологического индекса являются совокупным отражением агроклиматического потенциала, консервативных свойств почв и их агрохимического состояния. Это позволяет ранжировать почвы от потенциально наиболее продуктивных к менее продуктивным. Установлено, что лучшими почвами являются дерново-подзолистые неоглеенные и осушенные глееватые легкосуглинистого и среднесуглинистого состава с максимальным потенциалом бонитета на карбонатных почвообразующих породах. Значения почвенно-экологического индекса возрастают в связи с изменением агроклиматического потенциала в сторону увеличения суммы активных температур в первой четверти XXI в. Уровень урожайности зерновых культур за 2020–2025 гг. демонстрирует реализацию почвенно-экологического потенциала в первую очередь на осушенных глееватых дерново-подзолистых почвах Калининградской области. Расчетные показатели «нормативной урожайности», несмотря на ряд методических трудностей, в целом согласуются с пространственными закономерностями варьирования бонитета почв по зерновым культурам.

Ключевые слова: почвенно-экологический индекс, бонитет почв для зерновых культур, лимитирующие факторы, нормативная урожайность.

Благодарности: работа выполнена в рамках инициативной поисковой научно-исследовательской темы кафедры агрономии и агроэкологии ФГБОУ ВО «КГТУ» «Почвенные ресурсы Калининградской области: оценка, использование, продуктивность, управление», рег. № 13.16.022.2.

Для цитирования: Анциферова О. А., Демидова Л. М., Чернявская А. А. Опыт бонитировки пахотных почв Калининградской области на основе почвенно-экологического индекса // Известия КГТУ. 2026. № 82. С. 83–97. DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-83-97.

Original article

Experience in rating arable soils in the Kaliningrad region based on the soil-ecological index

Ol'ga A. Antsiferova^{1✉}, Lidiya M. Demidova², Anastasiya A. Chernyavskaya³

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

¹olga.antsiferova@klgtu.mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-5389-7243>

Abstract. The article is devoted to testing of methods for calculating indicators of the quality of arable soils at the level of municipal districts in the Kaliningrad region. The study uses a comparative analysis of samples of typical soils based on the values of the soil-ecological index, the bonitet for grain crops, and the "normative yield" of grain equivalent. The diversity of soils in agro-landscapes is stipulated by the geomorphological and lithological spatial differences. The common factor limiting the quality of grain crops is the increased hydromorphism of gley soils. To a lesser extent, light or heavy granulometric composition, stony soil, and erosion affect soil quality and crop yields. Soil acidity is the main negative factor in the Zelenogradsky Municipal District. The values of the soil ecological index are a combined reflection of the agroclimatic potential, the conservative properties of the soils, and their agrochemical state. This allows for the ranking of soils from potentially the most productive to the least productive. It has been established that the best soils are sod-podzolic non- drained and drained gleyic soils of light loamy and medium loamy composition with the maximum potential of bonitet on carbonate soil-forming rocks. The values of the soil-ecological index increase due to the change in the agroclimatic potential towards an increase in the sum of active temperatures in the first quarter of the 21st century. The yield level of grain crops for 2020–2025 demonstrates the realization of soil and ecological potential, primarily on drained gleyic sod-podzolic soils in the Kaliningrad region. Despite a number of methodological difficulties, the calculated indicators of "standard yield" generally agree with the spatial patterns of soil quality variation for grain crops.

Keywords: soil-ecological index, soil quality for grain crops, limiting factors, standard yield.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the initiative search research topic of the Department of Agronomy and Agroecology of the Kaliningrad State Technical University "Soil resources of the Kaliningrad region: assessment, use, productivity, management" Reg. No. 13.16.022.2.

For citation: Antsiferova O. A., Demidova L. M., Chernyavskaya A. A. Experience in rating arable soils in the Kaliningrad region based on the soil-ecological index. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(82):83–97. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-83-97.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы оценки качества пахотных земель обострились в связи с изменением климата [1–3]. Государственные задачи повышения эффективности землепользования в области сельского хозяйства в РФ [4, 5] касаются напрямую проблемы совершенствования землеоценочной методологии для ранжирования почв сельскохозяйственных угодий по категориям пригодности и продуктивности [6–8].

Калининградская область в последнее десятилетие является лидером Северо-Западного округа по урожайности зерновых культур и озимого рапса [8]. Поэтому на примере данного субъекта РФ актуальна апробация методологических подходов качественной оценки почв сельскохозяйственных угодий для выявления объективности получаемых баллов бонитета, фактической продуктивности почв и их ресурсного потенциала.

Наиболее существенным достижением в землеоценочных показателях явился предложенный еще в советский период И. И. Кармановым с соавторами подход определения бонитета почв на основе почвенно-экологического индекса [9]. Позднее эта методика была официально рекомендована для оценки почв [6], и в последние годы на ее базе разработана методология определения качества почв и расчета «нормативной урожайности», утвержденная ГОСТ Р 70229-2022 [10].

Наряду с этим на областном уровне в XX в. в системе Калининградского филиала СевЗапГипрозема последовательно реализовывалась землеоценочная схема на основе статистических моделей для расчета «нормальной» урожайности [11]. В начале XXI в. были проведены новые бонитировочные расчеты [12]. Однако на областном уровне неполностью учитывались агроклиматические условия, некоторые важные, лимитирующие урожай, свойства почв (эродированность, каменистость, кислотность). Основным итогом бонитировки явилось последовательное снижение качества и цены почв в ряду от неоглеенных к осушенным глееватым и глеевым. В настоящее время данный факт вступает в противоречие с фактической урожайностью [8] при том, что неоспоримо абсолютное преобладание в агроландшафтах области глееватых осушенных почв [13, 14]. Также остается нерешенным вопрос, почему осушенные почвы, в которые вложены в советский период огромные инвестиции на строительство и реконструкцию дренажных систем, имеют низкие баллы бонитета, чем неосушенные.

Цель работы – определение почвенно-экологического индекса и потенциала продуктивности в связи с фактической и «нормативной» урожайностью в четырех муниципальных округах (МО) Калининградской области – Зеленоградском, Гурьевском, Полесском и Гусевском.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являются почвы с разными генетическими характеристиками и уровнем плодородия. Изучен почвенный покров сельскохозяйственных угодий в четырех МО, расположенных в разных частях Калининградской области: 1) на западе (Зеленоградский) в пределах Самбийской моренной возвышенности; 2) в пригодной зоне Калининграда (Гурьевский) в условиях сочетания мо-

ренных и озерно-ледниковых волнистых равнин; 3) на севере (Полесский) на территории Полесской низменности; 4) на востоке (Гусевский) в границах волнистой Шешупской озерно-ледниковой равнины [15].

Методология исследования включает комплексный подход: 1) качественную оценку почв с определением почвенно-экологического индекса (ПЭИ) [9] с учетом климатических условий второй половины XX в. и первой четверти XXI в.; 2) выявление лимитирующих урожайность факторов для типичных пахотных почв в четырех МО; 3) расчет «нормативной урожайности» зерновых культур; 4) анализ полученных результатов в связи с фактической урожайностью по зерновым культурам и оценкой перспектив ресурсного потенциала почв. Реализация такого подхода, как и сравнительный расчет ПЭИ, проведен для Калининградской области впервые.

Расчет ПЭИ выполняли по формуле:

$$\text{ПЭИ} = 12,5 (2 - V) \times \Pi \times D_c (\Sigma t > 10^\circ (\text{КУ} - \Pi)) / (KK + 100) \times A, \quad (1)$$

где *ПЭИ* – почвенно-экологический индекс; 12,5 – постоянный множитель; *V* – плотность почвы (в среднем для метрового слоя), 2 – максимально возможная плотность почв при их предельном уплотнении, г/см³; *Π* – «полезный» объем почвы (в метровом слое); *D_c* – дополнительно учитываемые свойства (щебнистость, каменистость, гидроморфизм, эродированность, солонцеватость, засоленность); $\Sigma t > 10^\circ$ – среднегодовая сумма температур более 10 °С; *KY* – коэффициент увлажнения; *P* – поправка к КУ; *KK* – коэффициент континентальности; *A* – итоговый агрохимический показатель (из произведения поправочных коэффициентов на содержание подвижного фосфора и калия, уровень кислотности).

Расчет балла бонитета для зерновых (без кукурузы) проводится в соответствии с нормативным коэффициентом [10, с. 223], который для Калининградской области принят 0,94 для всех суглинистых почв, а для песчаных и супесчаных – 0,03. «Нормативную урожайность» определяли по ГОСТ Р 70229-2022 [10]:

$$H_y = [33,2 \times 1,4] \times [(A\P/10) \times (K1 \times K2 \times K3) \times (K4)], \quad (2)$$

где *H_y* – нормативная урожайность зерновых культур; $[33,2 \times 1,4]$ – блок расчета относительного качества почв (в баллах бонитета) с постоянными множителями; 33,2 – нормативная урожайность (ц/га) зерновых культур на эталонной почве, полученная при применении среднего уровня технологий при базовом значении; 1,4 – коэффициент пересчета на уровень урожайности при интенсивной технологии возделывания; *AΠ/10* – блок расчета почвенно-климатического бонитировочного балла относительного качества почв, в котором *AΠ* – величина местного агроклиматического потенциала для зерновых культур; 10,0 – базовое значение величины *AΠ*; *K1*, *K2*, *K3* – блок расчета свойств пахотного слоя (содержание гумуса, мощность гумусового горизонта, содержание физической глины в пахотном слое); *K4* – блок расчета негативных показателей.

