

ИЗВЕСТИЯ

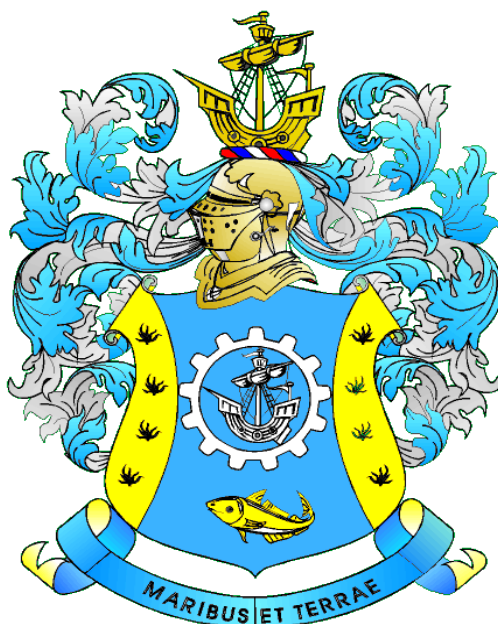
КГТУ

2026

№ 80

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

Научный журнал



Индексирование журнала, включение в базы данных

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

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Agricultural Research Information System (Agris)

Калининград

Редакционная коллегия:

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

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

Члены редакционной коллегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Н. Л. Великанов, д-р техн. наук, проф. 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., Калининградский институт переподготовки кадров агробизнеса, 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;

С. В. Супрунова, выпускающий редактор;

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

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

Е. В. Ульрих, д-р техн. наук, 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 имени И. Канта, г. Калининград, Россия.

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

тел.: (4012) 99-59-01, 99-59-10, 99-59-74; факс: (4012) 91-68-46;

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

© ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
2026



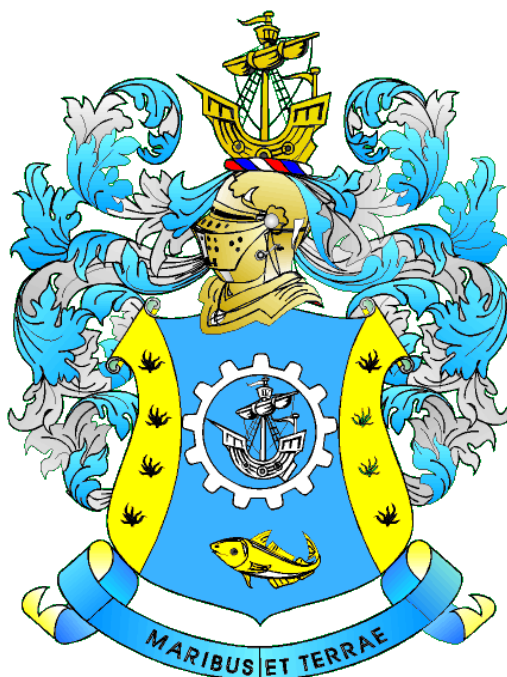
KSTU NEWS

2026

№ 80

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

<i>Василискова А. В., Кондратенко С. В.</i> Комплексность мониторинга водных экосистем вблизи полигонов твердых коммунальных отходов	11
<i>Овчарук А. С., Судник С. А.</i> Размеры, половой состав, особенности морфологии краба Харриса, <i>Rhithropanopeus harrisi</i> (Gould, 1841) (Brachyura: Raporeidae), Таманский залив, 2021 г.	24
<i>Ражев А. О., Недоступ А. А., Насенков П. В., Коновалова К. В.</i> Гидромеханика тралового мешка: расчет формы и нагрузок при различной ориентации ячеек в потоке жидкости	38
<i>Чижова А. А., Буденкова Е. А., Шушарин В. С., Дышлюк Л. С.</i> Влияние концентрации макроэлементов на рост, содержание фотосинтетических пигментов и состав жирных кислот микроводоросли <i>Scenedesmus rubescens</i>	50

Техника и технология пищевых производств

<i>Воробьев В. И., Нижникова Е. В., Чернега О. П.</i> Овсяные шарики и печенье-мюсли без термообработки с сокодержащим рыбным коллагеновым желе	67
<i>Корниенко А. А., Лютова Е. В.</i> Исследование качества безглютенового печенья методами органолептического анализа	78

Судостроение, машиностроение и энергетика

<i>Житников А. А., Марченко А. А.</i> Разработка прототипа устройства идентификации неисправности информационно-измерительного канала частоты оборотов двигателя внутреннего сгорания	95
<i>Ражев А. О., Недоступ А. А., Насенков П. В., Коновалова К. В.</i> Численное моделирование гидродинамики осесимметричной сетной конструкции методом «вихрь – функция тока»	110

CONTENT

Biology, ecology and fisheries

Vasiliskova A. V., Kondratenko S. V. Integrated approach in monitoring aquatic ecosystems near municipal solid waste landfills	11
Ovcharuk A. S., Sudnik S. A. Size, sex ratio, and morphological features of Harris crab, <i>Rhithropanopeus harrisii</i> (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae), Taman Bay, 2021	24
Razhev A. O., Nedostup A. A., Nasenkov P. V., Konovalova K. V. Hydrodynamics of the trawl codend: shape and loads calculation at different mesh orientations in fluid flow	38
Chizhova A. A., Budenkova E. A., Shusharin V. S., Dyshlyuk L. S. Influence of macronutrient concentration on the growth, photosynthetic pigment content, and fatty acid composition of the microalga <i>Scenedesmus rubescens</i>	50

Processes and technology of food manufacturing

Vorobev V. I., Nizhnikova E. V., Chernega O. P. Uncooked oatmeal balls and granola cookies with juice-containing fish collagen jelly	67
Kornienko A. A., Lyutova E. V. Study of the quality of gluten-free biscuits using sensory analysis methods	78

Shipbuilding, machine manufacturing and power engineering

Zhitnikov A. A., Marchenko A. A. Development of a prototype device for identifying a malfunction of the information-measuring channel of the internal combustion engine speed	95
Razhev A. O., Nedostup A. A., Nasenkov P. V., Konovalova K. V. Numerical simulation of hydrodynamics of an axisymmetric grid structure using the "vortex – current function" method	110

БИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ И РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья
УДК 504.064.36
DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-11-23

Комплексность мониторинга водных экосистем вблизи полигонов твердых коммунальных отходов

Александра Владимировна Василискова¹✉, Сергей Валентинович Кондратенко²

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

¹ aleksandra.minashkina@klgtu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8002-5731>

² sergej.kondratenko@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6870-4889>

Аннотация. Для оценки состояния экологической ситуации важную роль играет полноценный мониторинг водных экосистем, включающий контроль всех компонентов: воды, донных отложений и гидробионтов. Разработанный и предложенный мониторинг является универсальным инструментом оценки техногенного воздействия на все компоненты водных экосистем, расположенных в зонах влияния полигонов и свалок отходов. Приведен перечень параметров и веществ, определяемых в ходе мониторинга, основанный на получении полноценной и достоверной информации, а также на оптимизации проведения исследования. Полученные результаты мониторингового исследования формируют знания об особенностях накопления загрязняющих веществ, входящих в состав фильтрата полигонов в водных экосистемах. Определены наиболее подходящие индексы для расчета загрязненности и определения степени трофности вод. Накопление загрязняющих веществ в водных экосистемах происходит преимущественно в донных отложениях и тканях гидробионтов, что связано с механизмом самоочищения и происходящими процессами внутри водоемов. Органические вещества подвергается окислению за счет растворенного в воде кислорода, часть загрязняющих веществ задерживают гидробионты-фильтраторы, далее накопление идет в пищевой цепочке. Оставшаяся часть загрязняющих веществ осаждается на дно, где накапливается в донных осадках. Близкое расположение полигонов и свалок к водным объектам, а также проектирование и эксплуатация полигонов без учета противифильтрационных природозащитных экранов являются значительными факторами для техногенной трансформации природной среды.

Ключевые слова: мониторинг, водные экосистемы, полигон ТКО, зоопланктон, зообентос, тяжелые металлы, гидробионты, фильтрат.

Для цитирования: Василискова А. В., Кондратенко С. В. Комплексность мониторинга водных экосистем вблизи полигонов твердых коммунальных отходов // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 11–23. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-11-23.

Original article

Integrated approach in monitoring aquatic ecosystems near municipal solid waste landfills

Aleksandra V. Vasiliskova^{1✉}, Sergey V. Kondratenko²

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

¹ aleksandra.minashkina@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8002-5731>

² sergej.kondratenko@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6870-4889>

Abstract. A full-fledged monitoring of aquatic ecosystems (including control of all components: water, sediments and aquatic organisms) plays an important role in the assessment of the ecological situation. The developed and proposed monitoring is a universal tool for assessing the anthropogenic impact on all components of aquatic ecosystems located in the zones of influence of landfills. The list of parameters and substances determined during monitoring is given, based on obtaining complete and reliable information, as well as optimizing the study. The obtained results of the monitoring form knowledge about the features of accumulation of pollutants, which are part of the leachate, in aquatic ecosystems. The most suitable indices for calculating pollution and determining the degree of trophic waters have been determined. Accumulation of pollutants in aquatic ecosystems occurs mainly in sediments and tissues of aquatic organisms, this is due to the mechanism of self-purification and processes occurring inside reservoirs. Organic substances are oxidized due to oxygen dissolved in water, some of the pollutants are trapped by hydrobiont filters, and further accumulation proceeds according to the food chain. The remaining part of the pollutants is deposited at the bottom, where it accumulates in the bottom sediments. The proximity of landfill sites and grounds to water bodies, as well as the design and operation of landfills without taking into account anti-filtration environmental shields, is a significant factor for the man-made transformation of the natural environment.

Keywords: monitoring, aquatic ecosystems, SMW landfill, zooplankton, zoobenthos, heavy metals, aquatic organisms, leachate.

For citation: Vasiliskova A. V., Kondratenko S. V. Integrated approach in monitoring aquatic ecosystems near municipal solid waste landfills. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(80):11-23. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-11-23.

ВВЕДЕНИЕ

Водным кодексом Российской Федерации [1] дается определение мониторинга водных объектов, где указано, что это система наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния водных объектов.

Мониторинг водных объектов, как правило, может проводиться с целью:

- выявления и прогнозирования негативного воздействия вод, а также развития негативных процессов, влияющих на качество воды в водных объектах и их состояние, разработки и реализации мер по предотвращению негативных последствий этих процессов;
- оценки эффективности осуществляемых мероприятий по охране водных объектов;

– информационного обеспечения управления в области использования и охраны водных объектов.

Мониторинг водных объектов может включать в себя:

- регулярные наблюдения за состоянием водных объектов, их количественными и качественными показателями;
- сбор, обработку и хранение сведений, полученных в результате наблюдений;
- оценку и прогнозирование изменений состояния водных объектов, их количественных и качественных показателей.

Тем же Водным кодексом установлено, что мониторинг водных объектов включает:

- мониторинг поверхностных водных объектов с учетом данных мониторинга, осуществляемого при проведении работ в области гидрометеорологии и смежных с ней областях;
- мониторинг состояния дна и берегов водных объектов, а также состояния водоохраных зон;
- мониторинг подземных вод с учетом данных государственного мониторинга состояния недр;
- наблюдения за водохозяйственными системами, в том числе за гидротехническими сооружениями, а также за объемом вод при водопотреблении и их сбросе, в том числе сбросе в водные объекты.

Однако особенность воздействия полигонов отходов на окружающую среду предполагает более токсический эффект ввиду специфичного и нестабильного состава фильтрата полигонов [2]. Фильтрат (фильтрационные воды) полигонов, поступая в окружающую среду, например, в водные экосистемы, влияет не только на изменение гидрохимических показателей вод, но и на самих гидробионтов. Тяжелые металлы, входящие в состав фильтрата, могут накапливаться в тканях и органах рыб [3].

Функционирующие полигоны и свалки твердых коммунальных и промышленных отходов являются частью геологической среды и развиваются по законам геологического пространства. В природных экосистемах отходы не накапливаются, а разлагаются и поступают в круговорот веществ. Для снижения уровня воздействия полигонов отходов на окружающую среду необходимо управлять процессом захоронения отходов, вести непрерывный экологический мониторинг всех геосферных оболочек – литосферы, биосферы, гидросферы и атмосферы, на которые оказывают воздействие существующие полигоны [4].

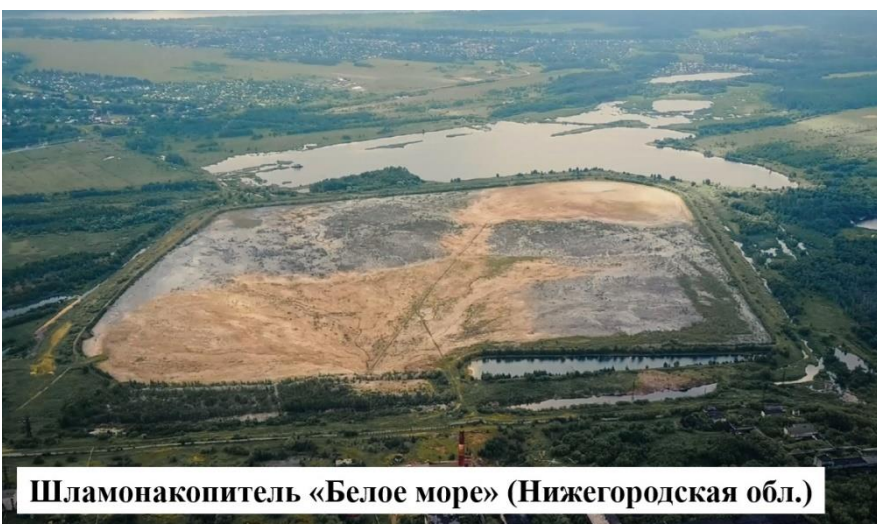
Изображения некоторых крупнейших мест размещения отходов в России представлены на рис. 1.



Полигон «Красный Бор» (Ленинградская обл.)



Рекультивированный полигон (Калининградская обл.)



Шламоаккумулятор «Белое море» (Нижегородская обл.)



Рис. 1. Места размещения отходов в России
Fig. 1. Waste disposal sites in Russia

Мониторинг полигонов твердых коммунальных отходов – это система наблюдений за состоянием и загрязнением окружающей среды на территориях объектов размещения отходов. Мониторинг проводят владельцы полигонов и лица, в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, на основании утвержденной программы [5]. Целями такого мониторинга являются:

- предотвращение ущерба окружающей среде из-за загрязнения почвы, грунтовых вод и воздуха отходами, которые могут содержать опасные вещества;
- минимизация риска заболеваний и отравлений из-за экологических проблем, связанных с выбросами и отходами с полигонов;
- сбор и анализ данных о состоянии окружающей среды и трендах загрязнения, что позволяет оптимизировать процессы обращения с отходами, разрабатывать новые технологии и методы управления отходами [6, 7].

Таким образом, мониторинг полигонов ведется на территории самих полигонов. Анализируются пробы атмосферного воздуха, свалочных грунтов, почв, подземных вод из скважин, при этом программой мониторинга полигона не предусмотрены наблюдения за состоянием водных объектов, расположенных вблизи мест размещения отходов. Мы же предлагаем расширить программу мониторинговых наблюдений за состоянием окружающей среды вблизи полигонов отходов в части более подробного исследования водных объектов, не ограничивающихся только гидрохимическими исследованиями. Так как гидрохимические показатели подвержены частой изменчивости, предлагается найти более «устойчивый и интегральный» показатель, которым могут стать показатели биоты водных экосистем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для экологической оценки состояния водных экосистем были проанализированы все свалки и полигоны отходов в Калининградской области и выбран

наиболее подходящий по своим характеристикам полигон для апробирования комплексного мониторинга влияния фильтрационных вод полигонов на водные экосистемы [8]. Были определены водные объекты, предположительно подвергавшиеся негативному воздействию полигонов отходов, и фоновый водный объект. Схема расположения полигона и водных объектов представлена на рис. 2.

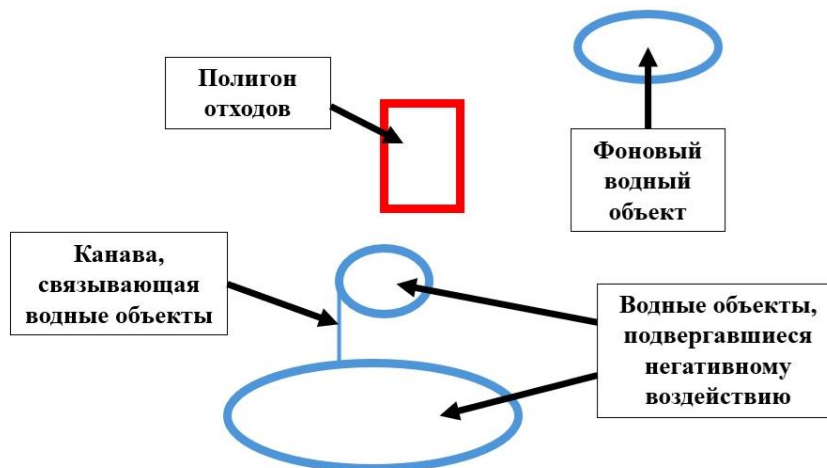


Рис. 2. Схема расположения водных объектов по отношению к полигону отходов
Fig. 2. Layout of water bodies in relation to the landfill

Сам мониторинг проводился в период с 2019 по 2022 гг. и включал в себя физико-химические испытания фильтрационных вод полигона отходов, поверхностных вод, донных отложений.

Также отбирались и анализировались пробы зоопланктона, зообентоса и фитопланктона (концентрация хлорофилла, сумма «а», «b» и «с1+с2»). Помимо этого, проводился отлов гидробионтов (рыб) для видовой характеристики ихтиофауны водных экосистем и определения концентрации тяжелых металлов в тканях рыб. Перечень определяемых веществ и параметров в компонентах исследуемых водных экосистем и фильтрате полигона представлен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень определяемых веществ и параметров в компонентах исследуемых водных экосистем и фильтрате полигона
Table 1. List of detectable substances and parameters in the components of the studied aquatic ecosystems and the leachate of the landfill

№ п/п	Наименование компонента	Определяемые вещества и параметры
1	2	3
1	Фильтрат полигона	температура, pH, перманганатная окисляемость, углекислый газ, гидрокарбонаты, кальций, магний, жесткость, азот аммонийный, нитриты, нитраты, фосфор (общ.), фосфор фосфатный, железо (общ.), хлориды, сульфаты, щелочность, общая минерализация, взвешенные вещества, сухой остаток, химическое потребление кислорода, биохимическое потребление кислорода за 5 суток, медь, натрий, ртуть, свинец, литий

Окончание таблицы 1

1	2	3
2	Поверхностные воды	температура, pH, перманганатная окисляемость, углекислый газ, гидрокарбонаты, кальций, магний, жесткость, азот аммонийный, нитриты, нитраты, фосфор (общ.), фосфор фосфатный, железо (общ.), хлориды, сульфаты, щелочность, общая минерализация, электропроводимость, растворенный кислород (мг/дм ³ ;%), химическое потребление кислорода, биохимическое потребление кислорода за 5 суток, медь, натрий, ртуть, свинец, литий
3	Донные осадки	нефтепродукты, медь, ртуть, свинец, железо
4	Гидробионты (рыба)	качественные и количественные параметры, свинец, ртуть, железо, медь в тканях
5	Фитопланктон	концентрация хлорофилла («a», «b», «c1+c2»)
6	Зоопланктон	качественные и количественные параметры
7	Зообентос	качественные и количественные параметры

Для получения более точной экологической характеристики водного объекта использовались индикаторный и индексный методы. Применялись такие индексы: индекс загрязненности фильтрата, индекс загрязненности вод, удельный комбинаторный индекс загрязненности вод, индекс сапробности Пантле–Букка в модификации Сладечека, индекс видового разнообразия Шеннона, хирономидный индекс Балушкиной, олигохетный индекс Гуднай-Уотля, биотический индекс Вудивисса и интегральный показатель Балушкиной.

Использование всех вышеперечисленных индексов было сделано еще и с целью установления того, какой из них более всего подходит для такого рода мониторинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования была установлена специфичность и нестабильность химического состава фильтрационных вод полигона отходов. Рассчитанный индекс загрязненности фильтрата показал снижение концентраций загрязняющих веществ в период проведения комплексного мониторинга, что коррелирует с литературными данными [9–13]. На сегодняшний день, по достижении фазы стабильного метаногенеза, полигон и его фильтрат характеризуются как малоопасные, что подтверждается проведенными расчетами. Фазы жизненного цикла полигона и биодеструкции отходов представлены в табл. 2.

Гидрохимические показатели вод изменяются в зависимости от сезонности и гидрологических особенностей водного объекта. Рассчитанные гидрохимические индексы (индекс загрязненности вод, удельный комбинаторный индекс загрязненности вод) не выявили критического состояния водных экосистем, исследуемые воды можно охарактеризовать как «умеренно загрязненные». Нагляднее был удельный комбинаторный индекс загрязненности вод в сравнении с индексом загрязненности.

Таблица 2. Фазы жизненного цикла полигонов и биодеструкции отходов
Table 2. Phases of the landfill life cycle and waste biodegradation

Фаза	Наименование	Характеристика
1	2	3
I	Аэробная деструкция и гидролиз	Длится несколько месяцев. Гидролиз и окисление пищевых отходов. Большинство металлов подвергаются коррозии с кислородной деполяризацией. Кислоты, образующиеся при окислении органических соединений, способствуют растворению металлов и переходу их в фильтрат. Окисление и разложение отходов сопровождается выделением тепла, поэтому температура тела полигона может достигать 80 °С. Рост температуры и присутствие антимикробных соединений абиотического происхождения приводят к гибели или инаktivации патогенных микроорганизмов, личинок насекомых.
II	Ацетогенез	Длится от 1 года до 4 лет, происходит дальнейший распад быстро- и среднеразлагаемых фракций отходов, основными продуктами являются уксусная и пропионовая кислоты, углекислый газ и вода; значительное снижение pH фильтрата и ускорение процессов деструкции, гидролиза древесины, целлюлозы, некоторых видов пластмасс, синтетических волокон. В кислой среде активные металлы (цинк, железо, никель, хром, кадмий и др.) окисляются ионами водорода. Ионы металлов образуют устойчивые комплексные соединения с органическими соединениями, а также осаждаются в виде карбонатов, фосфатов. Фильтрат в этот период характеризуется высокими значениями химического потребления кислорода, биохимического потребления кислорода и концентрацией ионов тяжелых металлов.
III	Активный метаногенез	Длится до 30 лет с момента депонирования, в этот период протекает ферментативное разложение образованных в ацетогенной фазе кислот, которое сопровождается значительным выделением газов и повышением pH среды. Происходит разложение целлюлозы и гемицеллюлозы с образованием биогаза и соединений гумусовой природы, полифенолов и др. В фильтрате снижается содержание органических веществ и увеличивается доля биорезистентных компонентов.
IV	Стабильный метаногенез	Длится до 100 лет. Снижаются скорость и величина эмиссии метана, основным источником загрязнения становится фильтрат. В щелочной среде протекают ферментативный гидролиз лигнина с образованием ароматических и жирных кислот, дальнейшая биодegradация целлюлозы и химическая деструкция трудно разлагаемых фракций отходов. Фильтрат характеризуется высоким содержанием биорезистентных компонентов и повышенной минерализацией.

Окончание таблицы 2

1	2	3
V	Ассимиляция	Затухают все процессы разложения, отходы стабилизируются в массиве захоронения. Наступает постепенно в течение 50–100 лет на пострекультивационном этапе жизненного цикла. Протекает в условиях недостатка кислорода, повышенной температуры и влажности. Характерный признак наступления фазы – наличие более 50 % метана в пробах биогаза. Органические вещества трансформируются в газообразную (биогаз), жидкую (фильтрат) и твердую (разложившуюся массу) фракции.

Наиболее показательными были расчеты гидробиологических индексов для зообентоса, так как он более постоянен и его жизненный цикл длиннее, чем зоопланктона. Идентифицированные пробы зообентоса в пробах исследуемых водных объектов позволяют отнести водные объекты к тому же классу сапробности, что и установленные по гидрохимической характеристике. В соответствии с ГОСТ 17.1.2.0477 [14] и на основании гидрохимических и гидробиологических показателей водоемы по классу сапробности относятся к категориям «чистые воды» (фоновый объект) и «загрязненные и грязные воды» (объекты, подвергавшиеся негативному воздействию).

Для определения трофического статуса водного объекта хорошо показал себя фитопланктон (концентрация хлорофилла, сумма «а», «b» и «с1+с2»). Сопоставление концентрации хлорофилла с трофическим статусом проводилось в соответствии с экологической классификацией поверхностных вод суши [15]. Было выявлено, что объекты, подвергавшиеся негативному воздействию полигона твердых коммунальных отходов, относились к более трофным водам, чем фоновый объект.

Исследование донных осадков водных экосистем определило особенности накопления тяжелых металлов. Наибольшие концентрации загрязняющих веществ наблюдались в водном объекте, который располагался ближе всего к полигону отходов и в канаве, соединяющей водные объекты.

При анализе концентраций тяжелых металлов в тканях гидробионтов (рыб) были выявлены закономерности накопления загрязняющих веществ соответственно пищевой цепочке (рис. 3.).