Выборка типичных почв в каждом МО проведена по базе архивных материалов почвенных очерков и списков почв [13]. Для оценки агроклиматических показателей использованы региональные источники [16, 17], справочник агроклиматического зонирования [17], архив данных Гидрометцентра [18]. Расчет и статистическая обработка показателей выполнены в программе Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на малую площадь, почвенный покров изученных МО имеет почвенно-географические различия. В целом Калининградская область относится к бореальному поясу Европейско-Западно-Сибирской таежно-лесной области, зоне дерново-подзолистых почв южной тайги, Калининградской провинции дерново-подзолистых слабонасыщенных и вторично-насыщенных почв и буроземов кислых оподзоленных, по другим источникам – к Прибалтийской провинции дерново-подзолистых слабогумусированных и болотно-подзолистых почв [19, 20]. Внутриобластное районирование почв проведено Е. Н. Рудневой в начале 50-х годов XX в. [21] по материалам экспедиции А. А. Завалишина. Зеленоградский и большая часть Гурьевского МО входят в Земландский район, но первый – в подрайон буроземов суглинистых и дерново-подзолистых иллювиально-гумусово-железистых супесчаных и песчаных почв на морене, а второй – в подрайон дерново-остаточно-подзолистых большей частью поверхностно-оглеенных почв на перемытых двухчленных ледниковых отложениях. Наличие буроземов подтверждено современными исследованиями [14]. Полесский МО относится в основном к Центральному Дейма-Прегольскому району дерново-остаточно-подзолистых и дерново-глеевых суглинистых почв на двухчленных ледниковых отложениях. Гусевский МО располагается в пределах Инстручского и Анграпа-Писсовского районов с дерново-остаточно-подзолистыми оглеенными и дерново-глеевыми почвами средне-и тяжелосуглинистого состава на озерных, водно-ледниковых и ледниковых отложениях. Следовательно, различия почвенного покрова пахотных угодий МО на уровне почвенных районов обусловлены в первую очередь геоморфологическими и литологическими особенностями, долевым участием почв разной степени оглеения. Эти консервативные особенности природного экологического разнообразия почв отражаются в баллах бонитета.

Раскрыть специфику почвенного покрова помогает агроэкологический анализ лимитирующих урожайность факторов на пахотных угодьях. Для большей информативности негативные показатели были разделены на две группы: 1) собственно почвенные по признакам консервативных генетических особенностей почв; 2) агрохимические – по признаку агрономически важных регулируемых свойств пахотного горизонта в таежно-лесной зоне (рис. 1). В результате исследования установлено, что наибольшее доленое участие среди всех почвенных факторов имеет гидроморфизм (рис. 1), что обусловлено гумидностью климата и повсеместным грунтовым переувлажнением почв. Максимальная доля оглеенных почв среди четырех изученных округов приходится на Полесский МО в связи с низкими отметками поверхности над уровнем моря. Специфической чертой почвенного покрова в Зеленоградском МО является значительная доля почв с легким гранулометрическим составом (супеси и легкие опесчаненные суглинки). Напротив, тяжелые озерно-ледниковые глины часто встречаются на пахотных угодьях в Гусевском районе.

Фактическая эродированность почв и эрозионно-опасные участки с холмистым рельефом присутствуют во всех районах, но существенный вклад в снижение бонитета (до 8–15 %) характерен для Гусевского МО (северная часть Виштынецкой

возвышенности) и Зеленоградского МО (Самбийская возвышенность). Каменистость почв на пашне – явление типичное для моренных равнин Валдайского оледенения. Степень каменистости чаще всего соответствует слабой.

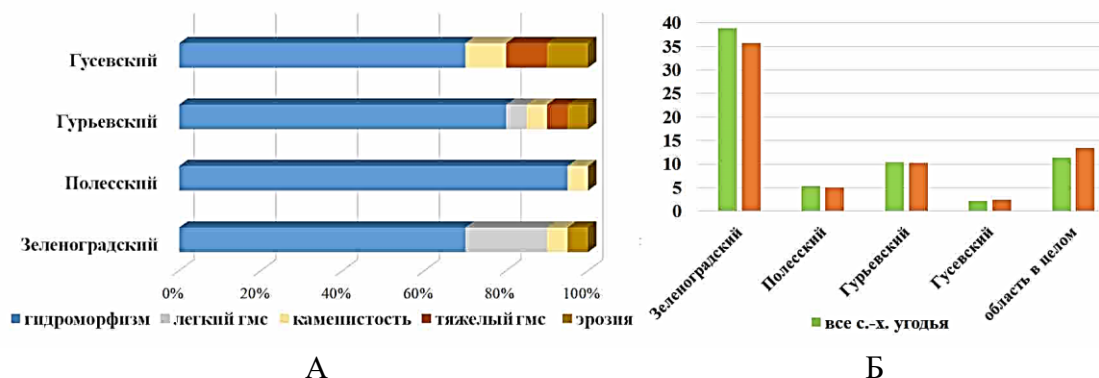


Рис. 1. Негативные факторы продуктивности зерновых культур. А – вклад лимитирующих факторов в снижение бонитета зерновых культур; Б – доля кислых почв на сельскохозяйственных угодьях Калининградской области на 1.01.2020
Fig. 1. Negative factors affecting the productivity of grain crops. A – contribution of limiting factors to the decrease in the quality of grain crops; B – share of acidic soils on agricultural land in the Kaliningrad Region as of January 1, 2020

Из агрохимических регулируемых свойств наиболее негативным является кислотность почв. Мы обработали данные Калининградского филиала «РосАгрохимслужбы» [13] и установили, что наибольшая доля кислых почв характерна для пахотных угодий в Зеленоградском МО. Это обусловлено быстрым выщелачиванием ионов кальция и магния в условиях легкого гранулометрического состава и приморского климата. В Гусевском МО преобладают почвы на карбонатных отложениях. Они отличаются большей буферностью к подкислению, поэтому процент кислых почв там минимален. Таким образом, итогом агроэкологического анализа почв явилось выявление негативных факторов, на которые вносятся поправки в расчет ПЭИ и «нормативной урожайности» зерновых культур.

Результаты расчета ПЭИ, бонитета зерновых по ПЭИ и «нормативной урожайности» зерновых культур приведены в табл. 1–3. В связи с выраженным трендом изменения среднегодовой температуры воздуха в сторону потепления в XXI в. значения ПЭИ рассчитаны по справочным климатическим показателям для второй половины XX в. и первой четверти XXI в. [15,16, 18].

Таблица 1. Почвооценочные показатели для пахотных почв Зеленоградского МО
Table 1. Soil assessment indicators for arable soils in Zelenogradsky District

Почвы	Гранулометрический состав	Почвообразующие породы	ПЭИ		Б	НУ
			1	2		
1	2	3	4	5	6	7
ПД, ЛБ	супесчаные	водно-ледниковые пески и супеси	43,7	51,3	46,7	29,6
	супесчаные	моренные суглинки	46,0	54,0	49,1	31,7
	легкосуглинистые	моренные суглинки	53,1	61,3	57,6	42,3

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
ПДг, ЛБг	супесчаные	водно-ледниковые пески и супеси	47,4	51,3	46,7	29,6
	супесчаные	моренные суглинки	47,4	51,3	46,7	31,7
	легкосуглинистые	моренные суглинки	55,5	61,9	58,2	42,3
ПДг	супесчаные	моренные суглинки	44,9	53,2	50,0	31,7
	легкосуглинистые	моренные суглинки	48,4	53,7	50,5	33,8
	среднесуглинистые	моренные суглинки	42,6	50,5	47,5	33,8
ДГ	супесчаные	моренные суглинки	38,2	44,3	40,3	28,5
	легкосуглинистые	моренные суглинки	47,1	54,6	51,3	31,7
	среднесуглинистые	моренные суглинки	46,0	53,4	50,2	31,7
	тяжелосуглинистые	моренные суглинки	36,7	42,6	40,0	28,5

Примечание. Почвы: ПД – дерново-подзолистые, ЛБ – буроземы, ПДг – дерново-подзолистые глееватые, ЛБг – буроземы глееватые, ПДГ – дерново-подзолистые глеевые, ДГ – дерново-глеевые, АБ – аллювиальные болотные. Все оглеенные и болотные почвы осушены, степень эффективности осушения принята удовлетворительной. 1 – для второй половины XX в.; 2 – для первой четверти XXI в.; Б – балл бонитета для зерновых культур на основе ПЭИ; НУ – «нормативная урожайность» зернового эквивалента (упрощенный расчет). Приведены усредненные данные для типичных по степени окультуренности почв на пахотных угодьях

Изученные МО входят в группу слабо континентального климата, что обеспечивает высокий агроклиматический потенциал территории за счет лучшей влагообеспеченности. При этом с запада на восток области выражено нарастание степени континентальности от Зеленоградского (112) к Гусевскому МО (120). Климатические изменения отразились на повышении суммы активных температур (выше 10 °С) за год на 50–100 °С. Это внесло решающий вклад в увеличение значения агроклиматического потенциала, итоговой величины ПЭИ и балла бонитета зерновых в XXI в. по сравнению со второй половиной XX в.