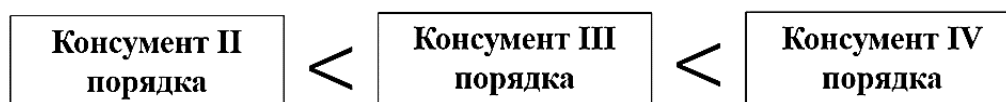


Рис. 3. Схема накопления тяжелых металлов в тканях гидробионтов соответственно пищевой цепочке

Fig. 3. Scheme of accumulation of heavy metals in the tissues of aquatic organisms, according to the food chain

В тканях хищных рыб концентрации тяжелых металлов были выше, чем в тканях бентофагов. Сравнение полученных данных с литературными источниками не выявило критичных концентраций тяжелых металлов в тканях гидробионтов (рыб), по большей части не были превышены предельно-допустимые концентрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение разработанного и апробированного комплексного мониторинга водных экосистем близи полигонов отходов показало свои возможности для получения достоверной информации о состоянии водных объектов. Были установлены закономерности распространения и накопления загрязняющих веществ в водных экосистемах, расположенных вблизи полигонов отходов.

Данный комплексный мониторинг является универсальной системой для получения достоверной информации о состоянии окружающей среды и может быть применен и на других объектах размещения отходов с учетом индивидуальной разработки схемы точек отбора проб для каждого отдельного объекта размещения отходов.

Применение комплексного мониторинга может осуществляться на разных этапах: проектирование, строительство, эксплуатация и рекультивация объектов размещения отходов.

Для снижения последствий и предотвращения серьезного ущерба окружающей среде необходимо принимать специальные меры, направленные на получение достоверной информации о состоянии окружающей среды, и применять превентивные меры в случае ухудшения ее состояния вблизи полигонов отходов.

Список источников

1. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 31.07.2025). – Текст: электронный // Консультант-плюс: сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения: 15.07.2025).
2. Анализ методов очистки фильтрата полигонов ТКО / Н. О. Милютин, П. С. Зеленковский, Н. А. Политаева [и др.]. – DOI: 10.15862/03NZVN320 // Твердые бытовые отходы. – 2023. – № 6 (204). – С. 48–53.
3. Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni в мышечной ткани рыб национального парка «Смоленское Поозерье» / И. И. Подлипский, П. С. Зеленковский, С. В. Дуброва, Т. Д. Евенкова // География: развитие науки и образования: сборник статей по материалам ежегодной междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 20–23 апр. 2022 г.) – Рос. гос. пед. ун-т им. А. И. Герцена. – Санкт-Петербург: РГПУ им. А. И. Герцена, 2022. – С. 100–103.
4. Шарова, О. А. Экологический мониторинг на полигонах твердых бытовых и промышленных отходов / О. А. Шарова, А. Н. Бармин // Региональные гео-системы. – 2013. – № 3 (146). – С. 166–169.
5. ГОСТ Р 56060–2014. Производственный экологический мониторинг. Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 6 с.
6. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ. – Текст: электронный // Консультант-плюс: сайт. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения: 15.10.2025).

7. Зинюков, Ю. М. Мониторинг природной среды в районе полигона ТБО ООО «КАСКАД» (Воронежская область) / Ю. М. Зинюков, В. А. Валяльщикова // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2014. – № 4. – С. 98–103.
8. Василискова, А. В. Геоэкологическая характеристика водного объекта без названия, расположенного вблизи рекультивированного полигона твердых коммунальных отходов Калининградской области / А. В. Василискова, С. В. Кондратенко, А. С. Меньшенин. – DOI: 10.26516/2073–3402.2023.46.16 // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2023. – Т. 46. – С. 16–34.
9. Бегунова, Л. А. Сравнительная оценка результатов химического анализа фильтрата твердых коммунальных отходов на полигоне Иркутска / Л. А. Бегунова, А. Н. Петрова. – DOI: 10.21285/2500–1582–2023–1–18–26 // XXI век. Техносферная безопасность. – 2023. – Т. 8, № 1 (29). – С. 18–26.
10. Притужалова, О. А. Анализ изученности свалочного фильтрата на российских полигонах твердых коммунальных отходов / О. А. Притужалова, И. А. Жованик. – DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-4-413-426 // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2023. – Т. 33, № 4. – С. 413–426.
11. Галицкая, И. В. Продолжительность выщелачивания металлов из свалочного тела при захоронении твердых коммунальных отходов / И. В. Галицкая, В. С. Путилина, Т. И. Юганова. – DOI: 10.31857/S086978092006003X // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2020. – № 6. – С. 3–13.
12. Галицкая, И. В. Аммонийный азот в фильтрате полигонов ТКО: образование, трансформация, долгосрочность загрязнения / И. В. Галицкая, В. С. Путилина, Т. И. Юганова. – DOI: 10.31857/S0869780921010021 // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021. – № 1. – С. 3–13.
13. Слюсарь, Н. Н. Оценка долгосрочных эмиссий объектов захоронения твердых коммунальных отходов: результаты полевых исследований и лабораторного моделирования / Н. Н. Слюсарь, Я. И. Вайсман, В. Н. Коротаев. – DOI: 10.18412/1816–0395–2016–4–32–39 // Экология и промышленность России. – 2016. – Т. 20, № 4. – С. 32–39.
14. ГОСТ 17.1.2.04–77. Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. – Текст: электронный // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс»: сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026772> (дата обращения: 15.07.2025).
15. Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши / О. П. Оксик, В. Н. Жукинский, Л. П. Брагинский [и др.] // Гидробиологический журнал. – 1993. – Т. 29. – № 4. – С. 62–76.

References

1. The Water Code of the Russian Federation dated 06/03/2006 N 74–FZ (as amended on 07/31/2025). – Text: electronic // Consultant-plus: site. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (accessed on 15.07.2025).

2. Analysis of methods for cleaning the filtrate of MSW landfills / N. O. Milyutina, P. S. Zelenkovsky, N. A. Politaeva [et al.]. – DOI: 10.15862/03NZVN320 // Solid household waste. – 2023. – № 6 (204). – P. 48–53.
3. Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni in the muscle tissue of fish of Smolenskoye Poozerye National Park / I. I. Podlipsky, P. S. Zelenkovsky, S. V. Dubrova, T. D. Evenkova // Geography: development of science and education: A collection of articles based on the materials of the annual International Scientific and Practical Conference (St. Petersburg, April 20–23, 2022) – Russian State Pedagogical University A. I. Herzen University. – Saint Petersburg: A. I. Herzen Russian State Pedagogical University, 2022. – P. 100–103.
4. Sharova, O. A. Environmental monitoring at landfills of solid household and industrial waste / O. A. Sharova, A. N. Barmin // Regional geosystems. – 2013. – № 3 (146). – P. 166–169.
5. GOST R 56060-2014. Industrial environmental monitoring. Monitoring of the state and pollution of the environment in the territories of waste disposal facilities. – Moscow: Standartinform, 2015. – 6 p.
6. Federal Law "On Environmental Protection" dated 10.01.2002 No. 7-FZ. – Text: electronic // Consultant-plus: site. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (accessed on 15.10.2025).
7. Zinyukov, Yu. M. Monitoring of the natural environment in the area of the MSW landfill of CASCADE LLC (Voronezh region) / Yu. M. Zinyukov, V. A. Vayalshchikov // Bulletin of the VSU. Series: Geology. – 2014. – № 4. – P. 98–103.
8. Vasiliskova, A. V. Geoecological characteristics of an unnamed water body located near a reclaimed landfill of municipal solid waste in the Kaliningrad region / A. V. Vasiliskova, S. V. Kondratenko, A. S. Menshenin. – DOI: 10.26516/2073-3402.2023.46.16 // Izvestiya Irkutsk State University. Series: Earth Sciences, 2023. – Vol. 46. – P. 16–34. -
9. Begunova, L. A. Comparative evaluation of the results of chemical analysis of municipal solid waste filtrate at the Irkutsk landfill / L. A. Begunova, A. N. Petrova. – DOI: 10.21285/2500–1582–2023–1–18–26 // The 21st century. Technosphere safety. – 2023. – Vol. 8, № 1 (29). – P. 18–26.
10. Prituzhalova, O. A. Analysis of the study of landfill filters in Russian municipal solid waste landfills / O. A. Prituzhalova, I. A. Zhovannik. – DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-4-413-426 // Bulletin of the Udmurt University. Bio-logy series. Earth Sciences. – 2023. – Vol. 33, № 4. – P. 413–426.
11. Galitskaya, I. V. Duration of metal leaching from landfill bodies during the disposal of municipal solid waste / I. V. Galitskaya, V. S. Putilina, T. I. Yuganova. – DOI: 10.31857/S086978092006003X // Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. – 2020. – № 6. – P. 3–13.
12. Galitskaya, I. V. Ammonium nitrogen in the filtrate of MSW landfills: formation, transformation, long-term contamination / I. V. Galitskaya, V. S. Putilina, T. I. Yuganova. – DOI: 10.31857/S0869780921010021 // Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. – 2021. – № 1. – P. 3–13.
13. Slyusar, N. N. Assessment of long-term emissions of municipal solid waste disposal facilities: results of field research and laboratory modeling / N. N. Slyusar, Ya. I. Vaisman, V. N. Korotaev. – DOI: 10.18412/1816-0395-2016-4-32-39 // Ecology and industry of Russia. – 2016. – Vol. 20, № 4. – P. 32–39.

14. GOST 17.1.2.04–77. Nature conservation. The hydrosphere. Indicators of the condition and taxation rules of fishery water bodies. – Text: electronic // Electronic Fund of regulatory, technical and regulatory information of the Codex Consortium: site. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026772> (accessed on 15.07.2025).

15. Complex ecological classification of land surface waters / O. P. Oksiyuk, V. N. Zhukinsky, L. P. Braginsky [et al.] // Hydrobiological Journal. – 1993. – Vol. 29. – № 4. – P. 62–76.

Информация об авторах

А. В. Василискова – заведующая лабораториями кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

С. В. Кондратенко – кандидат биологических наук, доцент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры

Information about the authors

A. V. Vasiliskova – Head of the Laboratories of the Department of Water Bioresources and Aquaculture

S. V. Kondratenko – Candidate of Biological sciences, Associate Professor of the Department of Water Bioresources and Aquaculture

Вклад авторов

А. В. Василискова – идея, сбор материала, обработка материала и написание статьи

С. В. Кондратенко – научное редактирование текста и научное руководство

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

A. V. Vasiliskova – idea, collection of material, processing of material, and writing of the article

S. V. Kondratenko – scientific editing of the text and scientific supervision

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.11.2025; одобрена после рецензирования 21.11.2025; принята к публикации 30.11.2025.

The article was submitted 10.11.2025; approved after reviewing 21.11.2025; accepted for publication 30.11.2025.

Научная статья

УДК 595.384.2 : 574.2 : 574.5

DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-24-37

**Размеры, половой состав, особенности морфологии краба Харриса,
Rhithropanopeus harrisii (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae),
Таманский залив, 2021 г.**

Анастасия Сергеевна Овчарук¹✉, Светлана Александровна Судник²

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

¹arveyzer@mail.ru✉

²svetlana.sudnik@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3409-4634>

Аннотация. В работе представлены особенности полового и размерного составов, морфологии крабов *Rhithropanopeus harrisii* из Таманского залива, собранных в июле 2021 г. Самцы в пробе четырехкратно численно преобладали над самками; ювенильные особи не встречены. Размеры: ширина карапакса самцов составила 7,3–21,4 мм (в среднем 14,4±2,5 мм), длина карапакса – 5,5–15,9 мм (в среднем 11,0±1,8 мм); ширина карапакса самок – 8,6–15,9 мм (в среднем 10,8±1,7 мм), длина карапакса – 6,7–12,1 мм (в среднем 8,3±1,3 мм). Среди самцов доминировали особи с шириной карапакса 13–15 мм (доля 46 %) и длиной карапакса 10–11 мм (48 %), среди самок – с шириной карапакса 10–11 мм (доля 45 %) и длиной карапакса 7–9 мм (доля 77 %). Выполненный морфометрический анализ 18 пластических признаков шести элементов экзоскелета краба определил ряд особенностей полового диморфизма вида залива: размеры большинства пластических признаков карапакса, абдомена, мерусов переоподов второй и третьей пары, правой и левой клешней у самок были на 12–49 % меньше, чем у самцов (исключение – четвертый сегмент абдомена – он был шире у самок на 45 %). Отмечены и черты сходства для крабов обоих полов: размеры правой клешни были достоверно больше размеров левой клешни, что связано с функциональной специализацией клешней. Сравнительный анализ с данными морфометрии для вида залива десятилетней давности позволил предположить достаточную стабильность размерной структуры и морфологии экзоскелета особей краба Харриса из поселений в Таманском заливе.

Ключевые слова: *Rhithropanopeus harrisii*, Таманский залив, половой состав, морфометрия, размеры, половой диморфизм.

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам Института океанологии имени П. П. Ширшова РАН (г. Москва) за предоставленный материал.

Финансирование: работа выполнена в рамках научного сотрудничества ФГБОУ ВО «КГТУ» с Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН и как часть темы ИП НИР «КГТУ» «Систематика, зоогеография и экология ракообразных Мирового океана» (Рег. № 13.13.029.2).

Для цитирования: Овчарук А. С., Судник С. А. Размеры, половой состав, особенности морфологии краба Харриса, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae), Таманский залив, 2021 г. // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 24–37. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-24-37.

Original article

Size, sex ratio, and morphological features of Harris crab, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae), Taman Bay, 2021

Anastasiya S. Ovcharuk ^{1✉}, Svetlana A. Sudnik ²

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

¹arveyzer@mail.ru [✉]

²svetlana.sudnik@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3409-4634>

Abstract. The article presents the features of sex and size composition, morphology of the crabs *Rhithropanopeus harrisii* from Taman Bay collected in July 2021. In the sample, males outnumbered females fourfold; juveniles were not encountered. Sizes: the carapace width of males was 7.3–21.4 mm (on average 14.4±2.5 mm), the carapace length was 5.5–15.9 mm (on average 11.0±1.8 mm); the carapace width of females was 8.6–15.9 mm (on average 10.8±1.7 mm), the carapace length was 6.7–12.1 mm (on average 8.3±1.3 mm). Among males, individuals with a carapace width of 13–15 mm (46 % share) and a carapace length of 10–11 mm (48 %) were dominant, while among females, those with a carapace width of 10–11 mm (45 % share) and a carapace length of 7–9 mm (77 % share) were dominant. A morphometric analysis of 18 plastic characters of six elements of the crab's exoskeleton revealed a number of features of sexual dimorphism in the species of the Gulf: the sizes of most plastic characters of carapace, abdomen, merus of pereopods 2 and 3 and of the right and left claws were 12–49 % smaller in females than in males (the exception was the fourth abdominal segment, which was 45 % wider in females). Similarities for crabs of both sexes were also noted: their right claw was significantly larger than the left claw, reflecting the functional specialization of the claws. A comparative analysis with morphometric data for *R. harrisii* of that Bay from a decade ago suggested a relatively stable dimensional structure and exoskeleton morphology in Harris crab specimens from Taman Bay settlements.

Keywords: *Rhithropanopeus harrisii*, Taman Bay, sex ratio, morphometry, sizes, sexual dimorphism.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the staff of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow) for the provided material.

Funding: the work has been carried out within the framework of scientific cooperation between the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KSTU" and the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences and as part of the IP R&D topic of "KSTU" "Systematics, zoogeography and ecology of crustaceans of the World Ocean" (Reg. No. 13.13.029.2).

For citation: Ovcharuk A. S., Sudnik S. A. Size, sex ratio, and morphological features of Harris crab, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae),

Taman Bay, 2021. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(80):24–37. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-24-37.

ВВЕДЕНИЕ

Краб Харриса, *Rhithropanopeus harrisii*, – инвазивный краб, широко расселившийся по водоемам Европы и Америки с обрастанием на судах или с балластными водами, устойчив к широким колебаниям температуры (0–35° С) и солености (0–40 ‰). Обычно обитает на глубине до 10 м, но встречается и до 35 м. Предпочитает селиться на песчаных, илистых грунтах, как правило зарываясь, прячась под камнями, в зарослях [1–4].

Известно, что инвазивные виды могут влиять на биоразнообразие нативных бентосных сообществ [2]. Например, крабы-хищники способны контролировать численность травоядных видов крабов и тем самым влиять на обилие микро- и макроводорослей. Поедая двусторчатых моллюсков, питающихся донными отложениями и взвесью, крабы косвенно влияют на трофическое состояние осадка [5]. В целом, из-за большого разнообразия как растительных, так и животных пищевых объектов [2], в местах обитания крабов Харриса высока вероятность возникновения пищевой и территориальной конкуренции и притеснения других бентоядных организмов, в том числе крабов других видов, как это произошло с крабом брахинотузом (*Brachynotus sexdentatus*), которого *R. harrisii* заменил во многих районах Азовского моря [2].

Отмечали, что этот вид может являться носителем бакуловирусов, которые чрезвычайно вирулентны, вызывают болезни у креветок и крабов [6]. Известно, что эти крабы могут повреждать рыболовное оборудование, рвать сети и забивать водозаборы [3].

Изучение биологии, поведенческих особенностей чужеродных видов необходимо для понимания фактических и потенциальных последствий их воздействия на биоценозы, для составления значимых прогнозов ожидаемых изменений в наземных и морских экосистемах [7]. Цель работы – описание размерного и полового составов, особенностей морфологии краба Харриса из Таманского залива из сборов 2021 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом послужила одна проба особей краба *Rhithropanopeus harrisii* (112 особи), собранная 6 июля 2021 г. в Таманском заливе Азовского моря сотрудниками Института океанологии им. П. П. Ширшова и переданная нам для изучения их биологии.

Для оценки морфологических особенностей вида использованы методика морфометрического анализа, разработанная для краба Харриса [8], и подходы к анализу полового, размерного составов из методики комплексного исследования биологии крабов [9]. Определение пола крабов проводилось по вторичным половым признакам (форма абдомена, строение брюшных ножек (плеоподов)) и, при вскрытии особи, – по первичным признакам (тип гонад: семенники или яичники). Для обновления биометрической характеристики краба Харриса из Таманского залива по результатам анализа особей, собранных в 2021 г., для 112 особей (90 самцов и 22 самки) был проведен расширенный морфометрический анализ. В соответствии

с методикой [8] в анализ входила оценка величины 20 пластических признаков с помощью бинокулярного микроскопа с точностью 0,1 мм (рис. 1).

Оценка полученных параметров выполнена с применением стандартных статистических методов, с использованием возможностей Microsoft Office Excel и программного обеспечения ПО Past. Каждая выборка значений оценена на нормальность распределения с применением критерия Шапиро-Уилка, часто используемого для десятиногих раков, в том числе краба Харриса [10–13] (для критерия принимается нулевая гипотеза, предполагающая нормальное распределение). Результаты оценивались по значению $p(\text{normal})$: при $p(\text{normal}) < 0,05$ нулевая гипотеза отвергается и принимается ненормальное распределение значений в выборке.

Для оценки достоверности различий параметров в выборках были использованы критерии Стьюдента (когда выборки имели нормальное распределение) и Манна-Уитни (при ненормальном распределении значений хотя бы в одной выборке). Для обоих критериев принимается нулевая гипотеза, которая предполагает отсутствие значимых различий между сравниваемыми группами. Гипотеза считается верной, когда для критерия Стьюдента $t_{\text{ст. расч.}} > t_{\text{ст. табл.}}$ и $p(\text{same mean}) > 0,05$; для критерия Манна-Уитни $p(\text{same med.}) > 0,05$. В случае несоответствия этим условиям нулевая гипотеза опровергается, что говорит о статистической значимости различий в выборках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Половой состав

В данной работе для раздельнополого краба Харриса описывается соотношение полов среди половозрелых особей, то есть третичное. У особей пробы за начало июля 2021 г. оно составило 1:4 – численно сильно доминировали самцы (рис. 1). Ювенильные особи в пробе не встречены.

В целом доминирование самцов в поселениях краба Харриса отмечалось как в Таманском заливе, так и в ряде других водоемов (табл. 1). Это может объясняться многими причинами, в том числе нестабильностью или неблагоприятностью условий обитания в водоемах исследования [14].

Можно отметить серьезные вариации соотношения полов у краба Харриса из разных водоемов обитания, что может быть связано с различиями в методиках сбора, сезонах и времени сбора материала, поведении особей разных полов, особенно в период нереста: наблюдения *in situ* показали, что самки, особенно крупные, в нерестовый сезон много времени проводят в укрытиях, плохо доступных для сборщиков материала [2, 15].

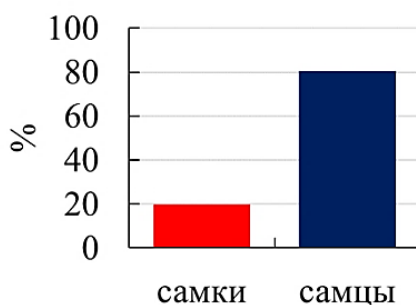


Рис. 1. Соотношение полов *R. harrisii*

Fig. 1. Sex ratio of *R. harrisii*

Таблица 1. Соотношение полов краба Харриса в разных частях ареала
Table 1. Sex ratio of Harris crab in different parts of its area

Место сбора, год		Количество, шт.	Соотношение полов, %			Источник
			ювенилы	М	F	
Таманский залив	2011	224	–	77	23	[14]
	2013	64	–	100	–	[2]
	апрель 2014	81	–	73	27	
	июнь 2014	21	–	95	5	
	2014	113	–	12	88	[16]
	2015	10	–	–	100	
	2021	112	–	80	20	наши данные
Панамский канал	2007	88	9	51	40	[17]
Эстуарий реки Одра	2007–2008	264	–	56	44	[18]
Гданьский залив	2006–2010	920	16	44	40	[19]
Вислинский залив	2009–2010	132	–	80	20	[15]
Архипелаговое море (г. Каарина, Финляндия)	2011	52	–	62	38	[20]
	2012	161	22	44	34	
Архипелаговое море (г. Наантали, Финляндия)	2011	52	37	33	31	
	2012	58	67	12	21	
Архипелаговое море (ост. Лапила, Финляндия)	2011	88	9	43	48	
	2012	197	17	38	45	
Озеро Тексома	2019–2021	1326	26	40	32	[21]
Река Вулан (впадает в Черное море)	2013	63	–	54	46	[2]

Примечание: М – самцы; F – самки

Размеры тела

В целом ДК 90 самцов находилась в пределах 5,5–15,9 мм (в среднем $11,0 \pm 1,8$ мм), ШК – 7,3–21,4 мм (в среднем $14,4 \pm 2,5$ мм); для 22 самок ДК варьировалась от 6,7 до 12,1 мм (в среднем $8,3 \pm 1,3$ мм), ШК – 8,6–15,9 мм (в среднем $10,8 \pm 1,7$ мм) (табл. 2, рис. 2).

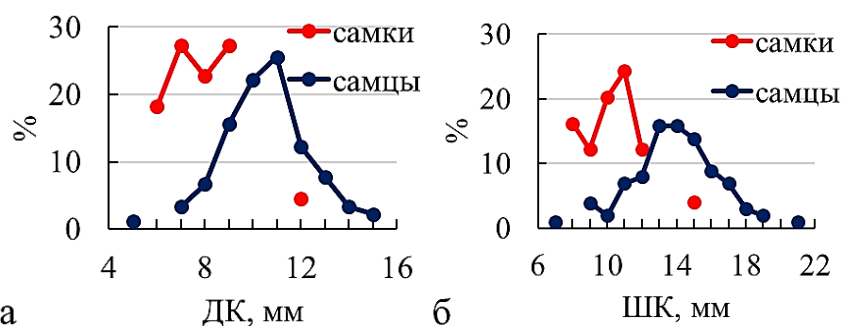


Рис. 2. Размеры карапакса (а – длина, ДК; б – ширина, ШК) краба Харриса
Fig. 2. Carapace sizes (a – length, ДК; б – width, ШК) of the Harris crab

Анализ графиков размерного состава крабов показал, что среди особей доминировали самки с ДК 7–9 мм (доля – 77 %), ШК 10–11 мм (доля – 45 %) и чуть более крупные самцы с ДК 10–11 мм (48 %), ШК – 13–15 мм (46 %). Близость модальных размеров тела самцов и самок (рис. 2) к их средним размерам (табл. 2) свидетельствует об устойчивости «предпочитаемого» состояния в распределении количественного признака, а некоторые отклонения от моды показывают, что система не детерминирована, а стохастична, то есть подвержена случайным воздействиям внешней среды, отклоняющим ее состояние от модального значения [23].

Таблица 2. Размеры тела краба Харриса из разных водоемов

Table 2. Body sizes of Harris crabs from the different reservoirs

Место сбора, год		N, шт.		Диапазон размера (m ± SD), мм				Источ- ник
				ДК		ШК		
		F	M	F	M	F	M	
Таманский залив	2013–2014	–	–	–	–	8,1–16,7	10–23,9	[2]
	2011	51	173	6,2–11,5 (8,4±1,2)	6,7–15,1 (11,0±1,7)	7,7–15,3 (10,9±1,6)	8,5–26,3 (14,5±2,5)	[14]
	2021	22	90	6,7–12,1 (8,3±1,3)	5,5–15,9 (11,0±1,8)	8,6–15,9 (10,8±1,7)	7,3–21,4 (14,4±2,5)	наши данные
Панамский канал	2007	19	45	–	–	4,9–10,9 (8,0)	3,1–17,7 (9,3)	[17]
Эстуарий реки Одра	2007–2008	115	149	3,6–16,4 (12,5±3,3)	3,9–19,0 (13,8±3,5)	5,3–19,8 (15,1±3,3)	5,6–22,9 (16,8±4,0)	[18]
Гданьский залив	2006–2010	370	400	–	–	4,4–19,4 (10,2±3,2)	4,4–21,4 (9,9±4,0)	[19]
Архипелаговое море (г. Каарина, Финляндия)	2011	20	32	–	–	2,8–16,9 (8,1±1,1)	2,3–19,9 (6,9±0,9)	[20]
	2012	55	71	–	–	3,1–20,2 (6,2±0,6)	3,1–22,0 (8,5±0,7)	
Архипелаговое море (г. Наантали Финляндия)	2011	16	17	–	–	2,3–15,2 (5,6±1,2)	2,3–14,0 (7,3±1,1)	
	2012	12	7	–	–	3,2–15,4 (10,7±0,9)	4,0–18,8 (11,3±2,1)	
Архипелаговое море (ост. Лапила, Финляндия)	2011	42	38	–	–	2,4–15,4 (5,7±0,6)	2,3–19,9 (7,7±1,0)	
	2012	89	74	–	–	2,1–13,7 (5,0±0,3)	2,2–18,4 (5,3±0,5)	
Озеро Тексома	2019–2021	420	524	3,2–11,3 (5,5±1,5)	3,0–12,6 (5,7±1,9)	4,0–15,6 (7,2±2,2)	4,0–17,9 (7,5±2,6)	[21]
Аральское море	–	–	–	–	–	4,1–19,0 (13,6±0,2)	6,0–22,0 (12,8±0,4)	[22]

Примечание: N – количество; m – среднее значение; SD – стандартное отклонение; M – самцы; F – самки

Схожие размерные данные самцов и самок описаны для особей, собранных в Таманском заливе в 2011 г. [14], что говорит о сохранении в целом сравнимого размерного состава у крабов из поселений залива на протяжении десяти лет.

Морфологическая характеристика крабов

Результаты значений пластических признаков, полученных для шести элементов экзоскелета самцов и самок краба Харриса, представлены в табл. 3, 4.

Оценка нормальности распределения значений изучаемых пластических признаков в выборках из особей самцов и самок показала, что значения четырех признаков у самок (длина и ширина карапакса, длина меруса переоподов 2 и высота меруса переоподов 3) были распределены ненормально ($p(\text{normal}) < 0,05$), поэтому сравнение значений этих признаков у самок и самцов проведено с помощью критерия Манна-Уитни (табл. 3). Вероятность ($p(\text{same med.})$), что выборки имеют средние значения, приближенные друг к другу, очень мала, это позволяет говорить о статистически достоверных различиях средних значений этих признаков. Таким образом, размеры тела самок (ДК и ШК) оказались на 25–25 % меньше таковых у самцов. У самцов мерус переоподов 2 был длиннее на 33 %, мерус переоподов 3 – выше на 29 % (табл. 3).

Таблица 3. Размеры элементов экзоскелета самцов и самок *R. harrisii* (сравнение с помощью критерия Манна-Уитни)

Table 3. Sizes of exoskeleton elements of males and females of *R. harrisii* (comparison using the Mann-Whitney test)

Пластический признак, мм	N, шт.		Диапазон размера ($m \pm SD$), мм		p (same med.)	Достоверная разница в средних значениях у М и F, %
	М	F	М	F		
Длина карапакса	90	22	5,5–15,9 (11,0 $\pm$ 1,8)	6,7–12,1 (8,3 $\pm$ 1,3)	0,00000001	24,5
Ширина карапакса	90	22	7,3–21,4 (14,4 $\pm$ 2,5)	8,6–15,9 (10,8 $\pm$ 1,7)	0,00000002	25,1
Длина меруса переоподов 2	76	19	3,5–9 (6,4 $\pm$ 1,1)	3,4–6,3 (4,3 $\pm$ 0,7)	0,00000001	32,9
Высота меруса переоподов 3	76	17	0,6–1,9 (1,3 $\pm$ 0,2)	0,6–1,1 (0,9 $\pm$ 0,1)	0,00000005	29,4

Примечание: N – количество; m – среднее значение; SD – стандартное отклонение; p(same med.) – значение критерия Манна-Уитни; М – самцы; F – самки

Выборки по остальным пластическим признакам было возможно сравнить с помощью критерия Стьюдента (табл. 4): анализ показал статистически достоверные различия всех признаков у особей разных полов, кроме ширины сегмента абдомена 3. Получено: у самцов абдомен оказался длиннее на 12 %, первый абдоминальный сегмент был шире на 12 % в отличие от сегмента абдомена 4, который оказался шире на 45 % у самок. Это подтверждает различие в строении экзоскелета абдомена, типично визуально наблюдаемое у крабов: абдомен самцов – длинный, суженный к концу, форма абдомена самок – широкая, округлая.

Все оставшиеся пластические признаки также имели большие значения у самцов по сравнению с таковыми у самок: мерус переоподов 2 был шире и выше на 26–29 %, мерус переоподов 3 – длиннее и шире на 26–32 %, клешни крупнее (длиннее, шире и выше) на 43–49 % (табл. 4).

Таблица 4. Размеры элементов экзоскелета самцов и самок *R. harrisii* (сравнение с помощью критерия Стьюдента)

Table 4. Sizes of exoskeleton elements of males and females of *R. harrisii* (comparison using Student's t-test)

Пластический признак, мм	N, шт.		Диапазон размера (m ± SD), мм		t _{st} * расч.	t _{st} * табл.	Достоверная разница в средних значениях у М и F, %
	М	F	М	F			
Длина абдомена	90	22	4,0–10,3 (7,4±1,1)	4,8–9,6 (6,6±1,1)	3,34	2,04	11,9
Ширина сегмента абдомена 1	90	22	2,4–6,0 (4,2±0,6)	2,8–5,3 (3,8±0,6)	3,48	2,03	11,6
Ширина сегмента абдомена 3	90	22	2,3–5,5 (4,0±0,5)	3,1–6,3 (4,2±0,7)	1,44	2,05	–
Ширина сегмента абдомена 4	90	22	1,5–4,1 (3,0±0,5)	3,1–6,5 (4,3±0,8)	7,68	2,06	45,1
Ширина меруса переоподов 2	76	19	0,9–3,0 (1,8±0,3)	(1,3±0,2)	8,48	2,01	26,8
Высота меруса переоподов 2	76	19	0,6–1,9 (1,3±0,3)	0,6–1,3 (0,9±0,1)	8,23	2,01	28,8
Длина меруса переоподов 3	76	17	(6,6±1,2)	(4,5±0,5)	11,61	2,00	32,3
Ширина меруса переоподов 3	76	17	1,0–2,4 (1,8±0,3)	(1,3±0,2)	8,99	2,02	25,9
Длина правой клешни	68	18	4,6–22,1 (12,0±3,2)	(6,6±1,3)	11,57	1,99	46,2
Длина ладони правой клешни	68	19	2,7–13,4 (7,6±1,8)	2,7–5,7 (3,9±0,7)	13,22	1,99	49,2
Ширина ладони правой клешни	68	19	2,3–10,5 (6,3±1,5)	2,3–5 (3,3±0,7)	12,31	1,99	47,0
Высота ладони правой клешни	68	19	1,4–6,8 (4,1±1,0)	(2,1±0,5)	11,80	2,00	47,2
Длина левой клешни	73	17	4,2–16,6 (10,5±2,7)	(6,0±0,9)	11,63	1,99	43,0
Длина ладони левой клешни	74	17	2,2–9,8 (6,1±1,7)	(3,3±0,5)	11,95	1,99	45,6
Ширина ладони левой клешни	74	17	2,0–8,4 (5,1±1,4)	(2,9±0,5)	11,34	1,99	43,4
Высота ладони левой клешни	74	17	1,2–5,5 (3,2±0,9)	1,2–2,2 (1,7±0,3)	12,33	1,99	47,8

Примечание: N – количество; m – среднее значение; SD – стандартное отклонение; * – значение критерия Стьюдента; М – самцы; F – самки

Поскольку все выборки имели нормальное распределение значений, для оценки различий в размерах правой и левой клешней у самцов и самок использовался критерий Стьюдента, результаты анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5. Сравнительный анализ размеров правой и левой клешней у самцов и самок *R. harrisii*

Table 5. Comparative analysis of the sizes of the right and left claws in males and females of *R. harrisii*

Пластический признак, мм	N, шт.		Диапазон размера (m ± SD), мм		t _{st} * расч.	t _{st} * табл.	Достоверная разница в средних значениях у М и F, %
	ПК	ЛК	ПК	ЛК			
самцы							
Длина клешни	68	73	4,6–22,1 (12,0±3,2)	4,2–16,6 (10,5±2,7)	3,50	1,98	12,5
Длина ладони клешни	68	74	2,7–13,4 (7,6±1,8)	2,2–9,8 (6,1±1,7)	4,94	1,98	19,7
Ширина ладони клешни	68	74	2,3–10,5 (6,3±1,5)	2,0–8,4 (5,1±1,4)	5,15	1,98	19,0
Высота ладони клешни	68	74	1,4–6,8 (4,1±1,0)	1,2–5,5 (3,2±0,9)	5,24	1,98	22,0
самки							
Длина клешни	18	17	4,7–10 (6,6±1,3)	4,5–7,3 (6,0±0,9)	1,61	2,04	–
Длина ладони клешни	19	17	2,7–5,7 (3,9±0,7)	2,3–4,2 (3,3±0,5)	2,53	2,04	13,9
Ширина ладони клешни	19	17	2,3–5,0 (3,3±0,7)	2,1–3,5 (2,9±0,5)	2,56	2,04	14,5
Высота ладони клешни	19	17	1,4–3,2 (2,1±0,5)	1,2–2,2 (1,7±0,3)	3,54	2,04	21,4

Примечание: N – количество; ПК – правая клешня; ЛК – левая клешня; m – среднее значение; SD – стандартное отклонение; * – значение критерия Стьюдента; М – самцы; F – самки

Анализ показал: у особей обоих полов статистически достоверно отличались размеры всех пластических признаков клешней (кроме длины клешни у самок): у самцов правая клешня оказалась длиннее, шире и выше на 12–22 %, чем левая; у самок – то же самое, но на 13–21 %. Более крупные размеры правой клешни ранее отмечались как нами (достоверно) [14], так и другими авторами [2, 21]. Это должно быть связано со специализацией клешней краба: меньшая – маневренная, используется для быстрых действий, большая – мощная, применяется для тяжелой механической работы [2, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полового состава особей краба Харриса из пробы, собранной летом 2021 г. в Таманском заливе, показал четырехкратное численное преобладание самцов над самками, что в целом оказалось характерным для краба *R. harrisii* из разных водоемов обитания и может быть вызвано рядом причин.

Для оцененных при расширенной морфометрии 20 пластических признаков элементов экзоскелета крабов отмечены статистически достоверные межполовые

отличия – средние значения большинства пластических признаков (размеров карапакса, длины абдомена, ширины его первого сегмента, размеров клешней клешне-носных ног и мерусов переоподов 2 и 3) оказались у самцов крупнее на 12–49 %, только четвертый сегмент абдомена был шире у самок на 45 %, что объясняется приобретением самками при их росте и развитии абдомена типичной для многих крабов округлой формы.

Полученные данные по половому и размерному составу, особенностям морфологии и чертам полового диморфизма оказались схожи с таковыми, описанными для вида Таманского залива ранее – в 2011 г. [14]. Это позволяет предположить сохранение достаточной стабильности размерного состава краба *R. harrisii* данного поселения и верность наблюдаемых ранее особенностей морфологии элементов экзоскелета вида.

Список источников

1. Резниченко, О. Г. Трансокеаническая аутоакклиматизация ритропанопеуса (*Rhithropanopeus harrisii*: Crustacea, Brachyura) / О. Г. Резниченко // Труды Института океанологии АН. – 1967. – № 85. – С. 136–177.
2. Залота, А. К. Чужеродные виды десятиногих ракообразных (Crustacea Decapoda) в морях России и сопредельных водах: дисс. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук: 03.02.10 / Залота Анна Константиновна: Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова. – Москва, 2017. – 255 с.
3. Самые опасные инвазионные виды России (Топ-100) / под ред. Ю. Дгебуадзе, В. Г. Петросян, Л. А. Хляп. – Москва: Т-во научных изданий КМК, 2018. – 688 с. – ISBN 978–5–907099–53–1.
4. Филипенко, С. И. О первой находке голландского краба *Rhithropanopeus harrisii tridentata* (Maitland, 1874) в Приднестровье / С. И. Филипенко, М. В. Мустя // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: тез. докл. V Междунар. науч. конф. (12–17 сент. 2016 г., Минск-Нарочь) – Минск: Изд. центр БГУ, 2016. – С. 397–398.
5. Introduction of a functionally novel consumer to a low diversity system: Effects of the mud crab *Rhithropanopeus harrisii* on meiobenthos / K. Lokko, J. Kotta, H. Orav-Kotta [et. al.] // Estuarine Coastal and Shelf Science. – 2018. – Vol. 201. – P. 132–139.
6. Payen, G. G. Mise en évidence de particules d'allure virale associées aux noyaux des cellules mésodermiques de la zone germinative testiculaire du crabe *Rhithropanopeus harrisii* (Gould) (Brachyura, Xanthidae) / G. G. Payen, J. R. Bonami // Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes. – 1979. – Vol. 43. – P. 361–365.
7. Beleem, I. Effects of an Invasive Mud Crab on a Macroalgae-Dominated Habitat of the Baltic Sea under Different Temperature Regimes / I. Beleem, J. Kotta, F. R. Barboza. – DOI: <https://doi.org/10.3390/d15050644> // Diversity. – 2023. – Vol. 15 (5). – 13 p.
8. Овчарук, А. С. Разработка методики морфометрического анализа для краба Харриса, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae) и первые результаты морфометрии вида из Таманского залива Азовского моря // Дни науки: материалы II Национальной научно-технической конференции студентов и

курсантов (Калининград, 10–22 апреля 2023 г.) / КГТУ. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – С. 151–156.

9. Судник, С. А. Биология крабов *Lyphira perplexa* Galil, 2009 (Crustacea: Brachyura: Leucosiidae) Южно-Китайского моря / С. А. Судник, Е. А. Поддueva // Известия КГТУ. – 2019. – № 52. – С. 43–59.

10. Energy reserves mobilization: Strategies of three decapod species / H. J. Sacristán, Y. E. Rodríguez, N. De Los A. Pereira [et. al.]. – DOI: 10.1371/journal.pone.0184060 // PLoS One. – 2017. – Vol. 12 (9). – 19 p.

11. Matozzo, V. Effects of temperature on cellular and biochemical parameters in the crab *Carcinus aestuarii* (Crustacea, Decapoda) / V. Matozzo, Ch. Gallo, M. G. Marin. – DOI: 10.1016/j.marenvres.2011.04.001 // Marine Environmental Research. – 2011. – Vol. 71 (5). – P. 351–356.

12. Swimming behavior of newly hatched larvae of six decapod species (Crustacea: Decapoda) / E. V. Almeida, C. S. Cardoso, M. S. Souza, S. L. C. Bonecker. – DOI: 10.1590/2358–2936e2021023 // Nauplius. – 2021. – Vol. 29 (3). – 12 p.

13. Kiiskinen, E. Predator-prey dynamics under variable salinity in the Baltic Sea: the case of an invasive predatory crab, *Rhithropanopeus harrisii* and a native mussel, *Mytilus trossulus*: Master's thesis: Ecology and Evolutionary Biology / Essi Kiiskinen: University of Turku. – Turku, 2020. – 47 p.

14. Овчарук, А. С. Некоторые данные по биологии краба *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae) Азовского моря летом 2011 г. / А. С. Овчарук, С. А. Судник. – DOI: <https://doi.org/10.46845/1997–3071–2025–76–11–24> // Известия КГТУ. – 2025. – № 76. – С. 11–24.

15. Колесниченко, А. И. Состав пищи краба-вселенца *Rhithropanopeus harrisii* (Panopeidae, Brachyura, Decapoda) в Вислинском заливе Балтийского моря / А. И. Колесниченко, Р. Н. Буруковский, И. Н. Марин // Поволжский экологический журнал. – 2014. – № 4. – С. 508–515.

16. Чаузова, Д. В. Размерно-половая и репродуктивная структура поселений краба Харриса (*Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841)) (Decapoda: Brachyura: Panopeidae) из вод Таманского залива Азовского моря весной 2014–2015 гг. // Дни науки: материалы межвуз. науч.-техн. конф. студентов и курсантов (Калининград, 12–25 окт. 2020) / КГТУ. – Калининград: Из-во БГАРФ, 2021. – С. 87–93.

17. Roche, D. G. Established population of the North American Harris mud crab, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) (Crustacea: Brachyura: Xanthidae) in the Panama Canal / D. G. Roche, M. E. Torchin. – DOI:10.3391/ai.2007.2.3.1 // Aquatic Invasions. – 2007. – Vol. 2. – P. 155–161.

18. Czerniejewski, P. Some aspects of population biology of the mud crab, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) in the Odra estuary, Poland / P. Czerniejewski. – DOI: 10.2478/v10009–009–0043–3 // Oceanological and Hydrobiological Studies. – 2009. – Vol. 38 (4). – P. 49–62.

19. Population structure, morphometry and individual condition of the non-native crab *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841), a recent coloniser of the Gulf of Gdańsk (southern Baltic Sea) / J. Hegele-Drywa, M. Normant, B. Szwarc, A. Podlúska. – DOI: 10.5697/oc.56–4.805 // Oceanologia. – 2014. – Vol. 56 (4). – P. 805–824.

20. The North American mud crab *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) in newly colonized Northern Baltic Sea: distribution and ecology / A. E. Fowler,

T. Forsstrom, M. von Numers, O. Vesakoski. – DOI:10.3391/ai.2013.8.1.10 // Aquatic Invasions. – 2013. – Vol. 8 (1). – P. 89–96.

21. Weaver, Sh. Morphometric Analysis of the Harris Mud Crab (*Rhithropanopeus harrisi*) in Lake Texoma / Sh. Weaver, D. Bass // Proceedings of the Oklahoma Academy of Science. – 2022. – Vol. 102. – P. 57–62.

22. Андреев, Н. И. Краб *Rhithropanopeus harrisi tridentatus* (Decapoda, Xanthidae) в Аральском море / Н. И. Андреев, С. И. Андреева // Зоологический журнал. – 1988. – Т. 67. – Вып. 1. – С. 135–136.

23. Суханов, В. В. О полимодальном распределении курильского эпипелагического нектона по массе тела особей / В. В. Суханов, О. А. Иванов // Известия ТИНРО. – 2001. – Т. 128. – С. 390–408.

References

1. Reznichenko, O. G. Transoceanic autoacclimatization of *Rhithropanopeus harrisi*: Crustacea, Brachyura). / O. G. Reznichenko // Proceedings of the Institute of Oceanology of the Academy of Sciences. – 1967. – № 85. – P. 136–177.

2. Zalota, A. K. Invasive species of decapod crustaceans (Crustacea Decapoda) in Russian seas and adjacent waters: diss. for the candidate of biological sciences: 03.02.10 / Zalota Anna Konstantinovna: P. P. Shirshov Institute of Oceanology. – Moscow, 2017. – 255 p.

3. The most dangerous invasive species in Russia (Top 100) / edited by Yu. Dgebuadze, V. G. Petrosyan, L. A. Khlyap. – Moscow: KMK Scientific Publications, 2018. – 688 p. – ISBN 978–5–907099–53–1.

4. Filipenko, S. I. On the first find of the Dutch crab *Rhithropanopeus harrisi* tridentata (Maitland, 1874) in Transnistria / S. I. Filipenko, M. V. Mustya // Lake ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, water quality: report summary. V Int. scientific conf. (12–17 September 2016, Minsk-Naroch). – Minsk: Publishing Center of BSU, 2016. – P. 397–398.

5. Introduction of a functionally novel consumer to a low diversity system: Effects of the mud crab *Rhithropanopeus harrisi* on meiobenthos / K. Lokko, J. Kotta, H. Orav–Kotta [et. al.] // Estuarine Coastal and Shelf Science. – 2018. – Vol. 201. – P. 132–139.

6. Payen, G. G. Mise en évidence de particules d'allure virale associées aux noyaux des cellules mésodermiques de la zone germinative testiculaire du crabe *Rhithropanopeus harrisi* (Gould) (Brachyura, Xanthidae) / G. G. Payen, J. R. Bonami // Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes. – 1979. – Vol. 43. – P. 361–365.

7. Beleem, I. Effects of an Invasive Mud Crab on a Macroalgae–Dominated Habitat of the Baltic Sea under Different Temperature Regimes / I. Beleem, J. Kotta, F. R. Barboza. – DOI: <https://doi.org/10.3390/d15050644> // Diversity. – 2023. – Vol. 15 (5). – 13 p.

8. Ovcharuk, A. S. Development of a morphometric analysis technique for Harris's crab, *Rhithropanopeus harrisi* (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae) and the first results of morphometry of the species from the Taman Bay of the Sea of Azov // Days of Science: Proceedings of the II National Scientific and Technical Conference of Students and Cadets (Kaliningrad, April 10–22, 2023) / KSTU. – Kaliningrad: Publishing

house of the Belarusian State Archives of the Russian Federation FGBOU VO "KSTU", 2023. – P. 151–156.

9. Sudnik, S. A. Biology of the crab *Lyphira perplexa* Galil, 2009 (Crustacea: Brachyura: Leucosiidae) of the South China Sea / S. A. Sudnik, E. A. Poddueva // Izvestiya KSTU. – 2019. – № 52. – P. 43–59.

10. Energy reserves mobilization: Strategies of three decapod species / H. J. Sacristán, Y. E. Rodríguez, N. De Los A. Pereira [et. al.]. – DOI: 10.1371/journal.pone.0184060 // PLoS One. – 2017. – Vol. 12 (9). – 19 p.

11. Matozzo, V. Effects of temperature on cellular and biochemical parameters in the crab *Carcinus aestuarii* (Crustacea, Decapoda) / V. Matozzo, Ch. Gallo, M. G. Marin. – DOI: 10.1016/j.marenvres.2011.04.001 // Marine Environmental Research. – 2011. – Vol. 71 (5). – P. 351–356.

12. Swimming behavior of newly hatched larvae of six decapod species (Crustacea: Decapoda) / E. V. Almeida, C. S. Cardoso, M. S. Souza, S. L. C. Bonecker. – DOI: 10.1590/2358–2936e2021023 // Nauplius. – 2021. – Vol. 29 (3). – 12 p.

13. Kiiskinen, E. Predator–prey dynamics under variable salinity in the Baltic Sea: the case of an invasive predatory crab, *Rhithropanopeus harrisii* and a native mussel, *Mytilus trossulus*: Master's thesis: Ecology and Evolutionary Biology / Essi Kiiskinen: University of Turku. – Turku, 2020. – 47 p.

14. Ovcharuk, A. S. Some data on the biology of the crab *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) (Brachyura: Panopeidae) of the Sea of Azov in the summer of 2011 / A. S. Ovcharuk, S. A. Sudnik. – DOI: <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2025-76-11-24> // Bulletin of KSTU. – 2025. – № 76. – P. 11–24.

15. Kolesnichenko, A. I. Food composition of the invasive crab *Rhithropanopeus harrisii* (Panopeidae, Brachyura, Decapoda) in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea / A. I. Kolesnichenko, R. N. Burukovsky, I. N. Marin // Volga Region Ecological Journal. – 2014. – № 4. – P. 508–515

16. Chazova, D. V. Size, sex, and reproductive structure of Harris crab (*Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841)) (Decapoda: Brachyura: Panopeidae) settlements from the waters of the Taman Bay of the Sea of Azov in the spring of 2014–2015 // Days of Science: Proc. of the Interuniversity Scientific and Technical Conf. of Students and Cadets (Kaliningrad, October 12–25, 2020) / KSTU. – Kaliningrad: Publishing House of the Belarusian State Archives of the Russian Federation, 2021. – P. 87–93.

17. Roche, D. G. Established population of the North American Harris mud crab, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) (Crustacea: Brachyura: Xanthidae) in the Panama Canal / D. G. Roche, M. E. Torchin. – DOI:10.3391/ai.2007.2.3.1 // Aquatic Invasions. – 2007. – Vol. 2. – P. 155–161.

18. Czerniejewski, P. Some aspects of population biology of the mud crab, *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) in the Odra estuary, Poland / P. Czerniejewski. – DOI: 10.2478/v10009–009–0043–3 // Oceanological and Hydrobiological Studies. – 2009. – Vol. 38 (4). – P. 49–62.