Таблица 2. Почвооценочные показатели для пахотных почв Гурьевского и Полесского МО

Table 2. Soil assessment indicators for arable soils in the Guryevsky and Polessky districts

Почвы	Гранулометрический состав	Почвообразующие породы	ПЭИ		Б	НУ
			1	2		
1	2	3	4	5	6	7
Гурьевский МО						
ПД	супесчаные	моренные суглинки	47,1	53,4	48,6	31,7
	легкосуглинистые	моренные суглинки	56,6	65,7	61,7	42,3
	среднесуглинистые	моренные суглинки	56,6	65,7	61,8	42,3
ПДг	супесчаные	моренные суглинки	49,7	57,8	54,4	31,7
	легкосуглинистые	моренные суглинки	55,3	59,1	55,6	42,3
	среднесуглинистые	моренные суглинки	51,0	59,1	55,5	42,3
	тяжелосуглинистые	двучленные отложения	45,4	52,6	49,5	30,4

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
ПДГ	легкосуглинистые	моренные суглинки	44,8	52,5	49,4	33,8
	среднесуглинистые	моренные суглинки	44,8	52,5	49,4	33,8
	тяжелосуглинистые	двучленные отложения	41,5	47,5	44,6	24,7
ДГ	среднесуглинистые	моренные суглинки	47,2	54,1	50,8	31,7
	тяжелосуглинистые	двучленные отложения	36,8	43,1	40,5	19,0
Полесский МО						
ПДг	легкосуглинистые	моренные суглинки	57,4	65,8	61,8	42,3
	среднесуглинистые	моренные суглинки	57,4	65,8	61,8	42,3
	тяжелосуглинистые	моренные суглинки	46,0	52,7	49,5	32,4
ПДГ	легкосуглинистые	моренные суглинки	47,8	55,4	52,1	33,8
	среднесуглинистые	моренные суглинки	47,8	55,4	52,1	33,8
	тяжелосуглинистые	моренные суглинки	39,4	45,7	42,9	28,5
ДГ	среднесуглинистые	моренные суглинки	46,0	52,1	48,9	31,7
	тяжелосуглинистые	двучленные и моренные отложения	36,7	41,6	39,1	19,0
АБ	перегной/торф	аллювиальные отложения	46,9	53,0	47,6	29,6

Следовательно, современный высокий уровень урожайности имеет климатическую основу. В настоящее время в Калининградской области наибольший агроклиматический потенциал в Нечерноземной полосе России. Величины ПЭИ показывают, что во всех МО лучшими почвами являются легко- и среднесуглинистые разновидности дерново-подзолистых и буроземов. При этом осушенные глееватые почвы сравнимы по значениям ПЭИ с неоглееными. Существенное снижение ПЭИ и бонитета зерновых наблюдается на глеевых почвах (дерново-подзолистых глеевых и дерново-глеевых) вследствие повышенного гидроморфизма.

Особенно это характерно для тяжелосуглинистых разновидностей по причине низких коэффициентов фильтрации в условиях гумидного климата. Почвы легкого гранулометрического состава (супесчаные) также имеют пониженные баллы бонитета в связи с комплексом экологических негативов (низкой влагоудерживающей способностью, слабой обеспеченностью элементами питания, повышенной кислотностью, подверженностью эрозии). Обращает на себя внимание, что в Полесском МО аллювиальные болотные почвы при эффективном осушении и средней степени окультуренности на польдерах имеют удовлетворительные баллы бонитета, что подчеркивает их потенциал продуктивности.

Таблица 3. Почвооценочные показатели для пахотных почв Гусевского МО
Table 3. Soil assessment indicators for arable soils in Gusevsky District

Почвы	Гранулометрический состав	Карбонатные почвообразующие породы	ПЭИ		Б	НУ
			1	2		
1	2	3	4	5	6	7
ПД	среднесуглинистые	моренные суглинки	56,6	68,6	64,5	42,3
	тяжелосуглинистые	моренные суглинки	52,1	61,5	54,8	36,2

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
ПДг	легкосуглинистые	моренные или озерно-ледниковые	58,1	68,5	64,3	42,3
	среднесуглинистые	моренные суглинки	58,1	68,5	64,3	42,3
	тяжелосуглинистые	моренные или озерно-ледниковые	49,0	56,5	53,1	34,3
ПДГ	среднесуглинистые	моренные суглинки	50,2	58,5	55,0	33,8
	тяжелосуглинистые	моренные или озерно-ледниковые	41,0	48,3	45,4	28,5
ДГ	среднесуглинистые	моренные суглинки	53,5	56,6	53,2	31,7
	тяжелосуглинистые	моренные или озерно-ледниковые	38,5	46,0	43,2	19,0

При сравнении ПЭИ и баллов бонитета на уровне районов обнаруживается тенденция к увеличению значений от Зеленоградского к Гусевскому МО. Следовательно, агроэкологический потенциал продуктивности дерново-остаточно-подзолистых почв (в том числе глееватых) на карбонатных отложениях является максимальным в области. Этот вывод сопоставим с данными по оценке почв 1981 г. [11, с. 41] только в части неосушенных неоглеенных почв. Тогда максимальные баллы бонитета (60,7–61,7) в области получили дерново-слабо- и скрытоподзолистые легко-и среднесуглинистые почвы на карбонатных отложениях.

При введении в формулу расчета агрохимических значений, отвечающих хорошей окультуренности почв, значения ПЭИ на пашне для легко- и среднесуглинистых разновидностей составляли 90–105 баллов. Это также подтверждает высокий ресурсный потенциал глееватых почв.

Расчет «нормативной урожайности» зернового эквивалента дал цифры значительно ниже, чем бонитет по ПЭИ. Это объясняется особенностями самой методики. В формуле имеются постоянные множители эталонной урожайности и коэффициента на интенсивность технологии. Поэтому при агроклиматическом потенциале 10 и отсутствии негативных свойств почв максимальная величина «нормативной урожайности» – 46,48 ц/га. Данный подход имеет ряд существенных недостатков, однако он принят в методике оценки потенциала продуктивности почв [22] и реализован при составлении Единой федеральной карты-схемы земель сельскохозяйственного назначения в 2025 г. Авторы принимали участие в данном проекте, поэтому исходя из опыта работ провели сопоставление баллов бонитета по ПЭИ и НУ. Значения НУ являются основанием для ранжирования пашни по урожайности в зерновом эквиваленте на 4 зоны от лучших к худшим почвам: 1) НУ более 40 ц/га; 2) 40–30; 3) 30–20; 4) 20–10. В табл. 2–4 приведены значения НУ при агроклиматическом потенциале 9,1, которые соответствуют «Справочнику агроклиматического зонирования» для территории Калининградской области [17], однако ниже фактических показателей для первой четверти XXI в. Полученные значения НУ в общей выборке из всех почв четырех МО имеют высокую корреляционную связь с баллом бонитета зерновых по ПЭИ ($r = 0,9$). Это в принципе подтверждает высокий ресурсный потенциал пахотных почв, в том числе осушенных глееватых дерново-подзолистых легко- и среднесуглинистых, которые вошли в первую зону урожайности.

Однако нами проведен упрощенный расчет без коэффициентов на мощность гумусового горизонта и поправок, которые снижают итоговое значение НУ и переводят почвы на зону ниже, соответственно, уменьшая цену на 1 га пашни. Можно заключить, что почвенно-экологический индекс полнее отражает региональные особенности пространственной неоднородности почв сельскохозяйственных угодий. В Северо-Западном регионе к аналогичному выводу пришли исследователи в Ленинградской области [23, 24].

Фактическая урожайность зерновых за последние шесть лет отражена на рис. 2.

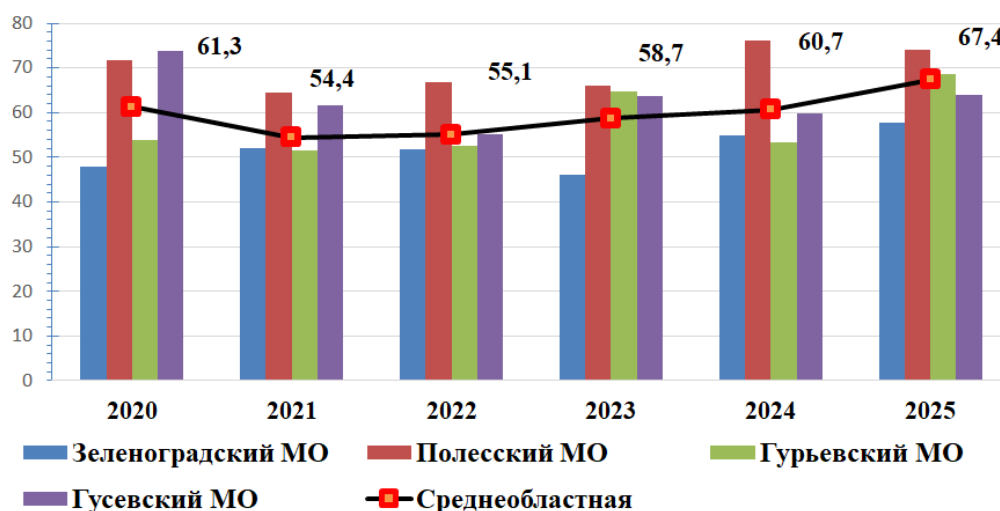


Рис. 2. Урожайность зерновых культур (ц/га) по четырем муниципальным округам в 2020–2025 гг. в сравнении со среднеобластной

Fig. 2. Grain crop yields (kg/ha) in four municipal districts in 2020-2025, compared to the regional average

Агроэкологический потенциал почв в Гусевском МО реализуется не каждый год. В то же время за счет интенсивных систем удобрения, оптимальных сортов и улучшения состояния мелиоративных систем на пахотных почвах Полесского МО осушенные глееватые почвы показывают максимальную продуктивность зерновых культур выше среднеобластных значений. В Зеленоградском МО действие негативных экологических факторов (легкий гранулометрический состав, эрозия, высокая доля кислых почв) стабильно приводит к снижению урожайности. Следует отметить, что климатические условия 2020–2025 гг. были в целом благоприятны для выращивания зерновых, прежде всего за счет высоких среднегодовых температур воздуха и количества осадков на уровне или ниже среднееголетних значений. В таких условиях среднеобластные показатели на осушенных почвах значительно выше расчетной «нормативной урожайности» в условиях оптимального сочетания агроклиматических условий и технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геоэкологические факторы оказывают значительное влияние на разнообразие почвенного покрова на пахотных почвах в муниципальных округах Калининградской области, что четко отражается в значениях ПЭИ.

Основным лимитирующим урожайность фактором является повышенный гидроморфизм дерново-подзолистых глеевых, дерново-глеевых почв. Значительно меньшее долевое участие на снижение бонитета почв оказывают кислотность, эрозия, каменистость, легкий и тяжелый гранулометрический состав почв.