19. Population structure, morphometry and individual condition of the non–native crab *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841), a recent coloniser of the Gulf of Gdańsk (southern Baltic Sea) / J. Hegele–Drywa, M. Normant, B. Szwarc, A. Podłuska. – DOI: 10.5697/oc.56–4.805 // Oceanologia. – 2014. – Vol. 56 (4). – P. 805–824.

20. The North American mud crab *Rhithropanopeus harrisii* (Gould, 1841) in newly colonized Northern Baltic Sea: distribution and ecology / A. E. Fowler, T. Forsstrom, M. von Numers, O. Vesakoski. – DOI: 10.3391/ai.2013.8.1.10 // Aquatic Invasions. – 2013. – Vol. 8 (1). – P. 89–96.

21. Weaver, Sh. Morphometric Analysis of the Harris Mud Crab (*Rhithropanopeus harrisii*) in Lake Texoma / Sh. Weaver, D. Bass // Proceedings of the Oklahoma Academy of Science. – 2022. – Vol. 102. – P. 57–62.

22. Andreev, N. I. Crab *Rhithropanopeus harrisii tridentatus* (Decapoda, Xanthidae) in the Aral Sea / N. I. Andreev, S. I. Andreeva // Zoological Journal. – 1988. – Vol. 67. – Issue 1. – P. 135–136.

23. Sukhanov, V. V. On the polymodal distribution of Kuril epipelagic nekton by body mass of individuals / V. V. Sukhanov, O. A. Ivanov // Izvestiya TINRO. – 2001. – Vol. 128. – P. 390–408.

Информация об авторах

А. С. Овчарук – магистрант

С. А. Судник – кандидат биологических наук, доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура»

Information about the authors

A. S. Ovcharuk – Master's student

C. A. Sudnik – Candidate of Biology, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

Вклад авторов

А. С. Овчарук – идея, обработка материала и написание статьи

С. А. Судник – научное редактирование текста и научное руководство

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

A. S. Ovcharuk – idea, processing of material, and writing of the article

C. A. Sudnik – scientific editing of the text and scientific supervision

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.11.2025; одобрена после рецензирования 10.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 28.11.2025; approved after reviewing 10.12.2025; accepted for publication 15.12.2025.

Научная статья

УДК 639.2/3:51-7; 639.2/3:007

DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-38-49

Гидромеханика тралового мешка: расчет формы и нагрузок при различной ориентации ячеек в потоке жидкости

Алексей Олегович Ражев¹, Александр Алексеевич Недоступ², Павел Владимирович Насенков³, Карина Витальевна Коновалова⁴

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

¹nedostup@klgtu.ru

Аннотация. В статье представлена математическая модель для оценки влияния ориентации ячеек по отношению к потоку жидкости в осесимметричных сетных инженерных конструкциях в условиях гидродоппора на форму и нагрузки в конструкции на примере тралового мешка с уловом. Новизна подхода заключается в упрощении задачи путем сведения трехмерной проблемы к расчету в двухмерной системе координат. Это значительно снижает трудоемкость вычислений, ускоряет процесс моделирования и позволяет быстрее получать результаты. Авторами проведено численное моделирование на разработанной программе для ЭВМ, результаты которого были сопоставлены с данными натурного эксперимента в гидроканале. Эксперимент показал, что при ориентации ячеек под углом 90 градусов к потоку (Т90) минимальный диаметр тралового мешка увеличивается до 29,0 мм по сравнению с 21,6 мм при Т0. Это изменение формы повышает селективность и улучшает качество улова, минимизируя повреждения. Согласованность результатов моделирования с реальными экспериментами подтверждает надежность подхода. Модель учитывает ключевые факторы: гидродинамические силы сопротивления, действующие на сеть; жесткостные характеристики веревок, описываемые законом Гука (упругая деформация); внешнее воздействие улова, моделируемое как полусфера с равномерным давлением. Это обеспечивает реалистичное представление деформации сети во время буксировки трала, имитируя реальные условия рыболовства. Для расчетов используются уравнения, описывающие геометрию конструкции, распределение сил и объемов, которые решаются методом Левенберга-Марквардта. Область применения: научные исследования, учебный процесс, проектирование и эксплуатация рыболовных тралов, системы виртуальной реальности.

Ключевые слова: гидромеханика, Т0, Т90, траловый мешок, модель, гидродоппор.

Финансирование: Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00008, <https://rscf.ru/project/25-21-00008/>.

Для цитирования: Ражев А. О., Недоступ А. А., Насенков П. В., Коновалова К. В. Гидромеханика тралового мешка: расчет формы и нагрузок при различной ориентации ячеек в потоке жидкости // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 38–49. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-38-49.

Original article

Hydrodynamics of the trawl codend: shape and loads calculation at different mesh orientations in fluid flow

Aleksey O. Razhev¹, Aleksandr A. Nedostup², Pavel V. Nasenkov^{3✉}, Karina V. Konovalova⁴

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

¹nedostup@klgtu.ru

Abstract. The article presents a mathematical model for assessing the influence of mesh cell orientation relative to the fluid flow in axisymmetric mesh engineering structures under hydrodynamic backpressure conditions on the shape and loads in the structure, using the example of a trawl codend with a catch. The novelty of the approach lies in simplifying the problem by reducing the three-dimensional issue to calculations in a two-dimensional coordinate system. This significantly reduces the computational complexity, speeds up the modeling process, and allows for faster result acquisition. The authors conducted numerical simulations using a developed computer program, the results of which were compared with data from a full-scale experiment in a towing tank. The experiment showed that with the mesh shape oriented at a 90-degree angle to the flow (T90), the minimum diameter of the trawl codend increases to 29.0 mm, compared to 21.6 mm at T0. This shape change improves selectivity and enhances catch quality by minimizing damage. The consistency of the simulation results with real experiments confirms the reliability of the approach. The model accounts for key factors: hydrodynamic drag forces acting on the net; stiffness characteristics of the ropes, described by Hooke's law (elastic deformation); and the external impact of the catch, modeled as a hemisphere with a uniform pressure. This provides a realistic representation of net deformation during trawl towing, simulating real fishing conditions. The calculations use equations describing the geometry of the structure, force distribution, and volumes, which are solved using the Levenberg-Marquardt method. Applications include scientific research, educational processes, design and operation of fishing trawls, and virtual reality systems.

Keywords: hydromechanics, T0, T90, trawl codend, model, hydraulic support.

Funding: The research was carried out at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kaliningrad State Technical University" under the grant of the Russian Science Foundation No. 25-21-00008, <https://rscf.ru/project/25-21-00008/>.

For citation: Razhev A. O., Nedostup A. A., Nasenkov P. V., Konovalova K. V. Hydrodynamics of the trawl codend: shape and loads calculation at different mesh orientations in fluid flow. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(80):38–49. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-38-49.

ВВЕДЕНИЕ

Сетные инженерные конструкции находят широкое применение в разнообразных сферах, включая промышленное рыболовство и рыбоводство. Такие орудия рыболовства, как тралы, представляют собой сложную конструкцию, состоящую из различных частей – канатной, сетной, тралового мешка, которые необходимо учитывать при проектировании рыбопромысловых судов.

Гидромеханика трала определяется влиянием на него внешних воздействий в виде потока воды, накапливающейся в траловом мешке.

Эффективность тралового лова и качество улова во многом зависят от формы тралового мешка, которая в свою очередь зависит от условий траления и степени внешнего воздействия в виде накапливающегося улова. В процессе тралового лова возникает проблема, вызванная влиянием гидродопора на форму тралового мешка. При увеличении скорости траления и объема улова увеличиваются радиальные силы сжатия тралового мешка, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения и увеличению длины зоны прохода рыбы. Эта проблема частично решается изменением ориентации ячеей мешка с T0 на T90 (рис. 1).

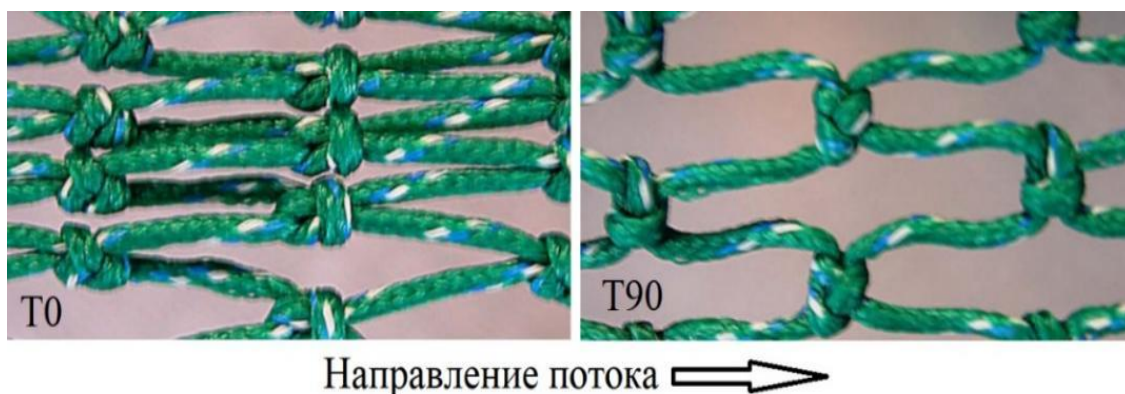


Рис. 1. Ориентация ячеей
Fig. 1. Mesh orientation

Установлено, что при ориентации ячеей тралового мешка T90 из-за увеличения площади зоны прохода рыбы тот же трал имеет улучшенную селективность, вылавливает более крупную рыбу [1, 2], при этом рыба меньше травмируется, что улучшает качество улова.

На рис. 2, 3 показан вид тралового мешка с имитацией улова в гидроканале при различной ориентации ячеей к потоку воды. Материал веревок и диаметр тралового мешка, шаг ячеей и количество ячеей по длине и окружности тралового мешка, а также скорость потока и объем улова в обоих случаях одинаковы.

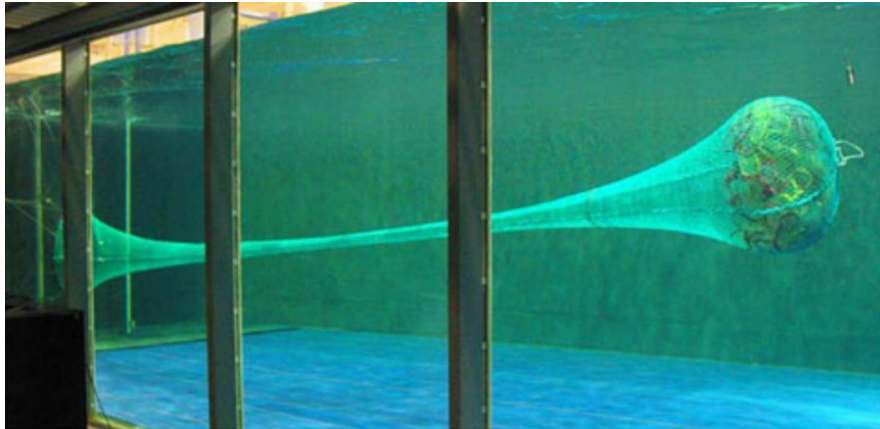


Рис. 2. Траловый мешок с уловом при ориентации ячеей T0
Fig. 2. Trawl codend with a catch at T0 orientation

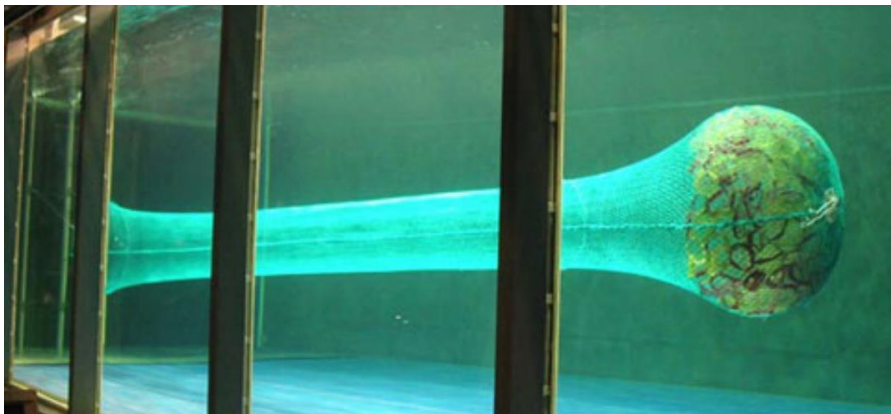


Рис. 3. Траловый мешок с уловом при ориентации ячеей T90
Fig. 3. Trawl codend with a catch at T90 orientation

На рис. 2, 3 видно, что при ориентации ячеей T90 зона прохода шире, чем при ориентации T0.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Оценку влияния ориентации ячеей по отношению к потоку жидкости в сетных инженерных конструкциях на форму конструкции можно проводить экспериментально, что требует наличия гидроканала и сложного измерительного оборудования, много времени для подготовки и проведения натурных и модельных экспериментов. Численный эксперимент позволяет значительно ускорить и удешевить процесс оценки.

Для проведения численного эксперимента необходимо программное обеспечение, для разработки которого требуется математическая и имитационная модель поведения сетной конструкции в потоке жидкости под действием внешних факторов. Исходя из выходных данных, полученных в процессе моделирования, можно предположить об определении формы сетной конструкции и нагрузки в ее элементах как в числовом, так и в графическом (2-D, 3-D) представлениях.

Поставим задачу определения указанных характеристик посредством математического моделирования сетной инженерной конструкции на примере

тралового мешка с различной ориентацией ячеей. Для оценки влияния гидростатического сопротивления на форму тралового мешка с уловом, длину и размеры места сужения траловый мешок можно считать осесимметричной сетной конструкцией с гибкими элементами, обладающими заданной степенью жесткости. Это при условии, что плотность элементов сетной конструкции и улова близка к плотности жидкости, в которую погружена конструкция с уловом (справедливо для тралового мешка), тогда силы гидродинамического сопротивления будут многократно превышать гидростатические.

При данной постановке гидростатическими силами можно пренебречь, а задачу свести к расчету в двухмерной системе координат, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс моделирования и получения результата.

С учетом вышесказанного и использованием уже имеющегося задела [3] авторами была разработана математическая модель осесимметричной сетной инженерной конструкции на примере тралового мешка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Введем расчетную декартову систему координат Oxy . Ось Ox направим влево вдоль оси симметрии сетной конструкции, ось Oy – от оси симметрии вверх. Пронумеруем ряды узлов в направлении оси Ox : $i = [0...2m]$, где i – порядковый номер ряда; m – количество ячеей вдоль оси сетной конструкции. Зафиксируем узлы ряда $i = 0$ в начале системы координат и установим радиус левого ряда:

$$x_0=0, y_0=0, y_{2m}=D/2, \quad (1)$$

где D – диаметр левого ряда.

Для каждого ряда i , кроме последнего, составим зависимости, связывающие геометрические характеристики сетной конструкции (рис. 4):

$$l_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}, \quad \Delta x_i = x_{i+1} - x_i, \quad \Delta y_i = y_{i+1} \cos \frac{\pi}{n} - y_i, \quad (2)$$

где l_i – расстояние между узлами сети в плоскости Oxy ; $\Delta x_i, \Delta y_i$ – проекции l_i на оси координат; n – количество ячеей вдоль окружности сетной конструкции.

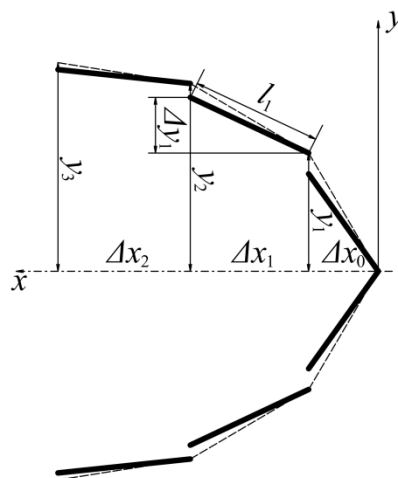


Рис. 4. Проекция части сетной конструкции в расчетной плоскости
Fig. 4. Projection of part of the mesh structure in the computational plane

Рассмотрим расчетные схемы одного ряда ячеей при различной ее ориентации (рис. 5).

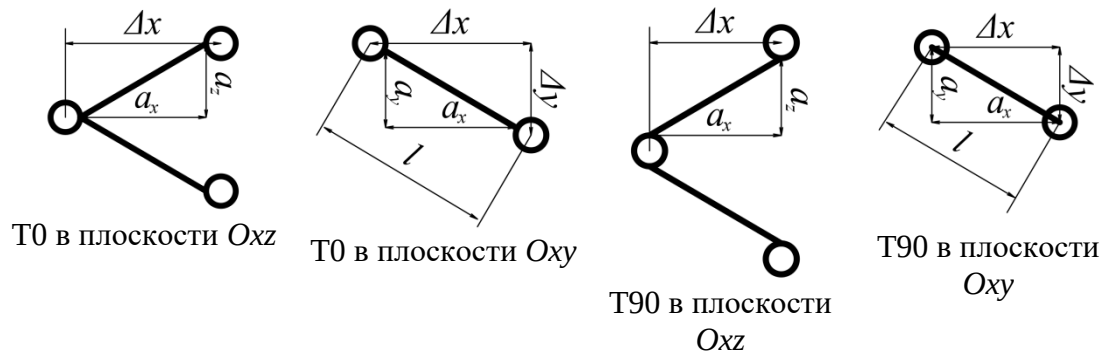


Рис. 5. Расчетные схемы одного ряда ячеей
Fig. 5. Calculation schemes for one row of the mesh

Будем считать узлы сети абсолютно жесткими, а веревки, соединяющие узлы (стороны ячеей), прямыми и растяжимыми по закону Гука. Под действием силы растяжения длина веревки a_i между рядами i и $i+1$ определяется как:

$$a_i = (a_0 - d_n) \left(1 + \frac{4T_i}{\pi E d^2} \right), \quad (3)$$

где a_0 – шаг ячеей; d_n – диаметр узла; T_i – сила натяжения веревки; E – модуль упругости веревки; d – диаметр веревки.

Для каждого ряда i , кроме последнего $i = 2m$, составим зависимости, связывающие длину веревки и диаметр узла с геометрией ячеей. Свяжем длину веревки с ее проекциями на оси ортогональной системы координат $Oxyz$, оси Ox и Oy которой совпадают с одноименными осями расчетной системы координат Oxy :

$$a_i = \sqrt{a_{xi}^2 + a_{yi}^2 + a_{zi}^2}. \quad (4)$$

Для ориентации T0 получаем:

$$d_{nxi} = d_n \Delta x_i / l_i, \quad d_{nyi} = d_n \Delta y_i / l_i, \quad (5)$$

$$a_{xi} = \Delta x_i - d_{nxi}, \quad a_{yi} = \Delta y_i - d_{nyi}, \quad (6)$$

$$a_{zi} = \frac{1}{2} (y_i + y_{i+1}) \sin \frac{\pi}{n}, \quad (7)$$

где d_n – диаметр узла сети; d_{nx} , d_{ny} – проекции узла на оси координат; a_{xi} , a_{yi} , a_{zi} – проекции веревки на оси координат.

Для ориентации T90 получаем:

$$a_{xi} = \Delta x_i, \quad a_{yi} = \Delta y_i, \quad a_{zi} = \frac{1}{2} (y_i + y_{i+1}) \sin \frac{\pi}{n} - d_n \cos \frac{\pi}{n}. \quad (8)$$

Рассмотрим установившийся режим при постоянной скорости течения потока жидкости, направленного противоположно направлению оси Ox . Под действием потока жидкости и внешнего воздействия (улова) на сетную конструкцию действуют внешние силы. В установившемся режиме внешние силы уравниваются внутренними силами напряжения в элементах сетной конструкции так, что суммарная сила в любой точке конструкции равна 0.

В расчетной схеме считаем, что все силы приложены только к узлам сети. При этом внешние силы, приложенные к веревке, распределены поровну между двумя смежными узлами. Внутренние силы вызваны только растяжением веревок, являясь силами натяжения T_i , приложенными к смежным узлам с противоположным знаком.

Для каждого ряда i , кроме последнего, запишем уравнения, связывающие силовые и геометрические характеристики ряда. При этом учтем, что на узел действуют силы от четырех веревок, попарно для каждого ряда. Для первого ряда $i = 0$ получаем:

$$2T_0\Delta x_0/l_0 - R_{x0} + F_{x0} = 0, \quad 2T_0\Delta y_0/l_0 + R_{y0} + F_{y0} = 0. \quad (9)$$

Для остальных рядов:

$$\begin{aligned} 2T_i\Delta x_i/l_i - 2T_{i-1}\Delta x_{i-1}/l_{i-1} - R_{xi} - R_{xi-1} + F_{xi} + F_{xi-1} &= 0, \\ 2T_i\Delta y_i/l_i - 2T_{i-1}\Delta y_{i-1}/l_{i-1} + R_{yi} + R_{yi-1} + F_{yi} + F_{yi-1} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где R_x (индекс опускаем) – гидродинамическая сила лобового сопротивления, действующая на веревку и половину узла; R_y – гидродинамическая распорная сила, действующая на веревку и половину узла; F_x , F_y – проекции силы внешнего воздействия, вызванной давлением улова.

Для вычисления гидродинамических сил существуют различные методы. Более точный, но значительно трудоемкий с точки зрения вычислительных затрат метод заключается в численном решении систем дифференциальных уравнений гидродинамики Навье-Стокса, при этом для двумерной постановки задачи можно применять метод «вихрь-функция тока». Более простым, но менее точным, приемлемым для оценочных расчетов, является метод приближенного вычисления гидродинамических сил, основанный на эмпирических зависимостях, выведенных для сети:

$$R_x = c_x \frac{\rho v^2}{2} F_H, \quad R_y = c_y \frac{\rho v^2}{2} F_H, \quad (11)$$

$$c_x = c_0 + (c_{90} - c_0) |\Delta y / l|, \quad c_y = c_{90} \Delta x \Delta y / l^2, \quad (12)$$

$$c_0 = F_o Re^{-0,165}, \quad c_{90} = 16(2F_o / Re)^{0,28}, \quad (13)$$

$$F_H = da_0 + \pi d_n^2 / 8, \quad (14)$$

$$Re = dv / \nu, \quad (15)$$

$$F_o = \frac{d}{a_0} \frac{1}{u_x u_y}, \quad (16)$$

$$u_x = \frac{y}{a_0} \sin \frac{\pi}{n}, \quad u_y = \sqrt{1 - u_x}, \quad (17)$$

где c_x , c_y – гидродинамические коэффициенты для сети, расположенной под углом к потоку жидкости; c_0 – гидродинамический коэффициент для сети, расположенной параллельно потоку; c_{90} – гидродинамический коэффициент для сети, расположенной перпендикулярно потоку; F_H – площадь сечения веревки и половины узла; F_o – сплошность ячеи; Re – число Рейнольдса; v – скорость потока жидкости; ν – кинематическая вязкость жидкости; u_x , u_y – посадочные коэффициенты ячеи по длине и окружности сетной конструкции соответственно.

В описанных выше зависимостях (11) – (17) индекс ряда i опущен для простоты изложения.

Рассмотрим внешнее воздействие на сетную конструкцию на примере улова в траловом мешке. Проведем оценочное влияние улова заданного объема на геометрию тралового мешка. Будем считать, что весь улов находится в начале мешка (начиная от ряда $i = 0$), плотность улова постоянна по всему его объему и примерно равна плотности воды. Таким образом весом улова в воде мы пренебрегаем. При расчете гидродинамики улова будем считать, что форма улова является полусферой, обращенной вогнутой частью навстречу потоку жидкости, улов обладает свойствами жидкости, а давление внутри него распределено равномерно.

На полусферу со стороны жидкости действует давление:

$$P = c_{\text{хк}} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (18)$$

где $c_{\text{хк}}$ – гидродинамический коэффициент сопротивления улова. Для полусферы, обращенной вогнутой частью навстречу потоку жидкости, коэффициент сопротивления близок к коэффициенту сопротивления диска и находится в диапазоне от 1,17 до 1,42. В приближенных расчетах, а у нас оценочный расчет влияния улова, $c_{\text{хк}} = 1,2$ [4].

Запишем уравнение, связывающее объем улова с его уровнем в траловом мешке:

$$V = \sum_{i=0}^{k-1} V_i + V_p, \quad (19)$$

при

$$V_i = \frac{1}{3} (S_i + \sqrt{S_i S_{i+1}} + S_{i+1}) \Delta x_i, \quad V_p = \frac{1}{3} (S_p + \sqrt{S_p S_k} + S_k) (x_p - x_k), \quad (20)$$

где V – объем улова; V_i – объем ряда i ; V_p – объем улова в последнем заполненном ряду $i = k$; S_i, S_{i-1}, S_k – площади сечения i -го, $i-1$ и k -го ряда соответственно; S_p – площадь сечения ряда на уровне улова x_p .

Для расчета объема ряда использована формула расчета объема правильной усеченной пирамиды [5]. Площади сечений определяются по формуле расчета площади вписанного правильного многоугольника:

$$S_i = \frac{n}{2} y_i^2 \sin \frac{2\pi}{n}, \quad S_p = \frac{n}{2} y_p^2 \sin \frac{2\pi}{n}, \quad y_p = (x_p - x_k) \frac{\Delta y_k}{\Delta x_k} + y_k, \quad (21)$$

где y_p – радиус ряда на уровне улова x_p .