Во всех изученных муниципальных округах максимальные баллы почвенно-экологического индекса, бонитета зерновых культур и «нормативной урожайности» зернового эквивалента выявлены для легко- и среднесуглинистых дерново-подзолистых и буроземных почв неоглеенных и осушенных глееватых. Лучшими почвами по потенциалу продуктивности являются осушенные дерново-подзолистые глееватые на карбонатных отложениях Гусевского МО.

Значения ПЭИ для территории Калининградской области в условиях современных климатических изменений увеличились по сравнению со второй половиной XX в., что обеспечило прирост урожайности зерновых культур.

ПЭИ рекомендуется для оценки пространственной изменчивости потенциала продуктивности пахотных почв на уровне муниципальных округов и отдельных сельскохозяйственных предприятий.

Список источников

1. Analyzing the Impact of Intensive Agriculture on Soil Quality: A Systematic Review and Global Meta-Analysis of Quality Indexes / H. I. Bedolla-Rivera, M. d. I. L. X. Negrete-Rodríguez, F. P. Gámez-Vázquez [et al.]. – DOI: 10.3390/agronomy13082166 // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 13. – Iss. 8. – P. 21–66.
2. Comparative Evaluation Methods of Comprehensive Soil Fertility in Jiangsu's Coastal Saline-Alkali Land / Z. Wang, S. Wang, L. Xu. – DOI: 10.3390/land14030469. – Текст: электронный // *Land*. – 2025. – Vol. 14. – Iss. 469. – URL: <https://doi.org/10.3390/land14030469> (дата обращения: 7.07.2026).
3. Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility / H. Chaudhry, H. B. Vasava, S. Chen [et al.]. – DOI: 10.3390/s24030864 // *Sensors (Basel)*. – 2024. – Vol. 24 (3). – Iss. 864. – P. 2–17.
4. О государственной программе «Эффективное вовлечение в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса»: Постановление Правительства Российской Федерации от 14.05.2021 № 731. – Текст: электронный // Гарант: сайт. – URL: <https://base.garant.ru/400773886/> (дата обращения: 10.05.2026). – 27 с.
5. Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 г.: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.09.2022 № 2567-р. – Текст: электронный // Правительство России: сайт. – URL: <http://static.government.ru/media/files/G3hzRyrGPbmFAf-BFgmEhxTrec694MaHp.pdf> (дата обращения: 10.05.2026). – 47 с.

6. Оценка качества и классификация земель по их пригодности для использования в сельском хозяйстве: практическое пособие / А. К. Оглезнев, Т. А. Куприян, Т. Е. Норкина [и др.]. – Москва: ФГУП «Росземкадастрсъемка – ВИСХАГИ», 2007. – 132 с.
7. Кирюшин, В. И. Задачи оптимизации землепользования в России / В. И. Кирюшин. – DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-5-25 // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2023. – № 116. – С. 5–25.
8. Калининградская область в цифрах. 2025: статистический ежегодник / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Калининградской области (Калининградстат). – Калининград, 2025. – 276 с.
9. Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв / Л. Л. Шишов, Д. Н. Дурманов, И. И. Карманов, В. В. Ефремов. – Москва: Агропромиздат, 1991. – 304 с.
10. ГОСТ Р 70229–2022. Почвы. Показатели качества почв. – Введ. 2022–07–25. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 26 с.
11. Оценка земель Калининградской области / отв. В. А. Федоров. – Калининград: Калининградский филиал «СевЗапГипрозем», 1981. – 350 с.
12. Об утверждении результатов государственной кадастровой оценки сельскохозяйственных угодий Калининградской области: Постановление Администрации Калининградской области от 30.04.2002 № 139. – Текст: электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/469721036> (дата обращения: 19.05.2026).
13. Панасин, В. И. Почвы Калининградской области и их агрохимические свойства / В. И. Панасин, К. В. Депутатов, М. И. Вихман. – Калининград: Изд-во Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта, 2020. – 232 с.
14. Анциферова, О. А. Гидрологический режим и агроэкологическая оценка почв агроландшафтов Самбийской равнины / О. А. Анциферова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 356 с.
15. Географический атлас Калининградской области / гл. ред. В. В. Орленок. – Калининград: Изд-во КГУ; ЦНИТ, 2002. – 276 с.
16. Агроклиматический справочник по Калининградской области. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1961. – 130 с.
17. Справочник агроклиматического зонирования субъектов Российской Федерации / под ред. С. И. Носова. – Москва: Маройсека, 2010. – 208 с.
18. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Калининграде. – Текст: электронный // Погода и климат: сайт. – URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history/26702.htm> (дата обращения: 14.02.2026).
19. Герасимова, М. И. География почв России / М. И. Герасимова. – Москва: Юрайт, 2026. – 333 с. – ISBN 978–5–534–15516–7.
20. Урусевская, И. С. Почвенно-географическое районирование как научное направление и основа рационального землепользования / И. С. Урусевская, И. О. Алябина, С. А. Шоба // Почвоведение. – 2015. – № 9. – С. 1020–1035.
21. Почвенная карта Калининградской области / сост. Е. Н. Руднева. – Москва: Почвенный институт АН СССР, 1953.
22. Методика инвентаризации земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации с целью формирования единой федеральной карты-схемы земель сельскохозяйственного назначения, включая сельскохозяйственные угодья:

в 3 т. Т. 3. Методика создания единой почвенной карты на территории субъектов Российской Федерации на основе архивных материалов почвенных обследований: методические рекомендации / Д. Н. Козлов, С. И. Комаров, Д. И. Рухович [и др.]; под общ. ред. А. В. Федоринова. – Москва, 2025. – 69 с.

23. Chebykina, E. Y. Agroecological Assessment of Arable Lands in the Lenin-grad Region of Russia under the Influence of Climate Change / E. Y. Chebykina, E. V. Abakumov. – DOI: 10.3390/agronomy14092113. – Текст: электронный // *Agronomy*. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 2113. – URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy14092113> (дата обращения: 8.07.2026).

24. Анализ методик бонитировки почв и оценки продуктивности земель / И. Б. Усков, О. В. Кононенко, П. А. Суханов, О. А. Усков // *Агрохимический вестник*. – 2023. – Т. 5. – С. 81–89.

References

1. Analyzing the Impact of Intensive Agriculture on Soil Quality: A Systematic Review and Global Meta-Analysis of Quality Indexes / H. I. Bedolla-Rivera, M. d. I. L. X. Negrete-Rodríguez, F. P. Gámez-Vázquez [et al.]. – DOI: 10.3390/agronomy13082166 // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 13. – Iss. 8. – P. 21–66.

2. Comparative Evaluation Methods of Comprehensive Soil Fertility in Jiangsu's Coastal Saline-Alkali Land / Z. Wang, S. Wang, L. Xu. – DOI: 10.3390/land14030469 – Text: electronic // *Land*. – 2025. – Vol. 14. – Iss. 469. – URL: <https://doi.org/10.3390/land14030469> (accessed on 07.07.2026).

3. Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility / H. Chaudhry, H. B. Vasava, S. Chen [et al.]. – DOI: 10.3390/s24030864 // *Sensors* (Basel). – 2024. – Vol. 24 (3). – Iss. 864. – P. 2–17.

4. On the state program "Effective involvement in the turnover of agricultural lands and the development of the land reclamation complex": decree of the Government of the Russian Federation No. 731 of 14.05.2021. – Text: electronic // Garant: site. – URL: <https://base.garant.ru/400773886/> (accessed on 10.05.2026). – 27 p.

5. Strategy for the development of the agro-industrial and fisheries complexes of the Russian Federation for the period up to 2030: decree of the Government of the Russian Federation No. 2567-r of 08.09.2022. – Text: electronic // Government of Russia: site. – URL: <http://static.government.ru/media/files/G3hzRyrGPbmFAfBFgmEhx-Trec694MaHp.pdf> (accessed on 10.05.2026). – 47 p.

6. Assessment of land quality and classification of lands according to their suitability for agricultural use: a practical guide / A. K. Ogleznev, T. A. Kupriyan, T. E. Norkina [et al.]. – Moscow: FGUP "Roszemkadastrsyemka – VISKHAGI", 2007. – 132 p.

7. Kiryushin, V. I. Tasks of Land Use Optimization in Russia / V. I. Kiryushin. – DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-5-25 // *Bulletin of the V. V. Dokuchaev Soil Institute*. – 2023. – No. 116. – P. 5–25.

8. Kaliningrad Region in figures. 2025: statistical yearbook / Territorial Body of the Federal State Statistics Service for the Kaliningrad Region (Kaliningradstat). – Kaliningrad, 2025. – 276 p.

9. Theoretical foundations and methods of soil fertility regulation / L. L. Shishov, D. N. Durmanov, I. I. Karmanov, V. V. Efremov. – Moscow: Agropromizdat, 1991. – 304 p.
10. State Standard R 70229–2022. Soils. Soil quality indicators. – Introduced 2022–07–25. – Moscow: Standartinform, 2022. – 26 p.
11. Land assessment in the Kaliningrad Region / ed. by V. A. Fedorov. – Kaliningrad: Kaliningrad Branch "SevZapGiprozem", 1981. – 350 p.
12. On approval of the results of the state cadastral assessment of agricultural land in the Kaliningrad Region: decree of the Administration of the Kaliningrad Region No. 139 of 30.04.2002. – Text: electronic // Electronic Fund of Legal and Regulatory Documents: site. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/469721036> (accessed on 19.05.2026).
13. Panasin, V. I. Soils of the Kaliningrad Region and their agrochemical properties / V. I. Panasin, K. V. Deputatov, M. I. Vikhman. – Kaliningrad: Publishing House of the Immanuel Kant Baltic Federal University, 2020. – 232 p.
14. Antsiferova, O. A. Hydrological regime and agroecological assessment of soils in agro-landscapes of the Sambian Plain / O. A. Antsiferova. – Kaliningrad: Publishing House of Kaliningrad State Technical University, 2022. – 356 p.
15. Geographical atlas of the Kaliningrad Region / ed. in chief V. V. Orlenok. – Kaliningrad: KSU Publishing House; CNIT, 2002. – 276 p.
16. Agroclimatic handbook for the Kaliningrad Region. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961. – 130 p.
17. Handbook of agroclimatic zoning of the subjects of the Russian Federation / ed. by S. I. Nosov. – Moscow: Maroyseka, 2010. – 208 p.
18. Average monthly and annual air temperatures in Kaliningrad. – Text: electronic // Weather and climate: site. – URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history/26702.htm> (accessed on 14.02.2026).
19. Gerasimova, M. I. Geography of soils in Russia / M. I. Gerasimova. – Moscow: Yurayt, 2026. – 333 p. – ISBN 978–5–534–15516–7.
20. Urusevskaya, I. S. Soil-geographical zoning as a scientific direction and the basis for rational land use / I. S. Urusevskaya, I. O. Alyabina, S. A. Shoba // Eurasian Soil Science. – 2015. – No. 9. – P. 1020–1035.
21. Soil map of the Kaliningrad Region / comp. by E. N. Rudneva. – Moscow: Soil Institute of the USSR Academy of Sciences, 1953.
22. Methodology for the inventory of agricultural lands of the Russian Federation for the purpose of forming a unified federal map of agricultural lands, including agricultural land: in 3 vols. Vol. 3. Methodology for creating a unified soil map on the territory of the constituent entities of the Russian Federation based on archival materials of soil surveys: methodological recommendations / D. N. Kozlov, S. I. Komarov, D. I. Rukhovich [et al.]; ed. in chief by A. V. Fedorinov. – Moscow, 2025. – 69 p.
23. Chebykina, E. Y. Agroecological Assessment of Arable Lands in the Kaliningrad Region of Russia under the Influence of Climate Change / E. Y. Chebykina, E. V. Abakumov. – DOI: 10.3390/agronomy14092113. – Text: electronic // Agronomy. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 2113. – URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy14092113> (accessed on 08.07.2026).

24. Analysis of methods for soil quality assessment and land productivity evaluation / I. B. Uskov, O. V. Kononenko, P. A. Sukhanov, O. A. Uskov // Agrochemical Bulletin. – 2023. – Vol. 5. – P. 81–89.

Информация об авторах

О. А. Анциферова – доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Л. М. Демидова – студентка
А. А. Чернявская – студентка

Information about the authors

O. A. Antsiferova – Doctor of Agricultural Sciences, Professor
L. M. Demidova – student
A. A. Chernyavskaya – student

Вклад авторов

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

Contribution of the authors

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

Статья поступила в редакцию 10.07.2026; одобрена после рецензирования 15.07.2026; принята к публикации 17.07.2026.

The article was submitted 10.07.2026; approved after reviewing 15.07.2026; accepted for publication 17.07.2026.

СУДОСТРОЕНИЕ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 620.92, 620.97, 629.5.014

DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-101-114

Классификация архитектурных типов судов с фотоэлектрическими панелями

Даниил Юрьевич Несин¹, Глеб Сергеевич Остюченко²✉

^{1,2} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ DanielNesin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7221-8496>

² Mr.Klinok.2000@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0732-8324>

Аннотация. Переход на возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, является критически важным для снижения антропогенного воздействия морского транспорта на окружающую среду. Солнечные панели способны обеспечить как оптимизацию операционных затрат, так и значительное сокращение вредных выбросов, способствуя декарбонизации морской отрасли. Отсутствие системного подхода и структурированных данных затрудняет оптимизационное проектирование судов с фотоэлектрическими панелями. Классификация судов по архитектурным признакам, как это сделано в статье, является фундаментом для формализации процесса проектирования, упорядочивания информации и выявления закономерностей. Наибольшее применение концепция «солнечного судна» находит в сегменте малотоннажных пассажирских судов (паромы, круизные яхты), характеризующихся относительно небольшой длиной, большой шириной (катамараны, тримараны), невысокой скоростью хода и использованием легких композитных материалов. Выделено пять основных архитектурных типов судов с фотоэлектрическими панелями, различающихся по площади и способу размещения панелей (на палубах, боковых поверхностях, выносных конструкциях, вертикальных крыльях-парусах). Максимальное относительное покрытие поверхности судна панелями достигается при использовании палубы и боковых поверхностей надстройки, однако «эффективная» площадь может быть выше за счет систем слежения за солнцем. Статья подчеркивает актуальность и перспективность использования солнечной энергии в морском транспорте, выявляет существующие проблемы в проектировании и предлагает системный подход к их решению через классификацию архитектурных типов судов с фотоэлектрическими панелями.

Ключевые слова: фотоэлектрические панели, проектирование судов, пассажирские паромы, солнечная энергия, архитектурный тип судна, солнечные суда.

Для цитирования: Несин Д. Ю., Остюченко Г. С. Классификация архитектурных типов судов с фотоэлектрическими панелями // Известия КГТУ. 2026. № 82. С. 101–114. DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-101-114.

Original article

Classification of architectural types of ships with photovoltaic panels

Daniil Yu. Nesin¹, Gleb S. Ostyuchenko²✉

^{1,2} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

¹ DanielNesin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7221-8496>

² Mr.Klinok.2000@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0732-8324>

Abstract. Transition to renewable energy sources, such as solar power, is critical for reducing the anthropogenic impact of maritime transport on the environment. Solar panels can optimize operating costs and significantly reduce harmful emissions, contributing to the decarbonization of the maritime industry. The lack of a systematic approach and structured data makes it difficult to optimize the design of ships with photovoltaic panels. Classification of ships according to their architectural features, as done in this article, is the foundation for formalization of the design process, organizing information, and identifying patterns. The concept of a "solar ship" is most widely used in the segment of small-tonnage passenger ships (ferries, cruise yachts), which are characterized by relatively short length, large width (catamarans, trimarans), low speed, and the use of lightweight composite materials. Five main architectural types of ships with photovoltaic panels have been identified, differing in area and placement of panels (on decks, side surfaces, external structures, vertical wing sails). Maximum relative coverage of the ship's surface with panels is achieved by using the deck and side surfaces of the superstructure, but the "effective" area can be increased by using sun tracking systems. The article highlights the relevance and prospects of using solar energy in maritime transport, identifies existing design problems, and proposes a systematic approach to solving them through the classification of architectural types of ships with photovoltaic panels.

Keywords: photovoltaic panels, ship design, passenger ferries, solar energy, architectural type of ship, solar ship.

For citation: Nesin D. Yu., Ostyuchenko G. S. Classification of architectural types of ships with photovoltaic panels. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(82):101–114. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-101-114.

ВВЕДЕНИЕ

Современная морская индустрия, основанная на ископаемом топливе, оказывает значительное антропогенное воздействие на окружающую среду. Выбросы оксидов азота и углекислого газа негативно влияют на морские экосистемы и атмосферу, особенно в уязвимых регионах, поэтому крайне важно внедрять передовые технические решения для уменьшения воздействия морского транспорта на окружающую среду.

Использование фотоэлектрических систем в качестве источника энергии, в том числе основного, способно обеспечить как оптимизацию операционных затрат, так и минимизацию вредных выбросов [1, 2]. Повышенный интерес к применению солнечной энергии на морских судах открывает перспективы для декарбонизации

отрасли и снижения зависимости от традиционных углеводородных источников, в частности, дизельного топлива.

Несмотря на многочисленные примеры успешного применения фотоэлектрических панелей на судах различного назначения [3–8], процесс их проектирования остается крайне несистемным. Это связано с отсутствием целенаправленной структуризации накопленных данных по судам, имеющим определенный набор проектных признаков. Последнее обстоятельство делает невозможным оптимизационное проектирование судов данного типа.

В основе системного подхода при проектировании лежит классификация объектов проектирования, являясь своего рода фундаментом для формализации процесса и постановки задачи в целом. Она позволяет:

- упорядочить информацию, облегчить поиск и анализ данных;
- выявить закономерности и связи между объектом и предметом проектирования;
- создать иерархические модели для определения подмножеств области определения элементов и характеристик.

В настоящей статье выполнены классификация судов с фотоэлектрическими панелями, а также их анализ по основным архитектурным признакам: рассмотрены только суда, в конструкции которых предпринимается попытка использовать фотоэлектрические панели как основной источник энергии.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОВРЕМЕННЫХ СУДОВ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАНЕЛЯМИ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

Известно, что поток солнечного излучения на входе в атмосферу Земли равен $1\,367\text{ Вт/м}^2$ (солнечная постоянная). Из-за поглощения при прохождении атмосферной массы Земли максимальный поток солнечного излучения на уровне моря (на экваторе) составляет всего лишь $1\,020\text{ Вт/м}^2$. При этом среднесуточное значение потока солнечного излучения через единичную горизонтальную площадку как минимум в три раза меньше (из-за смены дня и ночи и изменения угла солнца над горизонтом). С помощью промышленно производимых фотоэлектрических панелей можно преобразовать эту энергию в электричество с эффективностью до 24 % [9–15]. Чтобы обеспечить судно достаточной энергией для движения и работы судовых систем, требуется предусмотреть значительные свободные площади для размещения солнечных батарей, что, собственно, и является основным фактором, влияющим на архитектуру судна в целом.

Для анализа конструктивных особенности судов авторами была рассмотрена выборка из 42 построенных судов с применением фотоэлектрических панелей. В табл. 1 приводятся характеристики 19-ти наиболее интересных видов судов для коммерческого использования (исключая суда одной серии и суда, изготовленные для специализированных соревнований).