Вычислим силы внешнего воздействия, вызванные давлением улова. Площадь ряда i , приходящаяся на одну веревку:

$$s_i = \frac{1}{2} l_i (y_i + y_{i+1}) \sin \frac{\pi}{n}. \quad (22)$$

Для ряда $i = 0$:

$$F_{x0} = P s_0 \frac{\Delta x_0}{l_0}, \quad F_{y0} = 0. \quad (23)$$

Для рядов $i = [1 \dots k-1]$:

$$F_{xi} = \frac{1}{2} P \left(s_i \frac{\Delta x_i}{l_i} + s_{i-1} \frac{\Delta x_{i-1}}{l_{i-1}} \right), \quad F_{yi} = \frac{1}{2} P \left(s_i \frac{\Delta y_i}{l_i} + s_{i-1} \frac{\Delta y_{i-1}}{l_{i-1}} \right). \quad (24)$$

Для ряда $i = k$:

$$F_{xi} = \frac{1}{2} P \left(s_p \frac{\Delta x_k}{l_k} + s_{k-1} \frac{\Delta x_{k-1}}{l_{k-1}} \right), \quad F_{yi} = \frac{1}{2} P \left(s_p \frac{\Delta y_k}{l_k} + s_{k-1} \frac{\Delta y_{k-1}}{l_{k-1}} \right). \quad (25)$$

$$s_p = \frac{1}{2} l_k \frac{x_p}{x_k} \left(2y_k + \Delta y_k \frac{x_p}{x_k} \right) \sin \frac{\pi}{n}, \quad (26)$$

где s_p – часть площади ряда k до уровня улова, приходящаяся на одну веревку.

Для рядов $i = [k+1 \dots 2m-1]$ без улова:

$$F_{xi} = 0, \quad F_{yi} = 0. \quad (27)$$

Подставив (26), (22) и (18) в (25), (22) и (18) в (24) и (23), (27), (25), (24) и (23) в (9) и (10), (21) в (20), (20) в (19), (17) в (16), (16) и (15) в (13), (14) и (12) в (11), (11) в (9) и (10), (5) в (6), (6) и (7) или (8) в зависимости от ориентации ячеек в (4) и приравняв правые части (3) и (4) с учетом (1) и (2), мы получим $6m$ уравнений с $6m$ неизвестными $x_1, \dots, x_{2m}, y_1, \dots, y_{2m-1}, T_0, \dots, T_{2m-1}, x_p$.

Разрешив полученную систему уравнений относительно неизвестных любым численным методом оптимизации, например методом Левенберга-Марквардта при начальных приближениях неизвестных:

$$x_i = i \sqrt{a_0^2 - \frac{D^2}{4} \sin^2 \frac{\pi}{n}}, \quad y_i = \frac{D}{4m} i, \quad T_i = 0,$$

мы решим поставленную задачу.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По предложенной математической модели авторами была разработана программа для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка», позволяющая рассчитать форму мешка и нагрузки в его элементах при различных конструктивных параметрах элементов тралового мешка, скорости траления, ориентации ячеек с последующей их визуализацией в трехмерном, двухмерном и числовом представлениях. Область применения разработанной программы: научные исследования, учебный процесс, проектирование и эксплуатация рыболовных тралов.

Для численного эксперимента был взят траловый мешок со следующими конструктивными характеристиками: $m = 20$; $n = 10$; $D = 50$ мм; $d = 2$ мм; $k_y = 3$; $E = 1,1$ ГПа. Параметры внешнего воздействия: $v = 2$ м/с; $\rho = 1030$ кг/м³; $\nu = 1,004$ мм²/с; $V = 500$ см³. При задании диаметра узла используется коэффициент утолщения узла $k_y = d_n / d$.

Результаты работы программы представлены на рис. 6 и 7.

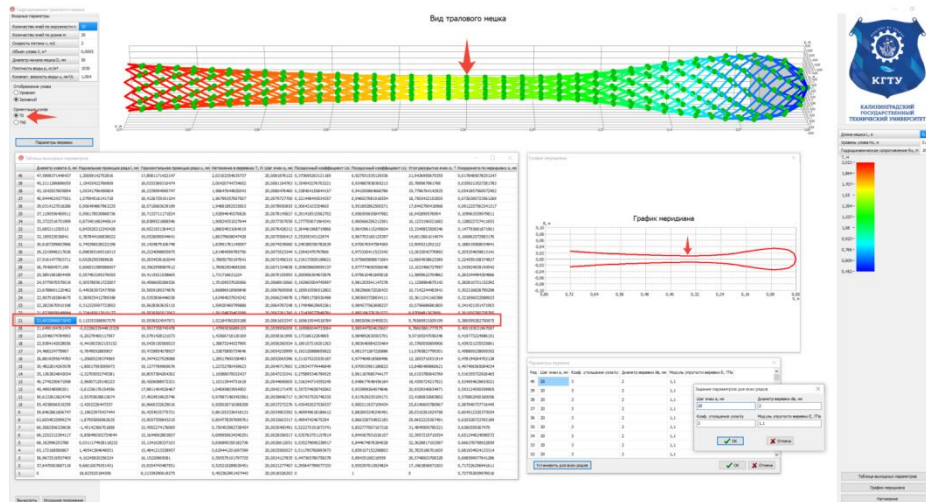


Рис. 6. Численное моделирование тралового мешка с ориентацией ячеи T0
Fig. 6. Numerical simulation of the trawl codend with T0 mesh orientation

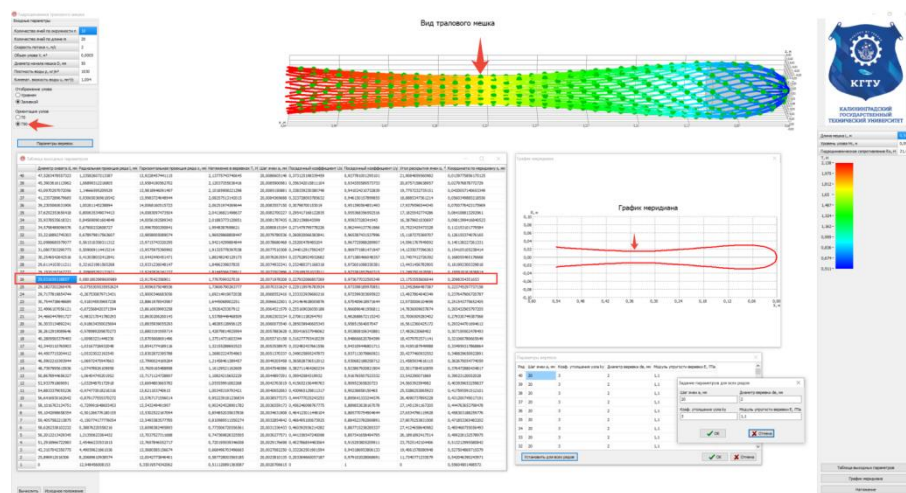


Рис. 7. Численное моделирование тралового мешка с ориентацией ячеи T90
Fig. 7. Numerical simulation of the trawl codend with T90 mesh orientation

По результатам моделирования видно (на рис. 6 и 7 выделены рамкой и стрелками), что минимальный диаметр тралового мешка при ориентации ячеи T0 составляет 21,6 мм, что меньше диаметра при T90, равного 29,0 мм. При этом длина зоны сужения визуально для T90 меньше, чем для T0. Таким образом, результаты, полученные при помощи численного моделирования по разработанной авторами математической модели, согласуются с результатами, полученными при натурном эксперименте в гидроканале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования можно применять при проектировании и эксплуатации рыболовных тралов, в системах виртуальной реальности (тренажерных комплексах), дальнейших фундаментальных и прикладных научных

исследованиях в области гидромеханики сетных инженерных конструкций в целом и орудий рыболовства в частности.

Разработанная математическая модель и программное обеспечение «Гидродинамика тралового мешка» открывают новые возможности для проектирования орудий рыболовства. Инженеры могут использовать модель для виртуального тестирования различных конфигураций тралов, включая изменения в ориентации ячеек (T0 и T90) и размерах мешка, без необходимости в дорогостоящих физических экспериментах. Модель помогает минимизировать износ сетей за счет точного расчета нагрузок, снижая энергозатраты на буксировку. В прикладных исследованиях результаты играют ключевую роль в интеграции траловых систем в конструкцию судов. Судостроители могут применять результаты для расчета нагрузок на элементы мешка и их влияния на корпус судна, оптимизируя системы подъема и спуска трала для предотвращения аварий и повышения безопасности экипажа.

Список источников

1. Digre, H. Effect of trawling with traditional and 'T90' trawl codends on fish size and on different quality parameters of cod *Gadus morhua* and haddock *Melanogrammus aeglefinus* / H. Digre, U. J. Hansen, U. Erikson // *Fish Sci.* – 2010. – Vol. 76. – P. 549–559.
2. Коновалова, К. В. Оценка сопротивления траловых мешков с делью T0, T90 / К. В. Коновалова. – DOI: 10.24143/2073-5529-2025-1-102-111 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2025. – № 1. – С. 102–111.
3. Ражев, А. О. Механика сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства: автореферат дис. ... на соискание учен. степени кандидата техн. наук : спец. 05.18.17 / Ражев Алексей Олегович: Калинингр. гос. техн. ун-т. – Калининград, 2020. – 20 с.
4. Hoerner, S. F. Fluid-Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance / S. F. Hoerner. – Bricktownship, NJ, 1965. – 455 p.
5. Hossain, M. A. Geometric Modeling of Truncated Pyramids in Engineering Design / M. A. Hossain, A. B. M. Saiful Islam // *Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2010. – Vol. 5, № 2. – P. 45–52.

References

1. Digre, H. Effect of trawling with traditional and 'T90' trawl codends on fish size and on different quality parameters of cod *Gadus morhua* and haddock *Melanogrammus aeglefinus* / H. Digre, U. J. Hansen, U. Erikson // *Fish Sci.* – 2010. – Vol. 76. – P. 549–559.
2. Konovalova, K. V. Assessment of resistance of trawl cod-ends with netting T0, T90 / K. V. Konovalova. – DOI: 10.24143/2073-5529-2025-1-102-111 // *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries.* – 2025. – № 1. – P. 102–111.
3. Razhev, A. O. Mechanics of mesh gear of inland and coastal fisheries: abstract of thesis for the degree of candidate of technical sciences: 05.18.17 / Razhev Aleksey Olegovich: Kaliningrad State Technical University. – Kaliningrad, 2020. – 20 p.

4. Hoerner, S. F. Fluid-Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance / S. F. Hoerner. – Bricktownship, NJ, 1965. – 455 p.
5. Hossain, M. A. Geometric Modeling of Truncated Pyramids in Engineering Design / M. A. Hossain, A. B. M. Saiful Islam // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2010. – Vol. 5, № 2. – P. 45–52.

Информация об авторах

А. О. Ражев – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
А. А. Недоступ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства
П. В. Насенков – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленного рыболовства
К. В. Коновалова – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры промышленного рыболовства

Information about the authors

A. O. Razhev – Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow
A. A. Nedostup – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Commercial Fisheries
P. V. Nasenkov – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Commercial Fisheries
K. V. Konovalova – Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of the Department of Commercial Fisheries

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 31.10.2025; одобрена после рецензирования 10.11.2025; принята к публикации 20.11.2025.
The article was submitted 31.10.2025; approved after reviewing 10.11.2025; accepted for publication 20.11.2025.

Научная статья

УДК 663.1

DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-50-63

**Влияние концентрации макроэлементов на рост, содержание
фотосинтетических пигментов и состав жирных кислот микроводоросли
*Scenedesmus rubescens***

Алена Алексеевна Чижова^{1✉}, Екатерина Александровна Буденкова²,
Владимир Сергеевич Шушарин³, Любовь Сергеевна Дышлюк⁴

^{1,2,3,4}Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград,
Россия

¹alena_chizhova_2019@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-3875-8437>

²budenkovakaterina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4854-5459>

³vova-shusharin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4477-2764>

⁴soldatovals1984@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7333-8411>

Аннотация. Увеличение выбросов парниковых газов и истощение запасов ископаемого топлива ставят под угрозу устойчивое развитие и здоровье населения. В этих условиях возрастает интерес к микроводорослям, которые способны смягчить эти вызовы благодаря высокой продуктивности и широкому спектру применений. Виды рода *Scenedesmus* представляются перспективным сырьем для производства биодизеля и получения пигментов. В настоящей работе исследовалось влияние состава питательной среды на рост, накопление пигментов и жирнокислотный профиль микроводоросли *Scenedesmus rubescens* D-292. Культивирование штамма осуществлялось на среде Громова с различным содержанием KNO_3 (0,1, 1,0 и 10 г/л), $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$ (0 и 0,262 г/л), $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ и NaHCO_3 (0, 0,2 и 2,0 г/л). Максимальный рост штамма, накопление пигментов (10 мг/г сух. биомассы) и полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) (65 % от общего количества жирных кислот (ЖК)) отмечены при избытке в среде источника серы (2,0 г/л $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) и дефиците азота, фосфора и углерода. Наибольший выход ЖК (229,9 мг/г сух. биомассы) зафиксирован при избытке в среде источника углерода (2,0 г/л NaHCO_3) и ограничении других макроэлементов. В липидном профиле штамма преобладали пальмитиновая (14,4–17,5 %), олеиновая (13,8–29,1 %), линолевая (10,1–13,8 %) и α -линоленовая (19,7–36,7 %) кислоты. Несмотря на ограниченный потенциал штамма для производства биодизеля, он представляет интерес как источник натуральных пигментов и липидов, богатых ПНЖК и α -линоленовой кислотой (до 37 % от общего количества ЖК).

Ключевые слова: микроводоросли, *Scenedesmus*, культивирование, липиды, жирные кислоты, биодизель, пигменты.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-672 от 18.09.2024).

Для цитирования: Чижова А. А., Буденкова Е. А., Шушарин В. С., Дышлюк Л. С. Влияние концентрации макроэлементов на рост, содержание фотосинтетических пигментов и состав жирных кислот микроводоросли *Scenedesmus rubescens* // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 50–63. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-50-63.

Original article

Influence of macronutrient concentration on the growth, photosynthetic pigment content, and fatty acid composition of the microalga *Scenedesmus rubescens*

Alena A. Chizhova¹✉, Ekaterina A. Budenkova², Vladimir S. Shusharin³, Lyubov S. Dyshlyuk⁴

^{1,2,3,4}Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

¹alena_chizhova_2019@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3875-8437>

²budenkovakaterina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4854-5459>

³vova-shusharin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4477-2764>

⁴soldatovals1984@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7333-8411>

Abstract. The rise in greenhouse gas emissions and the depletion of fossil fuel reserves threaten sustainable development and public health. In this context, microalgae are receiving increasing attention owing to their high productivity and broad biotechnological potential. Species of the genus *Scenedesmus* are considered promising raw materials for biodiesel production as well as for obtaining natural pigments with diverse biological activities. This study examines the effect of nutrient medium composition on the growth, pigment accumulation, and fatty acid profile of the microalga *Scenedesmus rubescens* D-292. The microalga has been cultivated in Gromov's medium with varying concentrations of KNO₃ (0.1, 1.0, and 10 g L⁻¹), K₂HPO₄×3H₂O (0 and 0.262 g L⁻¹), MgSO₄×7H₂O и NaHCO₃ (0, 0.2, and 2.0 g L⁻¹). The highest growth rate, pigment content (10 mg g⁻¹ dry biomass) and proportion of polyunsaturated fatty acids (65% of total fatty acids) has been observed under sulfur-rich conditions (2.0 g L⁻¹ MgSO₄×7H₂O) combined with nitrogen, phosphorus, and carbon limitation. The highest fatty acid yield (229.9 mg g⁻¹ dry biomass) has been obtained under carbon-rich conditions (2.0 g L⁻¹ NaHCO₃) with limited availability of other macronutrients. The lipid profile of the strain has been dominated by palmitic (14.4–17.5 %), oleic (13.8–29.1 %), linoleic (10.1–13.8 %), and α-linolenic (19.7–36.7 %) acids. Although the strain exhibits limited potential for biodiesel production, it demonstrates potential as a source of natural pigments and lipids rich in polyunsaturated fatty acids, particularly α-linolenic acid (up to 37% of total fatty acids).

Keywords: microalgae, *Scenedesmus*, cultivation, lipids, fatty acids, biodiesel, pigments.

Funding: this research has been carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-672 dated September 18, 2024).

For citation: Chizhova A. A., Budenkova E. A., Shusharin V. S., Dyshlyuk L. S. Influence of macronutrient concentration on the growth, photosynthetic pigment content, and fatty acid composition of the microalga *Scenedesmus rubescens*.

Izvestiya KGTU = KSTU News. 2026;(80):50–63. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-50-63.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается рост мирового спроса на ископаемое топливо, что приводит к истощению его запасов и ухудшению экологической ситуации за счет выбросов парниковых газов. Сегодня более 80 % мирового потребления энергии приходится на ископаемые источники, такие как нефть, уголь или природный газ, при этом ожидается, что к 2050 г. потребление энергии вырастет на 50 % по сравнению с 2020 г. В этой связи переход к возобновляемым источникам энергии становится ключевым фактором для снижения выбросов в атмосферу и обеспечения энергетической безопасности [1, 2]. Биодизель, получаемый путем переэтерификации возобновляемых липидов, рассматривается как экологически безопасная альтернатива традиционному дизельному топливу. За последние два десятилетия достигнут значительный прогресс в области получения биодизеля из биомассы микроводорослей [3].

Микроводоросли – фотосинтезирующие микроорганизмы, которые находят применение в различных отраслях, начиная с пищевой промышленности и заканчивая биоэнергетикой. Благодаря высокой скорости роста и способности накапливать значительное количество липидов (до 70 % от сухой биомассы), эти микроорганизмы считаются важным сырьем для получения биотоплива третьего поколения – биодизеля, биоэтанола, биобутанола, биогаза и биоводорода [4, 5]. Представители рода *Scenedesmus* являются продуцентами липидов, содержание которых в сухой биомассе достигает 20–60 %. Липидный профиль этих микроводорослей характеризуется повышенным содержанием ЖК с длиной цепи C16–C18, что делает виды *Scenedesmus* подходящим сырьем для производства биодизеля с улучшенными характеристиками сгорания и устойчивостью к низким температурам [6, 7]. *Scenedesmus* также накапливают фотосинтетические пигменты – хлорофиллы и каротиноиды (астаксантин, β -каротин, кантаксантин), используемые в пищевой, фармацевтической и косметической отраслях [8, 9].

Композиция питательных сред оказывает существенное влияние на рост микроводорослей и их биохимический состав. Регулирование уровня питательных веществ позволяет целенаправленно модулировать метаболизм микроводорослей и усиливать синтез целевых соединений. Создание стрессовых условий за счет ограничения поступления азота или фосфора позволяет усиливать аккумуляцию липидов и изменять жирнокислотный состав клеток микроводорослей [10]. Показано, что контролируемое ограничение азота (0,1 г/л NaNO_3) в среде BBM при двухэтапном культивировании микроводоросли *Scenedesmus obliquus* CCAP 276/3A приводит к увеличению содержания липидов с 33 до 45 % от сухого веса [11]. Дефицит азота также ассоциируется с повышенным синтезом каротиноидов в биомассе *Scenedesmus* и других микроводорослей [12, 13].

Целью настоящего исследования являлась оценка влияния доступности макроэлементов (углерода, фосфора, серы и азота) в питательной среде на рост, содержание фотосинтетических пигментов и состав ЖК микроводоросли *Scenedesmus rubescens*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Штамм *Scenedesmus rubescens* (Dang.) Kessler, Schafer, Hummer, Kloboucek et Huss D-292 (далее *S. rubescens* D-292) получен из коллекции микроводорослей и цианобактерий IPPAS Института физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН. Для выращивания микроводоросли использовали классическую питательную среду Громова [14]. Культивирование проводили при температуре 25 ± 2 °C, интенсивности освещения 160 мкмоль/(м²с) (белые светодиодные лампы) и фотопериоде 16:8 ч света/темноты.

В рамках эксперимента *S. rubescens* D-292 выращивали на трех модификациях среды Громова (G1-G3) в течение 14 сут. Модифицированные среды характеризовались различными концентрациями следующих компонентов: KNO₃, K₂HPO₄×3H₂O, MgSO₄×7H₂O и NaHCO₃ (табл. 1). Содержание остальных компонентов модифицированных сред соответствовало классической среде Громова. Контроль – классическая среда Громова. Рост штамма оценивали путем фиксирования оптической плотности суспензий при 750 нм на 0, 4, 7 и 14 сутки культивирования. Сбор биомассы осуществляли путем центрифугирования (3900 об./мин, 10 мин). Клеточные осадки сублимационно высушивали и хранили при температуре –20 °C до проведения последующих анализов.

Таблица 1. Питательные среды для культивирования *S. rubescens* D-292

Table 1. Nutrient media for cultivation of *S. rubescens* D-292

Компоненты среды, г/л	Питательные среды			
	Контроль	G1	G2	G3
KNO ₃	1,0	10	0,1	0,1
K ₂ HPO ₄ ×3H ₂ O	0,262	0	0	0
MgSO ₄ ×7H ₂ O	0,2	0	2,0	0
NaHCO ₃	0,2	0	0	2,0

Для определения содержания фотосинтетических пигментов 50 мг лиофилизированной биомассы экстрагировали 5 мл 90 %-го ацетона. Смесь обрабатывали ультразвуком (амплитуда 40 %, 5 мин, на льду) для разрушения клеточных стенок, после чего центрифугировали при 3900 об./мин в течение 10 мин. Супернатант отбирали, а экстракцию повторяли до обесцвечивания растворителя. Общее содержание хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически по значениям оптической плотности при 470, 645 и 662 нм с использованием уравнений, приведенных в работе [15].

Жирнокислотный состав липидов анализировали методом газовой хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией (ГХ-МС) [16]. Сухую биомассу (20–30 мг) обрабатывали 1 М КОН в 80 %-ом водном этаноле с добавлением маргаиновой кислоты (1000 мкг/мл, внутренний стандарт). Свободные ЖК экстрагировали *n*-гексаном. Полученный раствор высушивали в потоке аргона. Сухой остаток обрабатывали 1 % H₂SO₄ в абсолютном метаноле и инкубировали 30 мин при 55 °C для получения метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК). Полученные МЭЖК экстрагировали *n*-гексаном и хранили при –20 °C до анализа. Анализ МЭЖК выполняли на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000 (Хроматэк, Россия) с квадрупольным масс-детектором и капиллярной

колонок CR-FAME (100 м × 0,25 мм). Объем вводимой пробы – 1 мкл, газ-носитель – гелий (1 мл/мин). Температурная программа печи была следующей: 8 мин удержание при 60 °С, нагрев от 60 до 175 °С со скоростью 10 °С/мин (5 мин удержание при этой температуре), до 250 °С – со скоростью 9 °С/мин (24 мин удержание при этой температуре). Рабочая температура источника ионов масс-детектора составляла 230 °С, энергия ионизации – 70 эВ, диапазон сканирования масс – 50– 450 m/z.

Статистическая обработка данных и построение графиков осуществляли с помощью программного обеспечения OriginPro 2025 (OriginLab Corp., США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано на рис. 1, максимальная плотность культуры ($0,42 \pm 0,04$) к концу культивирования наблюдалась на модифицированной среде G2 с повышенным содержанием серы (2 г/л $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$), дефицитом азота (0,1 г/л KNO_3) и отсутствием источников фосфора (0 г/л $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$) и углерода (0 г/л NaHCO_3). Увеличение концентрации NaHCO_3 до 2 г/л при одновременном дефиците остальных макроэлементов в среде G3 привело к снижению темпов роста *S. rubescens* D-292 по сравнению со средой G2. В то же время минимальный рост штамма наблюдался на контрольной среде и среде G1, содержащей повышенную концентрацию азота (10 г/л KNO_3) при отсутствии других макроэлементов.

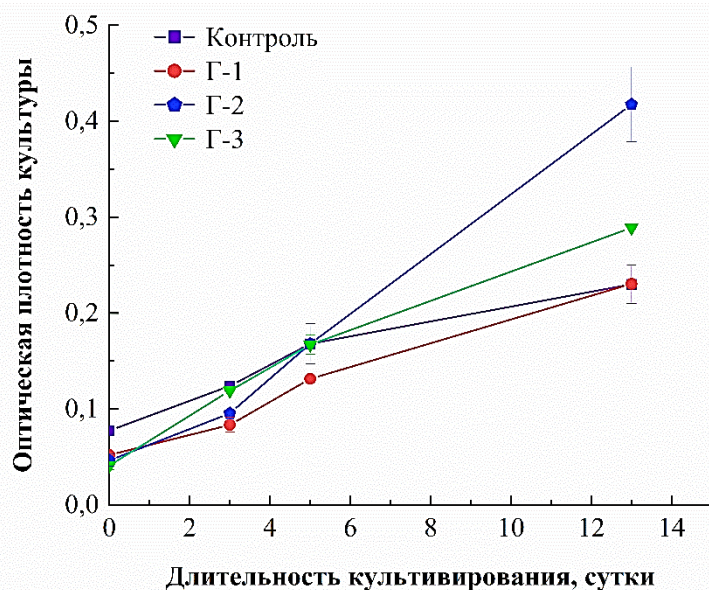


Рис. 1. Кривые роста микроводоросли *S. rubescens* D-292 при культивировании на средах различного состава

Fig. 1. Growth curves of the microalga *S. rubescens* D-292 cultivated in media of different compositions

Полученные результаты показывают, что рост *S. rubescens* D-292 зависит от доступности макроэлементов в среде Громова, при этом наибольшее влияние оказывает содержание MgSO_4 . Сера является необходимым элементом для нормальной жизнедеятельности микроводорослей, ее дефицит приводит к снижению

накопления биомассы вследствие нарушения целостности клеточных мембран, а также угнетения синтеза витаминов, регуляторных соединений и вторичных метаболитов [17]. Культивирование *S. rubescens* D-292 на среде G2, содержащей повышенную концентрацию MgSO_4 (2 г/л), обеспечивало наибольшую плотность клеток по сравнению с другими средами, что согласуется с литературными данными о стимулирующем действии серы на рост различных видов микроводорослей [18–20].

Микроводоросли также рассматриваются как источник натуральных пигментов с широкой палитрой оттенков и разнообразной биологической активностью [21]. Из рис. 2 видно, что накопление пигментов в биомассе *S. rubescens* D-292 варьировало в зависимости от состава питательной среды. Максимальное содержание хлорофилла *a* ($4,12 \pm 0,94$ мг/г сух. веса) зафиксировано в культуре, выращенной на среде G2. Аналогичная тенденция отмечалась и для хлорофилла *b*, содержание которого достигало $3,57 \pm 0,24$ мг/г. Наибольшее накопление каротиноидов наблюдалось на средах G2 и G3 – $2,44 \pm 0,33$ мг/г и $2,18 \pm 0,49$ мг/г соответственно. На контрольной среде и в варианте G1 содержание хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов было минимальным.

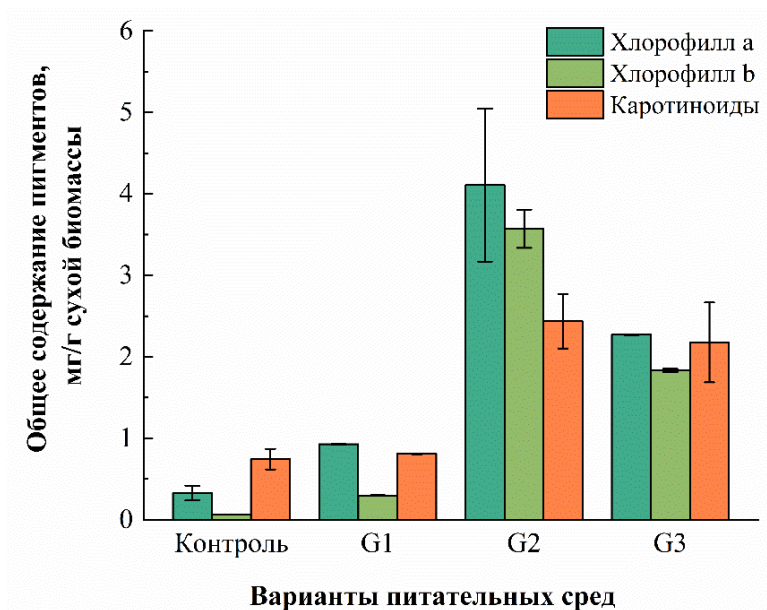


Рис. 2. Общее содержание хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов в биомассе *S. rubescens* D-292 при культивировании на средах различного состава
Fig. 2. Total chlorophyll (*a* and *b*) and carotenoid content in *S. rubescens* D-292 biomass cultivated in media of different compositions

Как следствие, модифицированные среды G2 и G3 обеспечивали увеличение выхода хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов по сравнению с контролем. Эти данные согласуются с данными предыдущего исследования [22], где показано, что азотное голодание способствует увеличению концентрации каротиноидов в культуре *S. rubescens* KNUA042 до 1,8 мг/л.

Жирнокислотный состав является ключевым показателем пригодности липидов микроводорослей для производства биодизельного топлива. Для получения

качественного биодизеля липиды должны включать как насыщенные короткоцепочечные жирные кислоты (НЖК; C16:0 и C18:0), так и мононенасыщенные жирные кислоты (МНЖК; C16:1 и C18:1) [23]. При культивировании на исследуемых питательных средах микроводоросль *S. rubescens* D-292 аккумулировала 70,2–229,9 мг/г сух. биомассы МЭЖК (рис. 3). Максимальная концентрация МЭЖК ($229,9 \pm 6,3$ мг/г) зафиксирована на среде G3. На средах G1 и G2 содержание МЭЖК было примерно в 1,5 раза ниже по сравнению с контролем – $70,2 \pm 3,3$ мг/г и $76,6 \pm 7,2$ мг/г соответственно.

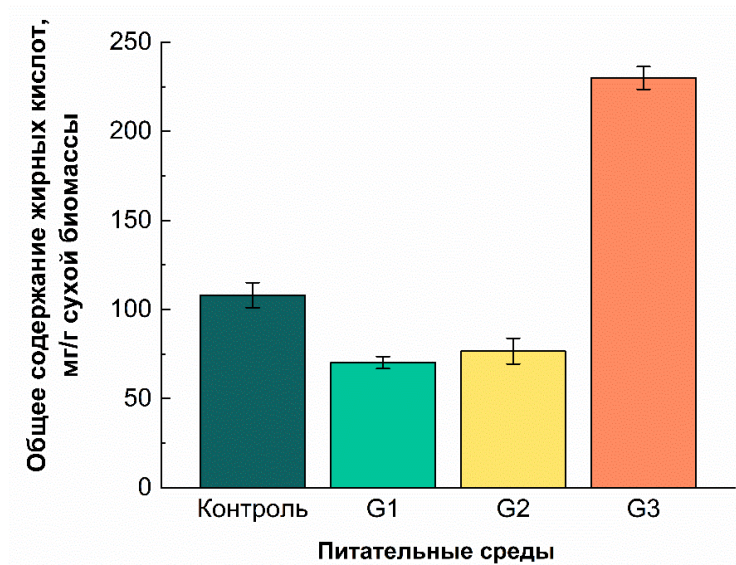


Рис. 3. Общее содержание МЭЖК штамма *S. rubescens* D-292 при культивировании на средах различного состава

Fig. 3. Total FAME content of *S. rubescens* strain cultivated in media of varying composition

Сочетание повышенного содержания углерода (2 г/л NaHCO_3) и ограниченного количества азота (0,1 г/л KNO_3) в среде G3 способствовало накоплению липидов в клетках *S. rubescens* D-292. Полученные результаты сопоставимы с данными литературы, согласно которым азотное голодание приводит к увеличению выхода липидов и ЖК у представителей *Scenedesmus* [24, 25]. Sonkar и Mallick [26] показали, что дефицит KNO_3 стимулирует биосинтез липидов в культуре *S. obliquus*, одновременно ограничивая производство биомассы после седьмых суток культивирования. При азотном голодании микроводоросли перенаправляют метаболические потоки от синтеза белков и нуклеиновых кислот к образованию триацилглицеринов и запасных липидов. Доступность углерода также является ключевым метаболическим фактором для биосинтеза крахмала и липидов в клетках микроводорослей. Поступление избыточного углерода в условиях азотного голодания приводит к перенаправлению метаболизма микроводорослей от процессов роста и синтеза белков к накоплению липидов, главным образом триацилглицеринов [27].

Из рис. 4 видно, что в жирнокислотном профиле липидов штамма *S. rubescens* D-292 доминировали ПНЖК, доля которых составляла от 48,1 до 64,7 % от общего содержания ЖК. Доля МНЖК находилась в пределах 17,8–32,9 %, а НЖК – от 17,5 до 19,3 %. При культивировании штамма на

модифицированной среде G2 содержание ПНЖК было максимальным и достигало $64,7 \pm 0,6$ %. С другой стороны, увеличение доли МНЖК (до 32,9 %) обеспечивала питательная среда G3.

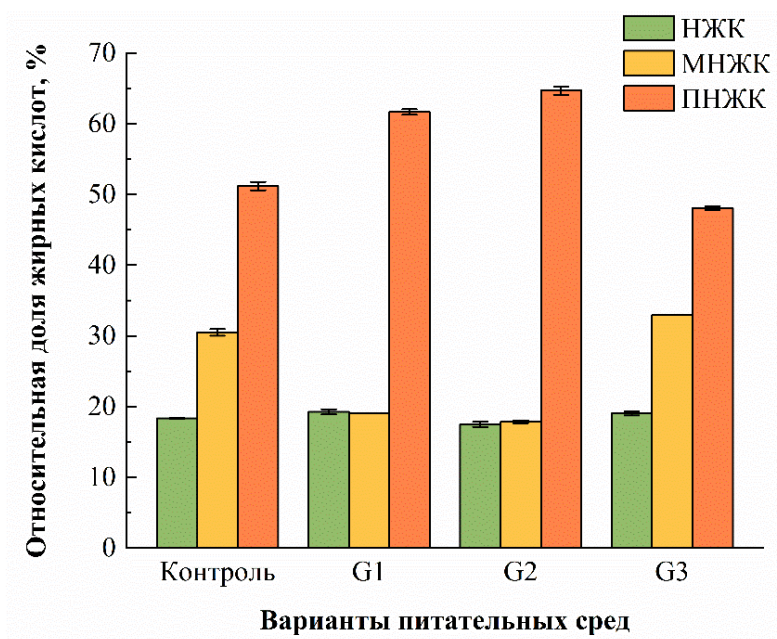


Рис. 4. Распределение НЖК, МНЖК и ПНЖК в профиле жирных кислот штамма *S. rubescens* D-292 при культивировании на различных питательных средах
Fig. 4. Distribution of SFA, MUFA and PUFA in the fatty acid profile of *S. rubescens* D-292 when cultivated on media of different compositions

В липидном профиле *S. rubescens* D-292 преобладали пальмитиновая (C16:0, 14,4–17,5 %), олеиновая (C18:1Δ9, 13,8–29,1 %), линолевая (C18:2Δ9,12, 10,1–13,8 %) и α-линоленовая (C18:3Δ9,12,15, 19,7–36,7 %) кислоты. При культивировании штамма на средах G1 и G2 увеличивалась доля α-линоленовой кислоты до $34,2 \pm 0,1$ % и $36,7 \pm 0,2$ % соответственно. Lv и соавторы [28] также сообщают, что липидный профиль *S. rubescens* SX отличается высоким содержанием ПНЖК, преимущественно линолевой и α-линоленовой, составляющих 48,9–55,2 % от общего количества ЖК. Модифицированная среда G3 способствовала повышенному накоплению олеиновой кислоты ($29,1 \pm 0,1$ %), тогда как при культивировании штамма на средах G1 и G2 ее содержание оставалось минимальным – $15,4 \pm 0,1$ % и $13,8 \pm 0,3$ % соответственно. Полученные результаты согласуются с работой [29], где показано, что *Scenedesmus obtusus* (ON089666.1) накапливает высокий уровень олеиновой кислоты, достигающий до 22,9 % от общего содержания ЖК.

Все вышесказанное подтверждает потенциал штамма *S. rubescens* D-292 для получения липидов, обогащенных ПНЖК (до 65 %), в частности α-линоленовой кислотой (до 37 %), однако высокий уровень ненасыщенных жирных кислот и низкое содержание пальмитиновой (до 17 %) и стеариновой (до 3 %) кислот ограничивают его применение в производстве биодизеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследовано влияние доступности макроэлементов (азота, фосфора, серы и углерода) на рост микроводоросли *S. rubescens* D-292, а также накопление фотосинтетических пигментов и ЖК. Результаты показали, что выращивание штамма *S. rubescens* D-292 в условиях повышенного содержания серы (2 г/л $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) и дефицита других макроэлементов способствовало его активному росту и накоплению фотосинтетических пигментов. В указанных условиях также наблюдалось увеличение доли ПНЖК в липидном профиле штамма – с 51,2 до 64,7 %, главным образом за счет повышения содержания α -линоленовой кислоты (с 24,1 до 36,7 %). При культивировании *S. rubescens* D-292 на среде с избытком источника углерода (2 г/л NaHCO_3) при дефиците азота, фосфора и серы отмечался активный рост штамма и максимальное накопление ЖК (229,9 мг/г сух. биомассы), в составе которых преобладала олеиновая кислота (до 29,1 %). Высокое содержание ПНЖК ограничивает потенциал штамма *S. rubescens* D-292 в производстве биодизельного топлива. Вместе с тем его биомасса представляет интерес в качестве источника натуральных пигментов и липидов, богатых ПНЖК, в частности ценными ω -3 (α -линоленовой) ЖК.

Список источников

1. Biofuels production: a review on sustainable alternatives to traditional fuels and energy sources / K. Malik, S. C. Capareda, B. R. Kamboj [et al.]. – DOI: 10.3390/fuels5020010 // Fuels. – 2024. – Vol. 5 (2). – P. 157–175.
2. El-Araby, R. Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future / R. El-Araby. – DOI: 10.1186/s13068-024-02571-9 // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. – 2024. – Vol. 17, 129.
3. Microalgae biofuels: illuminating the path to a sustainable future amidst challenges and opportunities / M. Wang, X. Ye, H. Bi [et al.]. – DOI: 10.1186/s13068-024-02461-0 // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. – 2024. – Vol. 17, 10.
4. The role of microalgae in the bioeconomy / F. G. A. Fernández, A. Reis, R. H. Wijffels [et al.]. – DOI: 10.1016/j.nbt.2020.11.011 // New Biotechnology. – 2021. – Vol. 61. – P. 99–107.
5. Biofuel production from microalgae: challenges and chances / A. T. Hoang, R. Sirohi, A. Pandey [et al.]. – DOI: 10.1007/s11101-022-09819-y // Phytochemistry Reviews. – 2023. – Vol. 22. – P. 1089–1126.
6. Comparison of monoculture and mixed culture (*Scenedesmus obliquus* and wild algae) for C, N, and P removal and lipid production / Z. Qu, P. Duan, X. Cao [et al.]. – DOI: 10.1007/s11356-019-05339-z // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26. – P. 20961–20968.
7. Effects of nitrogen forms and supply mode on lipid production of microalga *Scenedesmus obliquus* / M. An, L. Gao, W. Zhao [et al.]. – DOI: 10.3390/en13030697 // Energies. – 2020. – Vol. 13 (3), 697.
8. Biosynthesis and biotechnological interventions for commercial production of microalgal pigments: A review / A. Srivastava, M. Kalwani, H. Chakdar [et al.] // Bioresource Technology. – 2022. – Vol. 352, 127071.

9. Harnessing microalgae as sustainable cellular factories for biopharmaceutical production / H. Goshtasbi, Y. B. Okolodkov, A. Movafeghi [et al.]. – DOI: 10.1016/j.algal.2023.103237 // Algal Research. – 2023. – Vol. 74, 103237.
10. Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: an overview / M. A. Yaakob, R. M. S. R. Mohamed, A. Al-Gheethi [et al.]. – DOI: 10.3390/cells10020393 // Cells. – 2021. – Vol. 10 (2), 393.
11. Enhanced lipid production in *Scenedesmus obliquus* via nitrogen starvation in a two-stage cultivation process and evaluation for biodiesel production / J. Trivedi, D. Agrawal, N. Atray [et al.]. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123418 // Fuel. – 2022. – Vol. 316, 123418.
12. Corrêa, P. S. High-value compounds in three freshwater green micro-algae using nitrogen as an abiotic stressor: A study of the antioxidant potential of ethanolic extracts / P. S. Corrêa, M. M. Freitas, N. S. Caetano. – DOI: 10.1016/j.algal.2025.103964 // Algal Research. – 2025. – Vol. 86, 103964.
13. Unni, A. C. Therapeutic potential of microalga *Scenedesmus vacuolatus*: In vitro evaluation of antioxidant and anticancer activities / A. C. Unni, K. Karunakaran. – DOI: 10.1007/s41208-025-00809-3 // Thalassas: An International Journal of Marine Sciences. – 2025. – Vol. 41, 53.
14. Громов, Б. В. Коллекция культур водорослей лаборатории микробиологии биологического института Ленинградского Университета / Б. В. Громов // Культивирование коллекционных штаммов водорослей. – 1983. – С. 3–57.
15. Characterization and RNA-seq transcriptomic analysis of a *Scenedesmus obliquus* mutant with enhanced photosynthesis efficiency and lipid productivity / Y. Xi, L. Yin, Z. Y. Chi [et al.]. – DOI: 10.1038/s41598-021-88954-6 // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, 11795.
16. *Euonymus maximowiczianus* aril-derived long-term suspension-cultured cells: light and methyl jasmonate impact in the anthocyanin and VLCFA accumulation / A. V. Nosov, A. A. Fomenkov, R. A. Sidorov [et al.]. – DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.109293 // Plant Physiology and Biochemistry. – 2024. – Vol. 217, 109293.
17. Phosphorus and sulphur affecting the growth, nutrient uptake and amino acids composition in *Dunaliella salina* / Y. Sui, G. de Souza Celente, L. B. Navarro [et al.]. – DOI: 10.1016/j.procbio.2025.03.026 // Process Biochemistry. – 2025. – Vol. 153. – P. 276–283.
18. Morowvat, M. H. Effects of sulfur starvation on growth rates, biomass and lipid contents in the green microalga *Scenedesmus obliquus* / M. H. Morowvat, Y. Ghasemi. – DOI: 10.2174/1872208314666200109103059 // Recent Patents on Biotechnology. – 2020. – Vol. 14 (2). – P. 145–153.
19. Faruque, M. O. Photoautotrophic cultivation, lipid enhancement, and dry biomass characterization of microalgae *Scenedesmus dimorphus* for bioenergy application / M. O. Faruque, M. M. Hossain, S. A. Razzak. – DOI: 10.1007/s13369-023-08187-9 // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 48 (12). – P. 16263–16280.
20. Lipid accumulation during nitrogen and sulfur starvation in *Chlamydomonas reinhardtii* overexpressing a transcription factor / C. J. Salas-Montantes, O. González-Ortega, A. E. Ochoa-Alfaro [et al.]. – DOI: 10.1007/s13369-023-08187-9 // Journal of Applied Phycology. – 2018. – Vol. 30 (3). – P. 1721–1733.

21. Aizpuru, A. Traditional and new trend strategies to enhance pigment contents in microalgae / A. Aizpuru, A. González-Sánchez. – DOI: 0.1007/s11274-024-04070-3 // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2024. – Vol. 40, 272.
22. Nitrogen deficiency-dependent abiotic stress enhances carotenoid production in indigenous green microalga *Scenedesmus rubescens* KNUA042, for use as a potential resource of high value products / S. W. Jo, J. W. Hong, J. M. Do [et al.]. – DOI: 10.3390/su12135445 // Sustainability. – 2020. – Vol. 12 (13), 5445.
23. Impacts of the harvesting process on microalgae fatty acid profiles and lipid yields: Implications for biodiesel production / Z. Shokravi, H. Shokravi, A. E. Atabani [et al.]. – DOI: 10.1016/j.rser.2022.112410 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 161, 112410.
24. Interactive effect of temperature and nitrogen concentrations on the growth, biochemical composition, and fatty acid profiles in freshwater microalgae, *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus quadricauda* / A. Yuslan, H. Suhaimi, M. A. Ghaffar [et al.]. – DOI: 10.1007/s10811-025-03487-z // Journal of Applied Phycology. – 2025. – Vol. 37. – P. 1–24.
25. Abrha, G. T. Enhanced lipid accumulation in microalgae *Scenedesmus* sp. under nitrogen limitation / G. T. Abrha, A. Makaranga, P. P. Jutur. – DOI: 10.1016/j.enzmictec.2024.110546 // Enzyme and Microbial Technology. – 2025. – Vol. 182, 110546.
26. Sonkar, S. Development of a single phase nitrate feeding strategy for enhanced lipid productivity from green microalgae for biodiesel production / S. Sonkar, N. Mallick. – DOI: 10.1002/ep.12443 // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2017. – Vol. 36 (1). – P. 222–231.
27. Chen, H. Regulatory mechanisms of lipid biosynthesis in microalgae / H. Chen, Q. Wang. – DOI: 10.1111/brv.12759 // Biological Reviews. – 2021. – Vol. 96 (5). – P. 2373–2391.
28. Integration of wastewater treatment and flocculation for harvesting biomass for lipid production by a newly isolated self-flocculating microalga *Scenedesmus rubescens* SX / J. Lv, B. Guo, J. Feng [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118211 // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 240, 118211.
29. Enhanced lipid production and analysis of properties of biodiesel produced from freshwater microalgae *Scenedesmus obtusus* ON089666. 1 / V. Vinitha, S. Meignanalakshmi, K. G. Tirumurugan [et al.]. – DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101286 // Bioresource Technology Reports. – 2023. – Vol. 21, 101286.

References

1. Biofuels production: a review on sustainable alternatives to traditional fuels and energy sources / K. Malik, S. C. Capareda, B. R. Kamboj [et al.]. – DOI: 10.3390/fuels5020010 // Fuels. – 2024. – Vol. 5 (2). – P. 157–175.
2. El-Araby, R. Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future / R. El-Araby. – DOI: 10.1186/s13068-024-02571-9 // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. – 2024. – Vol. 17, 129.
3. Microalgae biofuels: illuminating the path to a sustainable future amidst challenges and opportunities / M. Wang, X. Ye, H. Bi [et al.]. – DOI: 10.1186/s13068-024-02461-0 // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. – 2024. – Vol. 17, 10.

4. The role of microalgae in the bioeconomy / F. G. A. Fernández, A. Reis, R. H. Wijffels [et al.]. – DOI: 10.1016/j.nbt.2020.11.011 // New Biotechnology. – 2021. – Vol. 61. – P. 99–107.
5. Biofuel production from microalgae: challenges and chances / A. T. Hoang, R. Sirohi, A. Pandey [et al.]. – DOI: 10.1007/s11101-022-09819-y // Phytochemistry Reviews. – 2023. – Vol. 22. – P. 1089–1126.
6. Comparison of monoculture and mixed culture (*Scenedesmus obliquus* and wild algae) for C, N, and P removal and lipid production / Z. Qu, P. Duan, X. Cao [et al.]. – DOI: 10.1007/s11356-019-05339-z // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26. – P. 20961–20968.
7. Effects of nitrogen forms and supply mode on lipid production of microalga *Scenedesmus obliquus* / M. An, L. Gao, W. Zhao [et al.]. – DOI: 10.3390/en13030697 // Energies. – 2020. – Vol. 13 (3), 697.
8. Biosynthesis and biotechnological interventions for commercial production of microalgal pigments: A review / A. Srivastava, M. Kalwani, H. Chakdar [et al.] // Bioresource Technology. – 2022. – Vol. 352, 127071.
9. Harnessing microalgae as sustainable cellular factories for biopharmaceutical production / H. Goshtasbi, Y. B. Okolodkov, A. Movafeghi [et al.]. – DOI: 10.1016/j.algal.2023.103237 // Algal Research. – 2023. – Vol. 74, 103237.
10. Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: an overview / M. A. Yaakob, R. M. S. R. Mohamed, A. Al-Gheethi [et al.]. – DOI: 10.3390/cells10020393 // Cells. – 2021. – Vol. 10 (2), 393.
11. Enhanced lipid production in *Scenedesmus obliquus* via nitrogen starvation in a two-stage cultivation process and evaluation for biodiesel production / J. Trivedi, D. Agrawal, N. Atray [et al.]. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123418 // Fuel. – 2022. – Vol. 316, 123418.
12. Corrêa, P. S. High-value compounds in three freshwater green micro-algae using nitrogen as an abiotic stressor: A study of the antioxidant potential of ethanolic extracts / P. S. Corrêa, M. M. Freitas, N. S. Caetano. – DOI: 10.1016/j.algal.2025.103964 // Algal Research. – 2025. – Vol. 86, 103964.
13. Unni, A. C. Therapeutic potential of microalga *Scenedesmus vacuolatus*: *In vitro* evaluation of antioxidant and anticancer activities / A. C. Unni, K. Karunakaran. – DOI: 10.1007/s41208-025-00809-3 // Thalassas: An International Journal of Marine Sciences. – 2025. – Vol. 41, 53.
14. Gromov, B. V. Collection of algal culture strains of the Laboratory of Microbiology of the Biological Institute of Leningrad University / B. V. Gromov // Cultivation of Collection Strains of Algae. – 1983. – P. 3–57.
15. Characterization and RNA-seq transcriptomic analysis of a *Scenedesmus obliquus* mutant with enhanced photosynthesis efficiency and lipid productivity / Y. Xi, L. Yin, Z. Y. Chi [et al.]. – DOI: 10.1038/s41598-021-88954-6 // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, 11795.
16. *Euonymus maximowiczianus* aril-derived long-term suspension-cultured cells: light and methyl jasmonate impact in the anthocyanin and VLCFA accumulation / A. V. Nosov, A. A. Fomenkov, R. A. Sidorov [et al.]. – DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.109293 // Plant Physiology and Biochemistry. – 2024. – Vol. 217, 109293.