Компания «Solar Sailor» занимается разработкой и продвижением солнечных технологий во всех промышленных сферах. Компания презентовала гибридную электроэнергетическую систему, которая может применяться на любых транспортных средствах. Также она разработала и запатентовала «солнечный парус» с полупроводниковыми элементами вместо ткани. «Крыло» солнечной энергии ис-

пользует два источника – солнце и ветер. Его гибкость является ключевым моментом в дизайне, так как это позволяет эффективно отслеживать солнце для оптимального сбора солнечной энергии. Конструкция солнечного паруса-крыла рассчитана на нагрузки при скорости ветра до 60 м/с. Аккумуляторные батареи выполняют роль твердого балласта, аккумулированной энергии в них достаточно для использования без подзарядки в течение одной недели.

Таблица 1. Основные характеристики судов с фотоэлектрическими панелями
Table 1. Key characteristics of vessels with photovoltaic panels

№ п/п	Наименование судна	Тип корпуса	L , м	B , м	T , м	v_s , узлы	S_{SP} , м ²
1	Soelcat 12	катамаран	11,80	5,80	0,70	8,0–14,0	62,0
2	Soel Shuttle 14	катамаран	14,50	5,10	0,65	9,0–14,0	8,0
3	Soel Senses 62	катамаран	18,80	10,30	0,96	10,0–14,0	120,0
4	Soel Senses 48	катамаран	14,50	5,10	0,70	10,0–18,0	42,0
5	Soel Cruiser	катамаран	10,80	4,60	0,85	11,0–14,0	6,0
6	Solar Sailor Gili Keta-pang	катамаран	14,12	5,00	1,20	8,0–9,0	40,0
7	Solar Sailor Ocean Navigator	катамаран	19,55	8,40	1,04		45,0
8	Solar Sailor HK Tour-ist	катамаран	23,95	6,50	1,25	9,0	56,0
9	Solar Sailor One 2 three	катамаран	26,34	8,30	1,20		150,0
10	Solar Sailor Grahame Parker	тримаран	34,48	13,00	1,80	12,0	90,0
11	Solar Sailor Hong Kong Jockey	катамаран	23,95	6,50	1,25	16,0	44,0
12	Korona	однокорпусное	7,20	2,70	0,15	6,5	6,4
13	Volitan	катамаран	32,00	7,6-28,0	ок, 1,0	12,0–18,0	300,0
14	Genesis Solar	катамаран	15,40	5,73	0,32		30,0
15	Aquawatt 550	однокорпусное	5,50	1,84	0,40	4,7	12,0
16	Aquawatt 715	однокорпусное	7,15	2,25	ок, 0,5	8,0	32,0
17	SunCat 46	катамаран	14,00	5,00 (6,85)	1,20	7,5	30,0
18	Navalt Aditya	катамаран	21,00	7,00	0,95	5,5–7,5	140,0
19	Planet Solar	катамаран	31,00	15,00	1,55	10,0	537,0

Примечание. L – длина корпуса; B – ширина корпуса; T – осадка; S_{SP} – общая площадь фотоэлектрических панелей

Типичный паром, проект которого был разработан австралийской компанией «Solar Sailor», показан на рис. 1 [6].



Рис. 1. Общий вид пассажирского парома компании «Solar Sailor»
Fig. 1. General view of the Solar Sailor passenger ferry

Общие виды пассажирского парома с двумя крыльями показаны на рис. 2 [6].

Также широкое применение панелей с фотоэлементами получили круизные яхты премиум-класса. Типичным проектом такой яхты, работающей на солнечной энергии, является Soel Senses 62, серийно производимая компанией «Soel Yachts» [1, 2]. Для создания изящного 18-метрового корпуса катамаранного типа использован сэндвич-композит. В обычных погодных условиях дальность плавания судна на скорости до 10 узлов не ограничена. В ночное время скорость и дальность движения зависят от емкости батарей, количество которых может меняться опционно, в зависимости от потребностей владельца яхты.



Рис. 2. Общий вид пассажирского парома компании «Solar Sailor»
с двумя парусами-крыльями
Fig. 2. General view of the Solar Sailor passenger ferry with two wing-sails

На крыше яхты находится массив солнечных фотогальванических панелей мощностью 18,5 кВт. В стандартной комплектации они соединены с батареями емкостью 282 кВт/ч, яхта оснащена двумя электрическими двигателями мощностью 100 кВт каждый и способна идти на скоростях от 8 до 12 узлов.

В комплектацию яхты входит выдвижная крыша, 6-метровый гараж для водных мотоциклов, носовая и кормовая солнечные террасы. На яхте от 3 до 5 кают для гостей и 1 каюта для экипажа, кроме того, имеется кухня с легкой и компактной мебелью. Общий вид яхты показан рис. 3.

Анализ построенных судов позволяет дополнительно выделить еще несколько характерных особенностей этого типа судов:

- сравнительно небольшая наибольшая длина судна – не более 35 м, как правило не более 25 метров;
- относительно большая ширина судна: корпус катамаранного или тримаранного типа;
- наибольшая скорость хода не более 13 узлов, наиболее характерными являются скорости в диапазоне 7–10 узлов;
- назначение судов в основном пассажирские паромы или круизные яхты;
- «легкий» материал основного корпуса – алюминий-магний-сплав, композиты на основе стеклопластиков и т. п.;
- для нормального функционирования судна необходим запас энергии в аккумуляторных батареях, который способен обеспечить работу главного двигателя при экономичной скорости хода на всю дальность плавания, предусмотренную ТЗ;
- аккумуляторные батареи дополнительно выполняют роль твердого балласта.



Рис. 3. Общий вид круизной яхты Solarwave 62' турецкой судовой верфи «Nedship»
Fig. 3. General view of the Solarwave 62' cruise yacht built by the Turkish shipyard Nedship

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ ТИПОВ

Детальный анализ существующих архитектурных типов судов с фотоэлектрическими панелями в случае, когда солнечная энергия является основной или представляет значительную составляющую в общем энергетическом балансе судна, позволяет выделить пять принципиальных архитектурных типов. Их устройство и основные элементы преимущественно определяются конструктивными особенностями «солнечных» панелей.

Тип I: для размещения фотоэлектрических панелей используются открытые участки палуб, свободные от палубного оборудования. Боковые поверхности не задействованы, форма надстройки имеет традиционный вид для данного, с точки зрения функциональности, типа судов. Дополнительные конструкции для увеличения площадей панелей не применяются. Общая площадь панелей составляет $(0,34...0,98) LB$, где L – наибольшая длина корпуса, B – наибольшая ширина корпуса. Общий вид архитектурного типа I представлен на рис. 5. Здесь и далее на рисунках районы размещения панелей показаны оранжевой штриховкой.

Тип II: для размещения фотоэлектрических панелей помимо открытых участков палуб также используются боковые поверхности. Форма надстройки может иметь полуциркульную и скругленную форму в местах перехода крыши надстройки в боковые поверхности. Дополнительные конструкции для увеличения площадей панелей не применяются. Общая площадь панелей составляет $(1,20...1,78) LB$. Общий вид архитектурного типа II представлен на рис. 6.

Тип III: здесь фотоэлектрические панели расположены горизонтально, выходят за габариты и опираются на специальные конструкции. Возможно решение конструкции в двух основных вариантах: подтип А – панели выносятся на кронштейнах как крылья (рис. 7), общая площадь панелей составляет $(0,77... 1,30) LB$; подтип В – панели лежат на крыше или расположены над ней (рис. 8), общая площадь панелей составляет $(1,04...1,30) LB$.

Тип IV: помимо размещения на открытых палубах (как правило на крыше возвышенной рубки, на рисунках показано фиолетовой штриховкой) панели располагаются на вертикальном крыле-парусе. В данном и для типа V размещение на открытых палубах не всегда применяется. Конструкция может быть как стационарная, так и с возможностью флюгирования вокруг своей оси или укладки крыла на палубу. Поворот фотоэлектрических панелей может обеспечивать отслеживание движения солнца по азимуту. Общая площадь панелей составляет $(0,45...1,05) LB$. Общий вид архитектурного типа IV представлен на рис. 9.

Тип V: аналогичен типу IV, но количество крыльев два и более. Общая площадь панелей составляет $(0,64...1,18) LB$. Общий вид архитектурного типа V показан на рис. 10.

На рис. 4 представлена диаграмма, демонстрирующая относительное покрытие поверхности судна фотоэлектрическими панелями в зависимости от выбранного архитектурного типа.

Анализ диаграммы показывает, что максимальное относительное покрытие достигается при использовании архитектурного типа II, тогда как минимальное – при типе I.

Тем не менее необходимо учитывать, что «эффективная» площадь панелей, то есть та, которая активно функционирует в определенный момент времени, может существенно отличаться от общей установленной площади. Эффективность определяется такими условиями, как положение солнца, попадание прямых солнечных лучей, а также затененные участки и зоны самозатенения. В частности, для архитектурных типов IV и V, несмотря на относительно низкий коэффициент покрытия корпуса панелями, их эффективность может быть значительно выше по сравнению со стационарными решениями за счет применения систем слежения за солнцем.

Определение эффективной площади фотоэлектрических панелей для различных архитектурных типов является предметом отдельного исследования и не рассматривается в рамках данной работы.

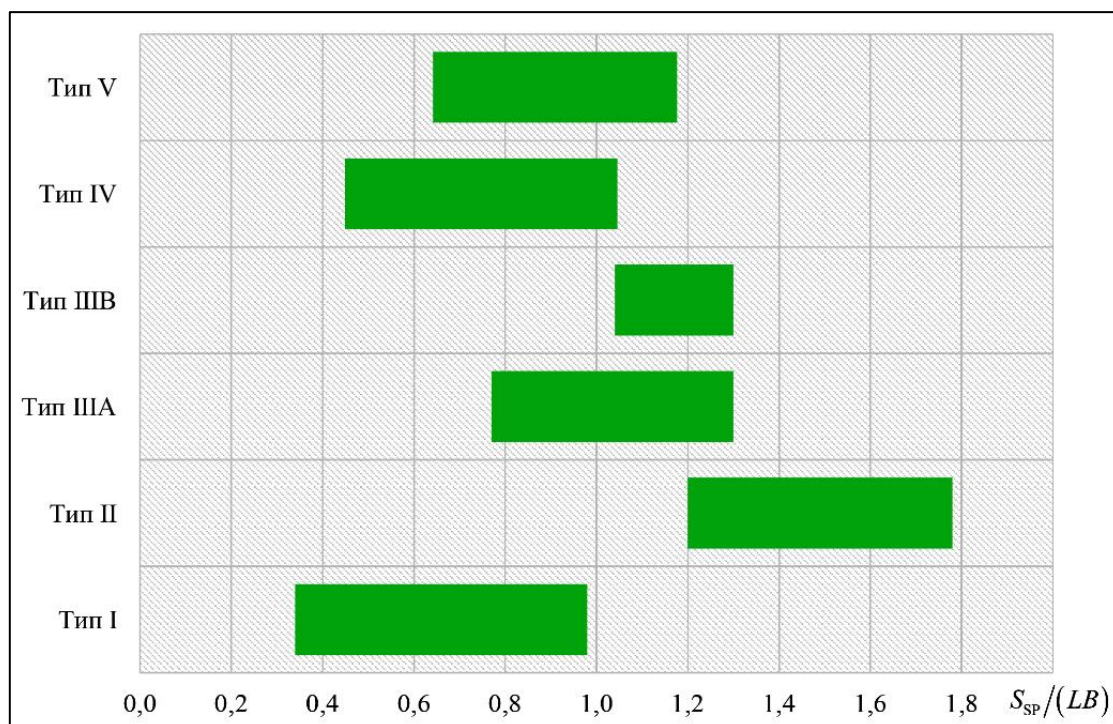


Рис. 4. Диаграмма относительного покрытия судна фотоэлектрическими панелями; S_{SP} – общая площадь фотоэлектрических панелей, LB – произведение наибольшей длины корпуса на ширину

Fig. 4. Diagram showing the relative coverage of the ship with photovoltaic panels; S_{SP} – total area of photovoltaic panels, LB – product of the maximum length of the hull and its width

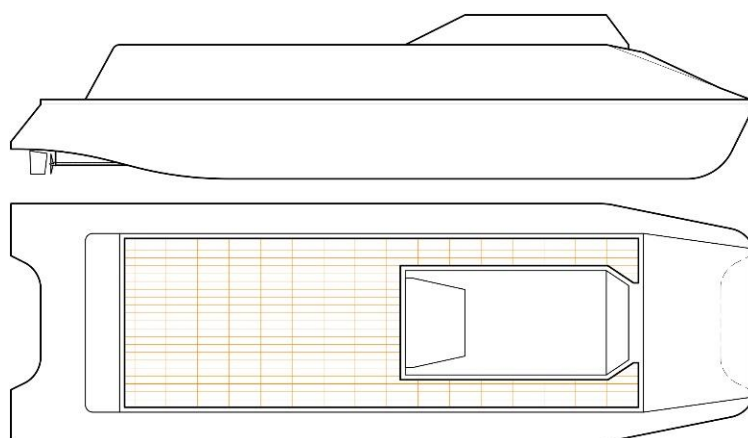


Рис. 5. Общий вид архитектурного типа I
Fig. 5. General view of the architectural type I

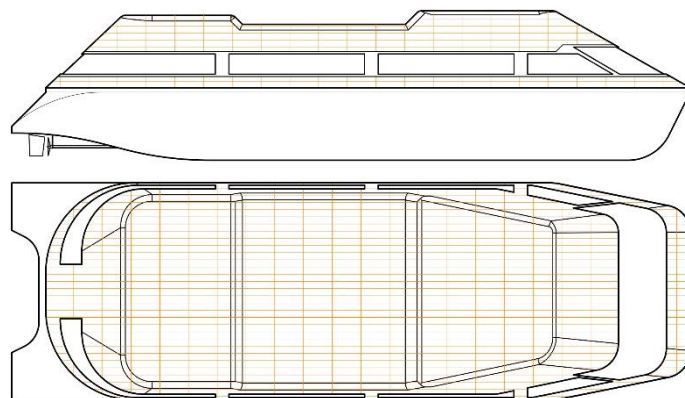


Рис. 6. Общий вид архитектурного типа II
Fig. 6. General view of the architectural type II

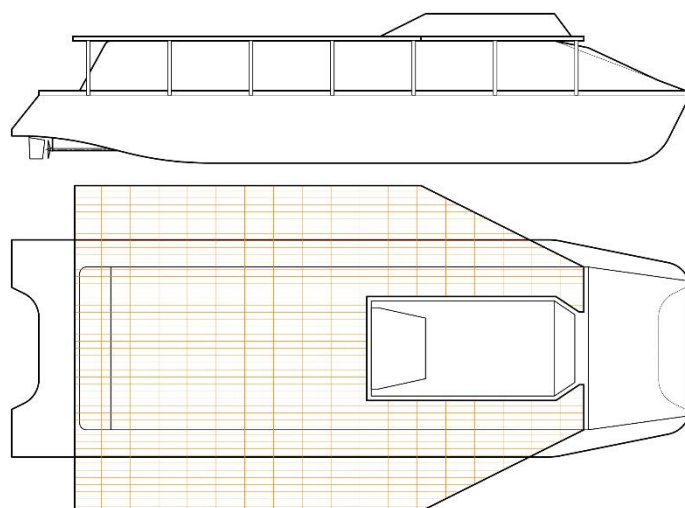


Рис. 7. Общий вид архитектурного типа III, подтип А
Fig. 7. General view of the architectural type III, subtype A

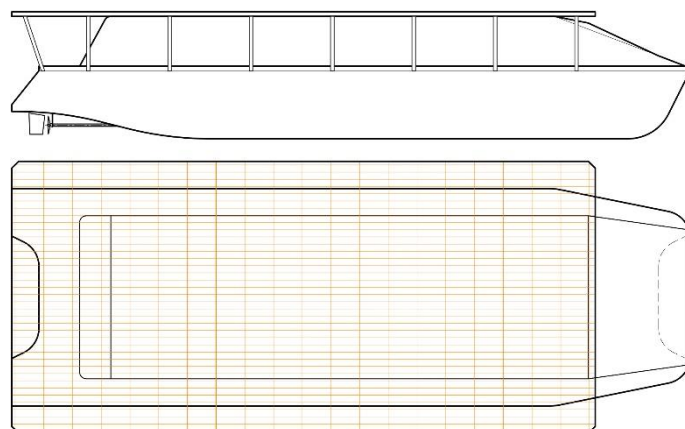


Рис. 8. Общий вид архитектурного типа III, подтип В
Fig. 8. General view of the architectural type III, subtype B

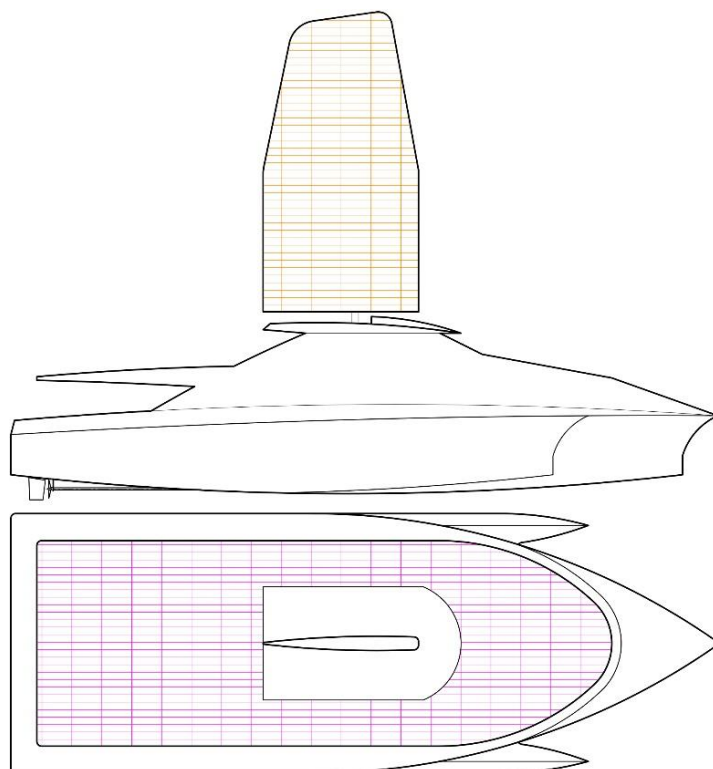


Рис. 9. Общий вид архитектурного типа IV
Fig. 9. General view of the architectural type IV

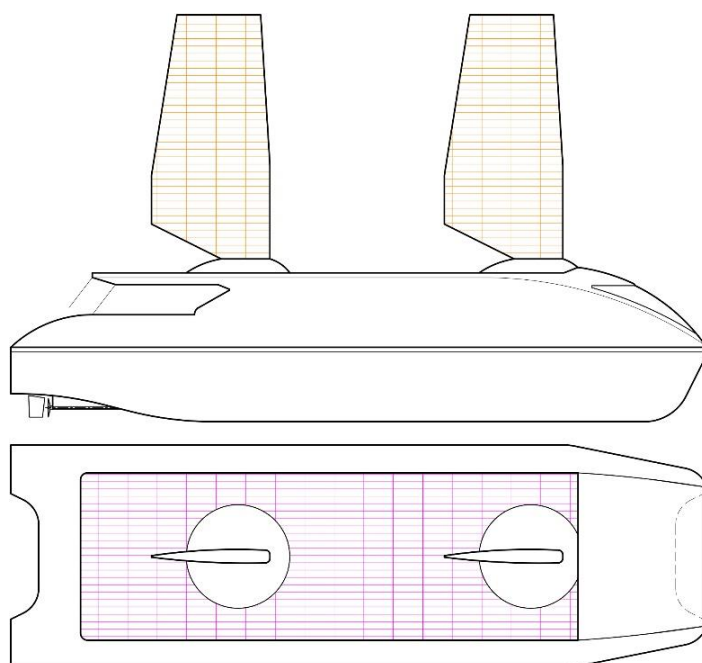


Рис. 10. Общий вид архитектурного типа V
Fig. 10. General view of the architectural type V

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлена классификация судов с фотоэлектрическими панелями, использующими солнечную энергию в качестве основного источника. Анализ архитектурных признаков таких судов позволил выделить пять основных типов, различающихся по способу размещения и площади фотоэлектрических панелей.