17. Phosphorus and sulphur affecting the growth, nutrient uptake and amino acids composition in *Dunaliella salina* / Y. Sui, G. de Souza Celente, L. B. Navarro [et al.]. – DOI: 10.1016/j.procbio.2025.03.026 // Process Biochemistry. – 2025. – Vol. 153. – P. 276–283.
18. Morowvat, M. H. Effects of sulfur starvation on growth rates, biomass and lipid contents in the green microalga *Scenedesmus obliquus* / M. H. Morowvat, Y. Ghasemi. – DOI: 10.2174/1872208314666200109103059 // Recent Patents on Biotechnology. – 2020. – Vol. 14(2). – P. 145–153.
19. Faruque, M. O. Photoautotrophic cultivation, lipid enhancement, and dry biomass characterization of microalgae *Scenedesmus dimorphus* for bioenergy application / M. O. Faruque, M. M. Hossain, S. A. Razzak. – DOI: 10.1007/s13369-023-08187-9 // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 48(12). – P. 16263–16280.
20. Lipid accumulation during nitrogen and sulfur starvation in *Chlamydomonas reinhardtii* overexpressing a transcription factor / C. J. Salas-Montantes, O. González-Ortega, A. E. Ochoa-Alfaro [et al.]. – DOI: 10.1007/s13369-023-08187-9 // Journal of Applied Phycology. – 2018. – Vol. 30(3). – P. 1721–1733.
21. Aizpuru, A. Traditional and new trend strategies to enhance pigment contents in microalgae / A. Aizpuru, A. González-Sánchez. – DOI: 10.1007/s11274-024-04070-3 // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2024. – Vol. 40, 272.
22. Nitrogen deficiency-dependent abiotic stress enhances carotenoid production in indigenous green microalga *Scenedesmus rubescens* KNUA042, for use as a potential resource of high value products / S. W. Jo, J. W. Hong, J. M. Do [et al.]. – DOI: 10.3390/su12135445 // Sustainability. – 2020. – Vol. 12 (13), 5445.
23. Impacts of the harvesting process on microalgae fatty acid profiles and lipid yields: Implications for biodiesel production / Z. Shokravi, H. Shokravi, A. E. Atabani [et al.]. – DOI: 10.1016/j.rser.2022.112410 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 161, 112410.
24. Interactive effect of temperature and nitrogen concentrations on the growth, biochemical composition, and fatty acid profiles in freshwater microalgae, *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus quadricauda* / A. Yuslan, H. Suhaimi, M. A. Ghaffar [et al.]. – DOI: 10.1007/s10811-025-03487-z // Journal of Applied Phycology. – 2025. – Vol. 37. – P. 1–24.
25. Abrha, G. T. Enhanced lipid accumulation in microalgae *Scenedesmus* sp. under nitrogen limitation / G. T. Abrha, A. Makaranga, P. P. Jutur. – DOI: 10.1016/j.enzmictec.2024.110546 // Enzyme and Microbial Technology. – 2025. – Vol. 182, 110546.
26. Sonkar, S. Development of a single phase nitrate feeding strategy for enhanced lipid productivity from green microalgae for biodiesel production / S. Sonkar, N. Mallick. – DOI: 10.1002/ep.12443 // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2017. – Vol. 36 (1). – P. 222–231.
27. Chen, H. Regulatory mechanisms of lipid biosynthesis in microalgae / H. Chen, Q. Wang. – DOI: 10.1111/brv.12759 // Biological Reviews. – 2021. – Vol. 96 (5). – P. 2373–2391.
28. Integration of wastewater treatment and flocculation for harvesting biomass for lipid production by a newly isolated self-flocculating microalga *Scenedesmus rubescens* SX / J. Lv, B. Guo, J. Feng [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118211 // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 240. – 118211.

29. Enhanced lipid production and analysis of properties of biodiesel produced from freshwater microalgae *Scenedesmus obtusus* ON089666. 1 / V. Vinitha, S. Meignanalakshmi, K. G. Tirumurugaan [et al.]. – DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101286 // Bioresource Technology Reports. – 2023. – Vol. 21, 101286.

Информация об авторах

А. А. Чижова – аспирант 3-го года обучения Высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта

Е. А. Буденкова – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Промышленные биотехнологии»

В. С. Шушарин – лаборант Научно-образовательного центра «Промышленные биотехнологии»

Л. С. Дышлюк – доктор технических наук, доцент, заведующая лабораторией микробиологии и биотехнологий

Information about the authors

A. A. Chizhova – 3rd-year PhD student at the Higher School of Living Systems, Immanuel Kant Baltic Federal University

E. A. Budenkova – Candidate of Technical sciences, junior researcher at the Scientific and Educational Center "Industrial Biotechnology"

V. S. Shusharin – Laboratory Assistant at the Scientific and Educational Center "Industrial Biotechnology"

L. S. Dyshlyuk – Doctor of Technical sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Microbiology and Biotechnology

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 11.12.2025; принята к публикации 20.12.2025.

The article was submitted 01.12.2025; approved after reviewing 11.12.2025; accepted for publication 20.12.2025.

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Научная статья

УДК 664.95.05(06)

DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-67-77

Овсяные шарики и печенье-мюсли без термообработки с сокосодержащим рыбным коллагеновым желе

Виктор Иванович Воробьев¹✉, Елена Владимировна Нижникова², Ольга Павловна Чернега³

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

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

²elena.nizhnikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2209-7937>

³olga.chernega@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4150-2731>

Аннотация. Исследование связано с применением сокосодержащего коллагенового гидрата (желе), полученного из кожи судака (*Sander lucioperca*) в качестве ингредиента рецептур кондитерских изделий, таких как энергетические овсяные шарики и печенье-мюсли. Сокосодержащее коллагеновое рыбное желе готовили согласно разработанной технологии, где очищенную от чешуи и прирезей мяса рыбью кожу промывали и загружали в емкость вместе с сухой поваренной солью (5–10 % от общей массы рыбного сырья) и мелкодробленым льдом (до 25 %) для предотвращения нагревания полученной смеси при последующей ее механической тендеризации за счет вращающихся лезвий ножа-измельчителя в течение 3–5 мин. Полученную смесь промывали водой для удаления соли, загружали промытую кожу в стеклянную емкость вместе с яблочным соком прямого отжима, взятых в массовом соотношении 1:4,5 соответственно, закрывали емкость завинчивающейся крышкой и помещали в холодильник (4 ± 2 °C) для выдерживания в течение 20–24 ч. Далее набухшую рыбью кожу гомогенизировали при помощи погружного блендера до однородной массы, которую расфасовывали, замораживали (-18 °C) и хранили до последующего использования. Определена пищевая и энергетическая ценность рыбного коллагенового желе, состоящего из воды ($87,4 \pm 0,7$ %), жира ($1,0 \pm 0,7$ %), белка ($4,28 \pm 0,28$ %), золы ($0,28 \pm 0,01$ %), углеводов ($7,0 \pm 1,7$ %) и содержащего 75,75 ккал. Разработаны рецептуры и получены опытные образцы овсяных шариков и печенья-мюсли без термообработки с сокосодержащим рыбным коллагеновым желе. Дана положительная оценка наработанных опытных образцов кондитерских изделий, обладающих функциональной направленностью и приемлемыми органолептическими показателями качества.

Ключевые слова: овсяные шарики, печенье-мюсли, сокосодержащий рыбный коллагеновый гидрат, тендеризация кожи.

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

Для цитирования: Воробьев В. И., Нижникова Е. В., Чернега О. П. Овсяные шарики и печенье-мюсли без термообработки с сокодержущим рыбным коллагеновым желе // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 67–77. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-67-77.

Original article

Uncooked oatmeal balls and granola cookies with juice-containing fish collagen jelly

Viktor I. Vorob'ev^{1✉}, Elena V. Nizhnikova², Ol'ga P. Chernega³

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

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

²elena.nizhnikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2209-7937>

³olga.chernega@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4150-2731>

Abstract. The study involved the use of juice-containing collagen hydrate (jelly) obtained from pike-perch (*Sander lucioperca*) skin as an ingredient in confectionery recipes, such as energy oatmeal balls and granola cookies. Juice-containing collagen fish jelly was prepared according to the developed technology, where fish skin, cleared of scales and meat cuts, was washed and loaded into a container together with dry table salt (5-10% of the total mass of fish raw materials) and finely crushed ice (up to 25 %) to prevent heating of the resulting mixture during its subsequent mechanical tenderization, due to the rotating blades of a chopping knife for 3-5 minutes. The resulting mixture was washed with water to remove salt, the washed skin was loaded into a glass container along with directly squeezed apple juice, taken in a weight ratio of (1:4,5), respectively, the container was closed with a screw cap, and placed in a refrigerator (4±2 °C) for aging for 20–24 hours. Then the swollen fish skin was homogenized using an immersion blender to a homogeneous mass, which was packaged, frozen (–18 °C) and stored until further use. The nutritional and energy value of fish collagen jelly was determined, consisting of: water – 87,4±0,7 %; fat – 1,0±0,7 %; protein – 4,28±0,28 %; ash – 0,28±0,01 %; carbohydrates – 7,0±1,7 % and containing 75,75 kcal. Recipes were developed and pilot samples of oatmeal balls and muesli cookies without heat treatment with juice-containing fish collagen jelly were obtained. A positive assessment was given to the developed pilot samples of confectionery products with a functional focus and acceptable organoleptic quality indicators.

Keywords: oatmeal balls, granola cookies, fish juice collagen hydrate, skin tenderization.

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. no. 1022062900061-5 "Development and improvement of innovative processes in food engineering".

For citation: Vorobev V. I., Nizhnikova E. V., Chernega O. P. Uncooked oatmeal balls and granola cookies with juice-containing fish collagen jelly. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(80):67–77. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-67-77.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетические шарики, батончики и печенье без термообработки, приготовленные из овса, орехов, шоколада, изюма и других сухофруктов, являются популярной снековой продукцией во многих странах мира благодаря простоте их приготовления, вариативности рецептурного состава, а также применению натуральных ингредиентов, в том числе функциональной направленности, соответствующей концепции здорового образа жизни [1, 2].

Самые древние семена овса были найдены в египетских гробницах, которые относятся ко второму тысячелетию до н. э. [3]. Овсяные каши и лепешки с давних времен были широко распространены на территориях Британских островов, в Центральной и Северной Европе, в Древней Руси [4]. В России в 18–19 вв. зерно овса использовали в основном как больничную еду, в то время самым популярным укрепляющим супом в лечебных учреждениях был так называемый габерсуп из толченой овсянки с луком, сваренный на рыбном бульоне [3, 4]. Пища на основе овсяного толокна веками занимала центральное место в меню наших предков. Знаменитое кушанье «дежень», в честь которого называли праздник завершения жатвы, готовилось из овсяного толокна, замешанного на молоке и/или твороге. У восточных славян существовало специфическое блюдо – кисло-соленый овсяный кисель, в большинстве рецептов которого присутствовал крахмальный овес, обеспечивающий студенистую консистенцию [4]. В китайской медицине в качестве повседневной еды овсянка считается средством профилактики онкологических заболеваний [4].

По сравнению с другими злаковыми зерно овса характеризуется высоким содержанием белка от 7,4 до 24,5 % его сухого вещества и обладает высокой усвояемостью (90,3–94,2 % сухого вещества) и биологической ценностью (74,5–79,6 % сухого вещества) [5]. Содержание жира в зерне овса варьирует в диапазоне 2,2–11 % сухого вещества, где ненасыщенные жирные кислоты составляют 80 % всех жирных кислот, среди которых наиболее распространены α -линоленовая (1–5 %), линолевая (24–48 %), олеиновая (29–53 %), докозагексаеновая, эйкозапентаеновая и арахидоновая [5]. Содержание общих пищевых волокон в овсяном зерне составляет от 1 до 30 %, растворимой клетчатки (особенно (1-3)(1-4)- β -D-глюканов, обладающих профилактическим и терапевтическим действием при многих хронических неинфекционных заболеваниях) – от 3 до 8 % [5, 6]. Овес содержит витамины группы В (тиамин, рибофлавин, ниацин, пантотеновая кислота) и витамин Е, обладающий антиоксидантными свойствами и защищающий клетки от окислительного повреждения [5, 7]. Овсяное зерно также содержит биологически активные вещества (БАВ):

– фитостеролы (ситостерол, кампестерол и стигмастерол), способствующие снижению уровня липопротеинов низкой плотности (ЛПНП) в крови и подавляющие атеросклероз;

- лигнаны (секоисоларициризины и матаирезинол), обладающие противораковыми и антиоксидантными свойствами;
- авенантрамиды, оказывающие противовоспалительное, антиоксидантное и нейропротекторное действие [5, 8, 9,10].

Благодаря наличию БАВ, β -D-глюканов и ненасыщенных жирных кислот овес относят к функциональным продуктам питания. Потребление 100 г овсянки удовлетворяют суточную потребность в семи незаменимых аминокислотах, дефицит наблюдается только в серосодержащих аминокислотах и лизине [5, 11].

Известно, что синтез коллагена в организме человека с возрастом значительно снижается и возникает необходимость его восполнения [12].

На кафедре химии Калининградского государственного технического университета (КГТУ) был разработан способ получения сокосодержащего рыбного гидрата коллагена, а также нормативная документация на данную пищевую продукцию [13, 14]. С учетом роста спроса на натуральные продукты с высокой пищевой ценностью и минимальной обработкой, обладающие полезными для здоровья свойствами, представляет практический интерес получение овсяных шариков и печенья, в рецептуре которых в качестве ингредиента может быть использован сокосодержащий гидрат рыбного коллагена.

Целью работы является получение овсяных шариков и печенья-мюсли без термической обработки с применением в качестве их ингредиента сокосодержащего гидрата рыбного коллагена из кожи судака и оценка их органолептических показателей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись образцы овсяных энергетических шариков и печенья с сухофруктами, изготовленные в лаборатории органической химии КГТУ. Ингредиенты рецептуры овсяных шариков: овсяные хлопья быстрого приготовления «Кашка-минутка» с земляникой (АО «Пищевой комбинат "Вологодский"», г. Кадников, Вологодская обл.), какао-порошок «Золотой ярлык» (ООО «ФАВОРИТ», г. Мурино, Ленинградская обл.), чернослив (Аргентина), чилийский сушеный изюм джамбо (ООО «Изобилие», г. Калининград), натуральные ядра грецкого ореха (АО «ОРЕХПРОМ», г. Краснодар), сокосодержащий рыбный коллагеновый гидрат (желе) из кожи судака. При приготовлении овсяного печенья в качестве его рецептурных ингредиентов использовались овсяные хлопья быстрого приготовления (компания «Myllyn Paras», Финляндия), запеченные мюсли с яблоком (ООО «Эверест», п. Велигонты, Ленинградская обл.), сокосодержащий рыбный коллагеновый гидрат (желе) из кожи судака (далее по тексту сокосодержащее рыбное желе).

Сокосодержащее рыбное желе готовили согласно разработанной технологии, где предварительно очищенную от чешуи и прирезей мяса рыбью кожу судака (*Sander lucioperca*) промывали и загружали в емкость вместе с сухой поваренной солью (5–10 % от массы кожи) и мелкодробленым льдом (до 25 %) с целью предотвращения нагревания полученной смеси при последующей механической тендеризации рыбного сырья при помощи вращающихся лезвий ножа-измельчителя Moulinex Delico FP203 (500 Вт, 1000 об./мин) в течение 3–5 мин. Полученную смесь промывали водой для удаления соли, а также соле- и

водорастворимых веществ и пигментов (определяли визуально и на вкус). Промытую кожу загрузили в стеклянную емкость и заливали яблочным соком прямого отжима (ООО «Агродело», г. Калининград) в массовом соотношении 1:4,5 соответственно, емкость закрывали крышкой и помещали в холодильник (4 ± 2 °C), где выдерживали 20–24 ч. Далее набухшую рыбу кожу гомогенизировали при помощи погружного блендера Bosch (750W) до однородной по всему объему массы, которую расфасовывали и замораживали (-18 °C) для хранения и последующего использования. Внешний вид образцов замороженного сокосодержащего рыбного желе представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид образцов замороженного сокосодержащего рыбного желе
Fig. 1. Appearance of frozen juice-containing fish jelly samples

Общий химический анализ сокосодержащего рыбного желе определяли в сертифицированном испытательном центре ООО «КИЦ» (г. Калининград). Пищевая и энергетическая ценность сокосодержащего рыбного желе представлена в табл. 1.

Таблица 1. Пищевая и энергетическая ценность сокосодержащего рыбного желе
Table 1. Nutritional and energy value of juice-containing fish jelly

Наименование образца	Массовая доля, %					Энергетическая ценность, ккал
	вода	жир	белок	зола	углеводы	
Сокосодержащее рыбное желе	$87,4 \pm 0,7$	$1,0 \pm 0,7$	$4,28 \pm 0,28$	$0,28 \pm 0,01$	$7,0 \pm 1,7$	75,75

Как видно из табл. 1, основными компонентами сухих веществ сокосодержащего рыбного желе являются углеводы и белок.

Рецептурный состав овсяных шариков:

- хлопья овсяные – 100 г;
- чернослив вяленый – 25 г;

- изюм светлый – 25 г;
- орехи грецкие – 25 г;
- сокосодержащее рыбное желе – 100 г;
- какао-порошок – 1 ст. л.

Дополнительно овсяные шарики посыпали кокосовой стружкой, вместо какао-порошка добавляли в смесь изюм и молотый кофе либо только порошок растворимого кофе.

Рецептурный состав овсяного печенья:

I вариант: хлопья овсяные – 37 г, сокосодержащее рыбное желе – 70 г;

II вариант: мюсли с яблоком – 80 г, сокосодержащее рыбное желе – 160 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опытные образцы овсяных шариков (конфет) изготавливали следующим образом. Сухофрукты (чернослив и изюм) хорошо промывали водой и выкладывали на бумажное полотенце для просушки. Далее сухофрукты смешивали с грецким орехом, овсяными хлопьями и обрабатывали в ножевом измельчителе (Boch, 750W). К измельченной смеси добавляли размороженное сокосодержащее рыбное желе и тщательно перемешивали. Из полученной массы вручную сформировали шарики необходимого размера (массой 15–20 г) и поместили их в пластиковый контейнер с крышкой вместе с какао-порошком. Закрытый контейнер несколько раз встряхивали для равномерного распределения какао-порошка по всей поверхности овсяных шариков. Готовые овсяные шарики переложили в бумажные формочки для конфет и поместили в чистую упаковку, которую хранили в прохладном и защищенном от солнца месте. Внешний вид полученных овсяных шариков представлен на рис. 2.



Рис. 2. Опытные образцы овсяных шариков: с посыпкой кокосовой стружкой и без (слева), с порошком растворимого кофе (по центру), с добавлением изюма и молотого кофе (справа)

Fig. 2. Experimental samples of oatmeal balls: with and without coconut flakes (left), with instant coffee powder (center), with the addition of raisins and ground coffee (right)

Овсяное печенье изготавливали следующим образом. Овсяные хлопья смешивали в емкости с сокосодержащим рыбным желе и оставляли для пропитки сухих компонентов смеси на 30 мин. Далее вручную формировали шарики

необходимого размера и сплющивали их для придания плоской формы. С целью сохранения нативных свойств рыбного коллагена и яблочного сока образцы печенья далее помещали на решетку электросушилки (Redmond FD1102) и частично обезвоживали при помощи потока воздуха температурой не более 35 °С. Готовое овсяное печенье перекладывали в чистую упаковку и хранили в прохладном и защищенном от солнца месте. Необходимо отметить, что сокосодержащее рыбное желе с овсяными хлопьями обладало слабовыраженной липкостью, что способствовало хорошей формуемости смеси. Внешний вид опытных образцов овсяного печенья I и II вариантов рецептур представлен на рис. 3.



I



II

Рис. 3. Внешний вид опытных образцов овсяного печенья I и II вариантов рецептур
Fig. 3. Appearance of experimental samples of oatmeal cookies I and II recipe variants

При проведении дегустации опытных образцов кондитерских изделий и определении их органолептических показателей овсяные шарики с порошком растворимого кофе имели избыточную горчинку, что требовало уточнения рецептуры для устранения горчинки. Овсяное печенье (II вариант) характеризовалось повышенной жесткостью из-за достаточно крупных частиц мюсли. Указанный недостаток может быть исправлен путем предварительного измельчения мюсли до частиц с более высокой степенью дисперсности, что является темой дальнейших исследований. Органолептические показатели кондитерских изделий, имеющих недостатки, далее не учитывались. Органолептические показатели образцов овсяных шариков и печенья-мюсли представлены в табл. 2.

Согласно табл. 2 образцы кондитерских изделий, обладающих функциональной направленностью, имели приемлемые для данной пищевой продукции органолептические показатели качества.

Таблица 2. Органолептические показатели образцов кондитерских изделий (овсяных шариков и печенья)

Table 2. Organoleptic characteristics of confectionery samples (oatmeal balls and cookies)

Органолептические показатели	Кондитерские изделия (овсяный шарик и печенье-мюсли)
Цвет	овсяный шарик
	Разные оттенки от светло-коричневого до темно-коричневого с вкраплениями в зависимости от используемых ингредиентов рецептуры
	овсяное печенье-мюсли
	Разные оттенки, соломенный, желтый, светло-коричневый в зависимости от используемых ингредиентов рецептуры
Вкус и запах	овсяный шарик и печенье-мюсли
	Выраженные, свойственные вкусу и запаху компонентов овсяного шарика и печенья-мюсли
Консистенция	овсяный шарик
	Плотная, но не твердая
	овсяное печенье-мюсли
	Плотная, но не твердая, слегка вязущая

Очевидным преимуществом полученных кондитерских изделий является отсутствие термической обработки отдельных компонентов их рецептуры (сокосодержащее рыбное желе), способствующей сохранению нативных свойств рыбного коллагена и яблочного сока, а также применение малоиспользуемого побочного рыбьего сырья (кожи), позволяющего вовлечь его значительные количества в промышленное производство продуктов питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленное освоение производства овсяных шариков и печенья-мюсли основано на принципах рационального использования сырья гидробионтов Мирового океана и концепции здорового образа жизни человека. Опытные образцы кондитерских изделий (овсяные шарики и печенье-мюсли), полученные без термической обработки, имели приемлемые для данной пищевой продукции органолептические показатели качества.

Список источников

1. Energy Balls Market Size, Share, Industry Trends, Growth Drivers, Opportunities, Key Players Analysis, Regional Outlook and Forecast Report (2025–2032). – Текст: электронный // The Brainy Insights: сайт. – URL: <https://www.thebrainyinsights.com/report/energy-balls-market-13361> (дата обращения: 28.10.2025).
2. Energy Balls Market Analysis and Forecast to 2034. – Текст: электронный // Global Insight Services: сайт. – URL: <https://www.globalinsightservices.com/reports/energy-balls-market> (дата обращения: 28.10.2025).

3. Топ-5 причин чаще есть овсянку. – Текст: электронный // Живая еда: сайт. – URL: <https://eda.show/top-5-prichin-chashchie-iest-ovsianku/> (дата обращения: 16.08.2025).
4. Елисеева, Т. Овсянка / Т. Елисеева, А. Ямпольский. – Текст: электронный // Журнал здорового питания и диетологии. – 2021. – № 15. – С. 43–61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ovsyanka> (дата обращения: 11.08.2025).
5. Oat and oat processed products - Technology, composition, nutritional value, and health / D. Leszczyńska, A. Wirkijowska, A. Gasiński [et al.]. – DOI: 10.3390/app132011267 // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13 (20). – P. 1–15.
6. Влияние волокон пищевых на функционально-технологические свойства мясных систем / Е. И. Титов, А. Ю. Соколов, Е. В. Литвинова, Д. И. Шишкина. – DOI: 10.21323/2071–2499–2021–4–30–36 // Все о мясе. – 2021. – № 4. – С. 30–36.
7. Oat: Unique among the cereals / M. S. Butt, M. Tahir-Nadeem, M. K. I. Khan [et al.]. – DOI 10.1007/s00394-008-0698-7 // European journal of nutrition. – 2008. – Vol. 47 (2). – P. 68–79.
8. Weggemans, R. M. Relation between soy-associated isoflavones and LDL and HDL cholesterol concentrations in humans: a meta-analysis / R. M. Weggemans, E. A. Trautwein. – DOI: 10.1038/sj.ejcn.1601628 // European journal of clinical nutrition. – 2003. – Vol. 57 (8). – P. 940–946.
9. Role of dietary lignans in the reduction of breast cancer risk / N. M. Saarinen, A. Wärrä, M. Airio [et al.]. – DOI: 10.1002/mnfr.200600240 // Mol Nutr Food Res. – 2007. – Vol. 51(7). – P. 857–866.
10. Recent findings on certain bioactive components in whole grain wheat and rye / A. A. Andersson, L. Dimberg, P. Aman [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jcs.2014.01.003 // Journal of Cereal Science. – 2014. – Vol. 59 (3). – P. 294–311.
11. Zdrojewicz, Z. Wpływ spożywania płatków owsianych na organizm człowieka / Z. Zdrojewicz, A. Lubańska, A. Wyderkowska // Med Rodz. – 2017. – Vol. 20, № 2. – P. 118 – 123.
12. Sensorial and nutritional properties of a collagen-fortified snack bar designed for the elderly / F. Hastaoğlu, E. Hastaoğlu, N. Bağlam, İ. N. Taş. – DOI: 10.3390/nu15163620 // Nutrients. – 2023. – Vol. 15 (16). – P. 3620.
13. Патент № 2798565. Российская Федерация. Способ приготовления хлебобулочного изделия: № 2022123212: заявл. 29.08.2022: опубл. 23.06.2023 / В. И. Воробьев, О. П. Чернега, Т. В. Сафронова, Е. В. Нижникова. – 7 с.
14. Патент № 2764996. Российская Федерация. Способ получения пищевых коллагенсодержащих продуктов: № 2021102316: заявл. 01.02.2021: опубл. 24.01.2022 / В. И. Воробьев. – 15 с.