Максимальное относительное покрытие поверхности судна панелями достигается при использовании типа II (палубы и боковые поверхности), однако «эффективная» площадь может быть выше у типов IV и V за счет систем слежения за солнцем. Определение эффективной площади фотоэлектрических панелей для различных архитектурных типов является предметом отдельного исследования, которое авторы собираются провести в будущем.

В статье подчеркивается актуальность и перспективность использования солнечной энергии в морском транспорте, выявлены существующие проблемы в проектировании и предлагается системный подход к их решению через классификацию архитектурных типов судов с фотоэлектрическими панелями.

Список источников

1. Марончук, И. И., Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Саникович, В. И. Мирончук. – DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 105–123.
2. Ahmad, K. Incorporating perovskites in photovoltaic-powered electrochemical cells for a sustainable future: an inclusive review / K. Ahmad. – DOI: 10.1016/j.solener.2024.112965 // Solar Energy. – 2024. – Vol. 282. – P. 1–23.
3. Soel Senses 62. – Текст: электронный // Технический паспорт: сайт. – URL: https://www.soelyachts.com/press/SoelSenses62_TechnicalSheet.pdf (дата обращения: 10.02.2026).
4. Каплина, В. В. Методика расчета запаса хода электромоторной лодки на солнечной энергии / В. В. Каплина. – DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4589 // Инжиниринг георесурсов. Известия Томского политехнического университета. – 2025. – Т. 336, № 1. – С. 139–146.
5. Minak, G. Solar Energy-Powered Boats: State of the Art and Perspectives / G. Minak. – DOI: 10.3390/jmse11081519 // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 1519–1537.
6. Hirdaris, S. E. The Role of Technology in Green Ship Design / S. E. Hirdaris, F. Cheng // The role of technology in the design of environmentally friendly ships: materials 11th International Marine Design Conference (Scotland, 11–14 June 2012) / Department of Ship Architecture and more. eng. Strat. University. – Scotland: Ph DNAMEs, 2012. – Vol. 1. – P. 21–40.
7. Uroda, T. Design, production, testing and exploitation of solar coastal passenger ferry / T. Uroda. – DOI: 10.21278/brod71207 // Journal of Energy. – 2021. – Vol. 71, № 2. – P. 111–121.
8. Kumarasamy, S. Offshore floating solar with electrofuels for refuelling small ferries: a techno-economic-environmental study / S. Kumarasamy. – DOI:

10.1016/j.ecmx.2025.101234 // Energy Conversion and Management. – 2025. – Vol. 28, № 101234. – P. 1–19.

9. Кирпичникова, И. М. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды / И. М. Кирпичникова, И. Б. Махсумов. – DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.05 // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 56–74.

10. Chatzipanagi, A. An Updated Simplified Energy Yield Model for Recent Photovoltaic Module Technologies / A. Chatzipanagi. – DOI: 10.1002/pip.70025 // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2025. – Vol. 33, № 4. – P. 511–528.

11. Sepúlveda-Oviedo, E. H. Impact of environmental factors on photovoltaic system performance degradation / E. H. Sepúlveda-Oviedo. – DOI: 10.1016/j.esr.2025.101682 // Energy Strategy Reviews. – 2025. – Vol. 59. – P. 1–21.

12. Yang, H. A Comprehensive Review of Solar Panel Performance Degradation and Adaptive Mitigation Strategies / H. Yang, Y. Yin. – DOI: 10.1049/cth2.70040 // IET Control Theory & Applications. – 2025. – Vol. 19, № 70040. – P. 1–20.

13. Кирпичникова, И. М. Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях / И. М. Кирпичникова. – DOI: 10.54398/20741707_2022_127 // Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность. – 2021. – С. 46–55.

14. Tian, X. Optical-electrical-thermal model of flexible non-planar photovoltaic modules: Decoupling, validation, and photoelectric performance analysis / X. Tian. – DOI: 10.1016/j.energy.2025.134843 // Energy. – 2025. – Vol. 318. – P. 1–24.

15. Патент № 2772101 С1. Российская Федерация. Устройство для автоматической очистки фотоэлектрических модулей в условиях повышенной запыленности: № 2022101234: заявл. 20.01.2022: опубл. 17.05.2022 / Р. Р. Каримов, И. Ф. Сулейманов. – 10 с.

References

1. Maronchuk, I. I., Solar cells: current state and development prospects / I. I. Maronchuk, D. D. Sanikovich, V. I. Mironchuk. – DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123 // Energy. Izvestia of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS. – 2019. – Vol. 62, № 2. – P. 105–123.

2. Ahmad, K. Incorporating perovskites in photovoltaic-powered electrochemical cells for a sustainable future: An inclusive review / K. Ahmad. – DOI: 10.1016/j.solener.2024.112965 // Solar Energy. – 2024. – Vol. 282. – P. 1–23.

3. Soel Senses 62. – Text: electronic // Technical data sheet: site. – URL: https://www.soelyachts.com/press/SoelSenses62_TechnicalSheet.pdf (accessed on 02.10.2026).

4. Kaplina, V. V. Methodology for calculating the power reserve of an electric motor boat powered by solar energy / V. V. Kaplina. – DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4589 // Engineering of georesources. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. – 2025. – Vol. 336, № 1. – P. 139–146.

5. Minak, G. Solar Energy-Powered Boats: State of the Art and Perspectives / G. Minak. – DOI: 10.3390/jmse11081519 // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 1519–1537.

6. Hirdaris, S. E. The Role of Technology in Green Ship Design / S. E. Hirdaris, F. Cheng // The role of technology in the design of environmentally friendly ships: materials of the 11th International Marine Design Conference (Scotland, 11–14 June 2012) / Department of Ship Architecture and more. eng. Strat. University – Scotland: Ph DNAMES. – 2012. – Vol. 1. – P. 21–40.
7. Uroda, T. Design, production, testing and exploitation of solar coastal passenger ferry / T. Uroda. – DOI: 10.21278/brod71207 // Journal of Energy. – 2021. – Vol. 71, № 2. – P. 111–121.
8. Kumarasamy, S. Offshore floating solar with electrofuels for refuelling small ferries: a techno-economic-environmental study / S. Kumarasamy. – DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.101234 // Energy Conversion and Management. – 2025. – Vol. 28, № 101234. – P. 1–19.
9. Kirpichnikova, I. M. Construction of energy characteristics of solar modules taking into account environmental conditions / I. M. Kirpichnikova, I. B. Makhsumov. – DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.05 // Bulletin of the Perm State Technical University. Electrical engineering, information technology, control systems. – 2020. – № 34. – P. 56–74.
10. Chatzipanagi, A. An Updated Simplified Energy Yield Model for Recent Photovoltaic Module Technologies / A. Chatzipanagi. – DOI: 10.1002/pip.70025 // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2025. – Vol. 33, №. 4. – P. 511–528.
11. Sepúlveda-Oviedo, E. H. Impact of environmental factors on photovoltaic system performance degradation / E. H. Sepúlveda-Oviedo. – DOI: 10.1016/j.esr.2025.101682 // Energy Strategy Reviews. – 2025. – Vol. 59. – P. 1–21.
12. Yang, H. A Comprehensive Review of Solar Panel Performance Degradation and Adaptive Mitigation Strategies / H. Yang, Y. Yin. – DOI: 10.1049/cth2.70040 // IET Control Theory & Applications. – 2025. – Vol. 19, № 70040. – P. 1–20.
13. Kirpichnikova, I. M. Features of the operation of solar power plants in various climatic conditions / I. M. Kirpichnikova. – DOI: 10.54398/20741707_2022_127 // Energy efficiency. Cenology. Ecology and energy security. – 2021. – P. 46–55.
14. Tian, X. Optical-electrical-thermal model of flexible non-planar photovoltaic modules: Decoupling, validation, and photoelectric performance analysis / X. Tian. – DOI: 10.1016/j.energy.2025.134843 // Energy. – 2025. – Vol. 318. – P. 1–24.
15. Patent № 2772101 C1. Russian Federation. Device for automatic cleaning of photovoltaic modules in conditions of high dust: № 2022101234; application 20.01.2022; published 17.05.2022 / R. R. Karimov, I. F. Suleymanov. – 10 p.

Информация об авторах

Д. Ю. Несин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Океанотехника и инновационное судостроение»

Г. С. Остюченко – магистрант 2-го курса кафедры «Океанотехника и инновационное судостроение»

Information about the authors

D. Yu. Nesin – Candidate of Technical sciences., Associate Professor, Department of Ocean Engineering and Innovative Shipbuilding

G. S. Ostyuchenko – 2nd year Master's student, Department of Ocean Engineering and Innovative Shipbuilding

Вклад авторов

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

Contribution of the authors

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

Статья поступила в редакцию 13.05.2026; одобрена после рецензирования 23.05.2026; принята к публикации 07.06.2026.

The article was submitted 13.05.2026; approved after reviewing 23.05.2026; accepted for publication 07.06.2026.

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

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

Редактор С. В. Супрунова

Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
Лицензия № 05609 от 14.08.2001
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «КГТУ»
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
Подписано в печать 29.07.2026. Выход в свет 01.08.2026. Формат 60 x 88 (1/8).
Печ. л. 14,4. Уч.-изд. л. 9,2. Тираж 1000 экз. Заказ № 35.