References

1. Energy Balls Market Size, Share, Industry Trends, Growth Drivers, Opportunities, Key Players Analysis, Regional Outlook and Forecast Report (2025–2032). – Text: electronic // The Brainy Insights: site. – URL: <https://www.thebrainyinsights.com/report/energy-balls-market-13361> (accessed on 28.10.2025).
2. Energy Balls Market Analysis and Forecast to 2034. – Text: electronic // Global Insight Services: site. – URL: <https://www.globalinsightservices.com/reports/energy-balls-market> (accessed on 28.10.2025).

3. Top 5 Reasons to Eat More Oatmeal. – Text: electronic // Living Food: site. – URL: <https://eda.show/top-5-prichin-chashchie-iest-ovsianku/> (accessed on 16.08.2025).
4. Eliseeva, T. Ovsyanka / T. Eliseeva, A. Yampolsky. – Text: electronic // Journal of Healthy Nutrition and Dietetics. – 2021. – № 15. – P. 43–61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ovsyanka> (accessed on 11.08.2025).
5. Oat and oat processed products - Technology, composition, nutritional value, and health / D. Leszczyńska, A. Wirkijowska, A. Gasiński [et al.]. – DOI: 10.3390/app132011267 // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13 (20). – P. 1–15.
6. The Effect of Dietary Fiber on the Functional and Technological Properties of Meat Systems / E. I. Titov, A. Yu. Sokolov, E. V. Litvinova, D. I. Shishkina. – DOI: 10.21323/2071–2499–2021–4–30–36 // All about meat. – 2021. – № 4. – P. 30–36.
7. Oat: Unique among the cereals / M. S. Butt, M. Tahir-Nadeem, M. K. I. Khan [et al.]. – DOI 10.1007/s00394-008-0698-7 // European journal of nutrition. – 2008. – Vol. 47 (2). – P. 68–79.
8. Weggemans, R. M. Relation between soy-associated isoflavones and LDL and HDL cholesterol concentrations in humans: a meta-analysis / R. M. Weggemans, E. A. Trautwein. – DOI: 10.1038/sj.ejcn.1601628 // European journal of clinical nutrition. – 2003. – Vol. 57 (8). – P. 940–946.
9. Role of dietary lignans in the reduction of breast cancer risk / N. M. Saarinen, A. Wärrä, M. Airio [et al.]. – DOI: 10.1002/mnfr.200600240 // Mol Nutr Food Res. – 2007. – Vol. 51 (7). – P. 857–866.
10. Recent findings on certain bioactive components in whole grain wheat and rye / A. A. Andersson, L. Dimberg, P. Aman [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jcs.2014.01.003 // Journal of Cereal Science. – 2014. – Vol. 59(3). – P. 294–311.
11. Zdrojewicz, Z. Wpływ spożywania płatków owsianych na organizm człowieka / Z. Zdrojewicz, A. Lubańska, A. Wyderkowska // Med Rodz. – 2017. – Vol. 20, № 2. – P. 118–123.
12. Sensorial and nutritional properties of a collagen-fortified snack bar designed for the elderly / F. Hastaoğlu, E. Hastaoğlu, N. Bağlam, İ. N. Taş. – DOI: 10.3390/nu15163620 // Nutrients. – 2023. – Vol. 15 (16). – P. 3620.
13. Patent № 2798565. Russian Federation. Method for preparing a bakery product: № 2022123212: applic. 29.08.2022: publish. 23.06.2023 / V. I. Vorobyov, O. P. Chernega, T. V. Safronova, E. V. Nizhnikova. – 7 p.
14. Patent № 2764996. Russian Federation. Method for producing collagen-containing food products: № 2021102316: applic. 01.02.2021: publish. 24.01.2022 / V. I. Vorobyov. – 15 p.

Информация об авторах

В. И. Воробьев – кандидат технических наук, доцент кафедры химии

Е. В. Нижникова – кандидат биологических наук, доцент кафедры химии

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

Information about the authors

V. I. Vorobev – Candidate of Technical sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry

E. V. Nizhnikova – Candidate of Biological sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry

O. P. Chernega – Candidate of Technical sciences, Associate Professor of the 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 28.10.2025; одобрена после рецензирования 11.11.2025; принята к публикации 20.11.2025.

The article was submitted 28.10.2025; approved after reviewing 11.11.2025; accepted for publication 20.11.2025.

Научная статья

УДК 664.681.1

DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-78-91

**Исследование качества безглютенового печенья
методами органолептического анализа**

Арина Алексеевна Корниенко¹, Екатерина Владимировна Лютова²

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

¹ arina__k@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0009-4357-9300>

² ekaterina.lyutova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1145-2040>

Аннотация. В работе представлено исследование качества экспериментального безглютенового печенья наиболее популярными методами органолептического (дегустационного) анализа: балльным, профильным и методом предпочтения. На основе данных анкетирования установлены коэффициенты значимости органолептических показателей. Качество экспериментального безглютенового печенья «Осенний цветок» находится на хорошем уровне, выгодно отличаясь характеристиками цвета, вкуса и запаха, что подтверждается наибольшим суммарным баллом по всем показателям (65,3 б.), при этом контрольное сдобное печенье имеет дефекты формы и поверхности, а производственный образец получил низкие оценки за цвет, вкус и запах. Изучен профиль вкуса и запаха сдобного и безглютеновых видов печенья. По результатам оценки в печенье «Осенний цветок» выявлены характерные тыквенный (3,6 б.) и морковный (2,8 б.) флейворы, подавляющие интенсивность дескрипторов «сдобного» вкуса – сладкого (3,3 б.), ванильного (2,0 б.) и молочного (1,9 б.) флейворов. Выраженность оттенков сладкого (4,6 б.), сливочного (4,0 б.), молочного (3,7 б.) и ванильного (3,4 б.) вкуса и запаха в профиле сдобного печенья рассматривается как эталон «сдобного» вкуса. В профиле экспериментального печенья отмечены посторонние вкусы и запахи невысокой интенсивности (соленый, горький и прочие вкусы – не более 1,7 б.), что может быть следствием введения в рецептуру овощных порошков и люпиновой муки. Методом предпочтения печенье «Осенний цветок» выбрано в качестве лучшего вида безглютенового печенья из представленных к анализу образцов, однако невысокая сладость экспериментальных изделий рассматривается авторами как недостаток и предполагает дальнейшее совершенствование рецептуры.

Ключевые слова: органолептический анализ, дегустационный анализ, методы органолептического анализа, балльный метод, профильный метод, метод предпочтения, безглютеновое печенье, сдобное печенье.

Для цитирования: Корниенко А. А., Лютова Е. В. Исследование качества безглютенового печенья методами органолептического анализа // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 78–91. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-78-91.

Original article

Study of the quality of gluten-free biscuits using sensory analysis methods

Arina A. Kornienko¹, Ekaterina V. Lyutova²

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

¹ arina_k@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0009-4357-9300>

² ekaterina.lyutova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1145-2040>

Abstract. This paper presents a study of the quality of experimental gluten-free biscuits using the most popular methods of sensory (taste panel) analysis: a scoring method, a profile method, and a preference test. Based on the data from the questionnaires, significance coefficients for the organoleptic quality indicators of biscuit have been established. The quality of the experimental gluten-free "Osenniy tsvetok" biscuit is good, with favorable color, taste and smell characteristics, as evidenced by the highest overall score for all indicators (65.3 points). Moreover, the control shortbread biscuit has defects in shape and surface, and the production sample receives low marks for color, taste and smell. The taste and smell profiles of the shortbread and gluten-free biscuit samples have been studied. Based on the evaluation results, characteristic pumpkin (3.6 p.) and carrot (2.8 p.) flavors have been identified in the "Osenniy tsvetok" biscuit, suppressing the intensity of the "short" taste descriptors – sweet (3.3 p.), vanilla (2.0 p.) and milky (1.9 p.) flavors. The expression of shades of sweet (4.6 p.), creamy (4.0 p.), vanilla (3.4 p.), and milky (3.7 p.) taste and smell in the profile of shortbread biscuit is considered the standard of "short" taste. In the profile of the experimental biscuit, low-intensity foreign tastes and odors have been noted (salty, bitter and other tastes - no more than 1.7 p.), which may be a consequence of the introduction of vegetable powders and lupine flour into the recipe. Using the preference method, the "Osenniy tsvetok" biscuit has been selected as the best gluten-free biscuit among the samples submitted for the analysis. However, the authors consider the low sweetness of the experimental biscuit to be a drawback and a sign that further refinement of the recipe is necessary.

Keywords: sensory analysis, taste panel assessment, sensory methods, scoring method, sensory profiling method, preference test, gluten-free biscuits, shortbread biscuits.

For citation: Kornienko A. A., Lyutova E. V. Study of the quality of gluten-free biscuits using sensory analysis methods. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(80):78–91. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-78-91.

ВВЕДЕНИЕ

Печенье – высокоуглеводный продукт, удобный в реализации и потреблении, имеющий привлекательные органолептические характеристики. По данным маркетингового исследования, проведенного авторами в 2023 г. [1], наиболее важным критерием, влияющим на выбор печенья потребителями, оказался его вкус и запах (об этом заявили 71,4 % респондентов). Вкус и запах являются одним из пяти показателей качества печенья, определяемых сенсорно и нормируемых по ГОСТ 24901-2014 (прим.: на момент публикации статьи введен в действие новый ГОСТ 24901-2023). К другим органолептическим показателям

относятся цвет, форма, поверхность печенья и вид в изломе. Внешний вид изделий 54,3 % участников опроса также считают одним из важнейших критериев, который занимает третье место по влиянию на покупателя при выборе печенья [1], что обосновывает важность органолептического контроля продукта, в том числе путем проведения дегустационного анализа.

Оценка органолептических характеристик дегустационной комиссией позволяет получать объективные данные о качестве продукта на любом этапе его жизненного цикла. Согласно ГОСТ ISO 6658-2016, членами комиссии могут быть лица разной степени подготовленности – испытатели (подготовленные и неподготовленные), отобранные испытатели и эксперты-испытатели. В свою очередь, методы дегустационного анализа, по данным ГОСТ ISO 6658-2016 и некоторых других литературных источников [2, 3], разделяют на потребительские и экспертные. В органолептической оценке печенья востребованы обе группы методов. Потребительские методы не требуют специальной подготовки дегустаторов, но объективны лишь при большом количестве испытателей (от 30 до 100 человек) [3]. В исследованиях качества печенья часто встречаются примеры использования различных потребительских методов – предпочтения [4], ранжирования предпочтений [5], определения приемлемости продукта [4–6] и других видов потребительской сенсорной оценки.

Экспертные, или аналитические, методы органолептического анализа представлены широко и достаточно эффективны при определении качества мучных кондитерских изделий. В научной литературе на тему совершенствования технологии печенья можно найти примеры использования практически всех видов экспертных методов:

- 1) различительные: метод парного сравнения [7], метод треугольника [8], метод «дуо–трио» [5], метод «А–не А» и др.;
- 2) предусматривающие использование шкал и категорий: распределение, классифицирование, ранжирование, рейтинговый и балльный метод [9–11];
- 3) дескриптивные (описательные): простой дескриптивный тест [12–14], количественный дескриптивный тест [15, 16], метод составления органолептического профиля [8, 12], в том числе произвольного [17].

Авторы, использующие экспертные методы дегустационного анализа, получают более точные данные о качестве изделий при меньшем количестве испытателей. Разнообразие методов анализа и их распространенность в области исследований мучных кондитерских изделий подчеркивают актуальность оценки свойств печенья различными методами органолептического анализа.

Цель исследования – изучение качества безглютенового печенья методами органолептического анализа, для чего были поставлены следующие задачи:

- установить величины коэффициентов значимости органолептических показателей качества печенья с помощью анкетирования дегустаторов;
- провести оценку качества экспериментального и контрольных образцов печенья балльным методом;
- изучить профиль вкуса и запаха экспериментального и контрольных образцов печенья методом составления органолептического профиля;
- выявить лучший образец безглютенового печенья методом предпочтения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования стали четыре образца печенья: печенье сдобное (рецептура № 157м «Цветочек»; контроль № 1), печенье безглютеновое (контроль № 2), печенье безглютеновое экспериментальное «Осенний цветок», печенье безглютеновое производственное («ЗОЖ с орехом», производитель ООО «Грин Злак», Россия). Рецептуры образцов печенья, изготовленных авторами, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Рецептуры образцов печенья

Table 1. Recipes for biscuit samples

Ингредиент	Количество ингредиента, г на 100 г готового продукта		
	Печенье сдобное (контроль № 1)	Печенье безглютеновое (контроль № 2)	Печенье безглютеновое «Осенний цветок»
Мука пшеничная высшего сорта	48,8	–	–
Мука рисовая	–	48,8	38,8
Мука люпиновая	–	–	2,60
Порошок жмыха моркови	–	–	2,50
Порошок жмыха тыквы	–	–	2,30
Порошок кожуры тыквы	–	–	2,60
Сахарная пудра	31,5	17,6	17,6
Молочная сыворотка сухая	–	13,9	13,9
Инвертный сироп	0,49	0,49	0,49
Сливочное масло	24,4	–	–
Подсолнечное масло	–	20,1	20,1
Меланж	19,5	19,5	19,5
Ванильная пудра	0,24	0,24	0,24
Сода пищевая	–	0,70	0,70
Вода	–	6,00	6,00

Идея поэтапного проектирования рецептуры опытного печенья «Осенний цветок» и выбор для анализа двух контрольных и одного экспериментального образцов обусловлены необходимостью оценки изменения профиля вкуса и запаха, а также качества изделий при введении функциональных компонентов. Контроль № 2 предусматривает три рецептурные замены, экспериментальный образец – еще четыре. В совокупности данные замены позволят получить специализированный продукт с пониженной долей насыщенных жирных кислот и повышенным содержанием БАВ, дефицитных в безглютеновой диете [18], – пищевых волокон, витаминов В₂, В₁₂, минеральных веществ (особенно железа и цинка) и полноценного белка.

Органолептическая оценка образцов печенья производилась комиссией в составе 9 подготовленных испытателей из числа студентов и сотрудников кафедры. Дегустаторам была предложена 5-балльная шкала со словесной характеристикой баллов по каждому показателю. Выраженность дескрипторов вкуса и запаха также характеризовалась по 5-балльной шкале.

Отбор образцов и подготовка проб регламентируются ГОСТ 5904-2019, определение органолептических показателей печенья – ГОСТ 5897-90. Пробы печенья были закодированы порядковыми номерами от 1 до 4. Анализ проводился в хорошо освещенном, защищенном от внешнего шума помещении при температуре окружающей среды (18 ± 5) °С. Результаты анализа заносились в дегустационные анкеты. Статистическая обработка данных эксперимента осуществлялась методом однофакторного дисперсионного анализа на 95 %-ном доверительном уровне. Отбраковка грубых промахов производилась по критерию Романовского. Степень согласованности мнений испытателей о значимости (рангах) показателей качества определяли по дисперсионному коэффициенту конкордации W , величину которого находили по формуле (1):

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)}, \quad (1)$$

где m – число испытателей, n – число объектов ранжирования (показателей качества), S – сумма квадратов отклонений суммы рангов каждого объекта от среднего арифметического рангов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Определение коэффициентов значимости органолептических показателей

Коэффициенты весомости (значимости) органолептических показателей устанавливались экспертным путем – с учетом мнения дегустаторов, которым в дегустационной анкете предлагалось либо ранжировать показатели качества печенья по значимости, либо отметить наиболее весомые из них. Ответы дегустаторов по ранжированию сенсорных показателей занесены в табл. 2.

Таблица 2. Мнения испытателей о значимости органолептических показателей качества печенья

Table 2. Researchers' opinions on the significance of biscuit organoleptic quality indicators

Испытатель	Порядок значимости				
	1 (наименее значимый)	2	3	4	5 (наиболее значимый)
1	Вид в изломе / Цвет	–	–	форма / поверхность	вкус и запах
2	Вид в изломе	форма	цвет	поверхность	вкус и запах
3	Вид в изломе	поверхность	форма	цвет	вкус и запах
4	Вид в изломе	цвет	вкус и запах	форма	поверхность
5	Форма	цвет	поверхность	вид в изломе	вкус и запах
6	Вид в изломе	поверхность	форма	цвет	вкус и запах
7	Вид в изломе	форма	поверхность	цвет	вкус и запах
8	Вид в изломе	поверхность	форма	вкус и запах	цвет
9	Форма	вид в изломе	поверхность	цвет	вкус и запах

При обработке данных рассчитана средняя величина значимости каждого показателя (с отбраковкой грубых промахов), в результате чего установлена

наибольшая и наименьшая значимость у вкуса и запаха, вида в изломе соответственно. Показатель «форма» также охарактеризован как менее значимый, а весомость цвета и поверхности изделий, по мнению испытателей, находится на одном уровне. На основании средних величин установлены значения коэффициентов весомости, их сумма составляет 15,0 (табл. 3).

Таблица 3. Обработка оценок значимости органолептических показателей качества печенья

Table 3. Processing of assessments of biscuit organoleptic quality indicators significance

Значимость	Количество оценок				
	Цвет	Форма	Поверхность	Вид в изломе	Вкус и запах
1	1	2	0	7	0
2	2	2	3	1	0
3	1	3	3	0	1
4	4	2	2	1	1
5	1	0	1	0	7
Средняя величина значимости	$3,2 \pm 1,0$	$2,6 \pm 0,9$	$3,1 \pm 0,8$	$1,0 \pm 0,0$	$5,0 \pm 0,0$
Итоговое ранжирование	4	2	3	1 (наименее значимый)	5 (наиболее значимый)
Итоговый коэффициент значимости	3,2	2,8	3,0	1,0	5,0
Коэффициент конкордации	0,6				

Стоит отметить, что в группе испытателей наблюдалась слабая согласованность мнений о весомости органолептических показателей, о чем свидетельствует величина расчетного коэффициента конкордации, которая ощутимо меньше удовлетворительного значения ($W = 0,8...1,0$).

2. Оценка органолептических показателей качества образцов печенья

Для определения качества печенья по органолептическим показателям использован балльный метод с последующим распределением образцов по категориям качества. С учетом величин коэффициентов значимости установлены диапазоны баллов, соответствующие каждому уровню качества: 68,3–75,0 б. – отличный продукт; 59,1–68,2 б. – хороший продукт; 43,8–59,0 б. – удовлетворительный продукт; 15,0–43,7 б. – неудовлетворительный продукт. Результаты дегустационного анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты анализа качества печенья балльным методом
Table 4. Results of the biscuit quality analysis using the scoring method

Образец	Показатель	Итоговое значение	Сумма	Категория качества
Образец 1 (печенье сдобное – контроль № 1)	Цвет	$10,67 \pm 1,23$	$60,2 \pm 2,1$	Хороший продукт
	Форма	$9,96 \pm 1,13$		
	Поверхность	$10,33 \pm 1,22$		
	Вкус и запах	$25,00 \pm 0,00$		
	Вид в изломе	$4,22 \pm 0,51$		
Образец 2 (печенье безглютеновое – контроль № 2)	Цвет	$9,60 \pm 0,00$	$58,9 \pm 3,9$	Удовлетворительный продукт
	Форма	$11,20 \pm 1,52$		
	Поверхность	$14,00 \pm 1,15$		
	Вкус и запах	$20,00 \pm 3,33$		
	Вид в изломе	$4,11 \pm 0,60$		
Образец 3 (печенье безглютеновое «Осенний цветок»)	Цвет	$16,00 \pm 0,00$	$65,3 \pm 2,0$	Хороший продукт
	Форма	$11,20 \pm 0,00$		
	Поверхность	$12,67 \pm 1,02$		
	Вкус и запах	$21,11 \pm 1,69$		
	Вид в изломе	$4,33 \pm 0,38$		
Образец 4 (печенье безглютеновое производственное)	Цвет	$10,67 \pm 2,75$	$62,5 \pm 5,5$	Хороший продукт
	Форма	$14,00 \pm 0,00$		
	Поверхность	$15,00 \pm 0,00$		
	Вкус и запах	$17,78 \pm 4,75$		
	Вид в изломе	$5,00 \pm 0,00$		

Результаты анализа по 5-балльной шкале представлены в виде профилограмм (рис. 1). По сумме итоговых баллов можно сделать вывод о достаточно высоком качестве экспериментального безглютенового печенья «Осенний цветок», которому уступает качество производственного образца и значительно – качество обоих контрольных вариантов. «Осенний цветок» выгодно отличается интенсивностью цвета (насыщенный золотисто-желтый), хотя имеет средние оценки по другим показателям. Форма изделий преимущественно правильная, поверхность – гладкая, вкус и запах – приятные, на изломе видна хорошо пропеченная, равномерная внутренняя структура.

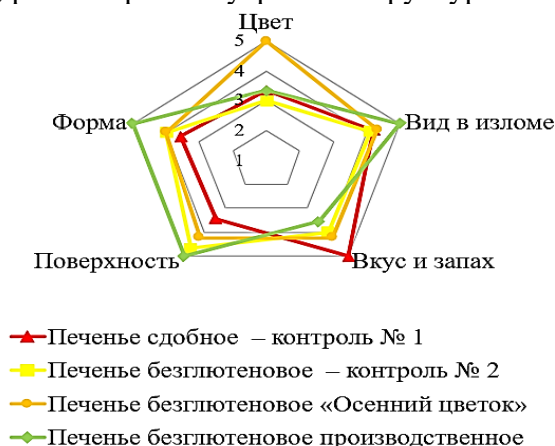


Рис. 1. Профилограммы органолептического качества образцов печенья
Fig. 1. Profilograms of the organoleptic quality of biscuit samples

У контроля № 1 отмечены дефекты формы (неправильная), поверхности (с многочисленными вздутиями), а также светло-соломенный цвет; при этом вкус и запах печенья выраженные, характерные и очень приятные. Контроль № 2 охарактеризован как продукт светло-соломенного цвета расплывчатой формы, но имеющий гладкую поверхность. Производственное печенье при достоинствах формы, поверхности и вида в изломе, по мнению большинства дегустаторов, имеет светло-коричневый цвет и выраженные, но недостаточно сладкие вкус и запах.

3. Изучение профиля вкуса и запаха образцов печенья

Для определения выраженности отдельных признаков вкуса и запаха применялся метод составления органолептического профиля. К анализу предлагались предыдущие образцы, за исключением производственного, – для оценки изменений характеристик вкуса и запаха при добавлении новых ингредиентов в экспериментальную рецептуру.

Для оценки степени выраженности использована 5-балльная шкала, каждому баллу которой соответствует своя степень интенсивности: 5 – признак сильно выражен, 4 – средне выражен, 3 – слабо выражен, 2 – очень слабо выражен, 1 – признак отсутствует. В качестве дескрипторов авторами были выбраны как признаки, характерные для сдобного печенья (источниками которых являются сливочное масло, сахарная и ванильная пудра), так и признаки, характерные для экспериментального печенья (их источники: порошки жмыха моркови, жмыха тыквы, кожуры тыквы, люпиновая мука, сухая молочная сыворотка). Приятность послевкусия оценивалась по вкусовым ощущениям в течение 15–30 сек. после дегустации образца.

Профилограммы специфического и постороннего вкуса и запаха представлены на рис. 2–3.

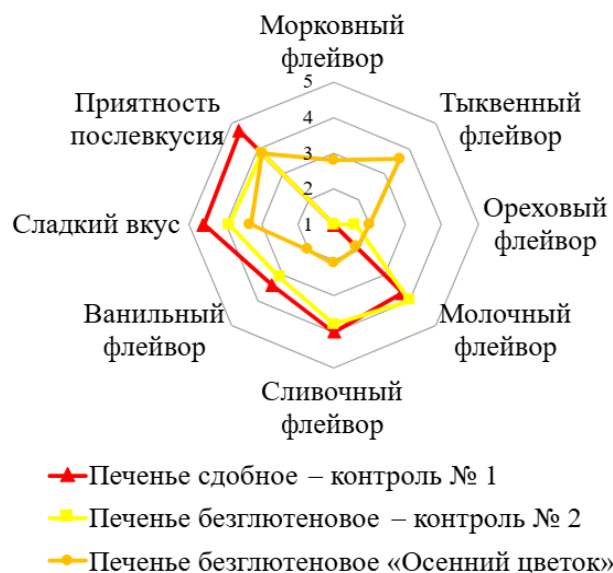


Рис. 2. Профилограммы специфического вкуса и запаха образцов печенья
Fig. 2. Profilograms of specific taste and smell of biscuit samples

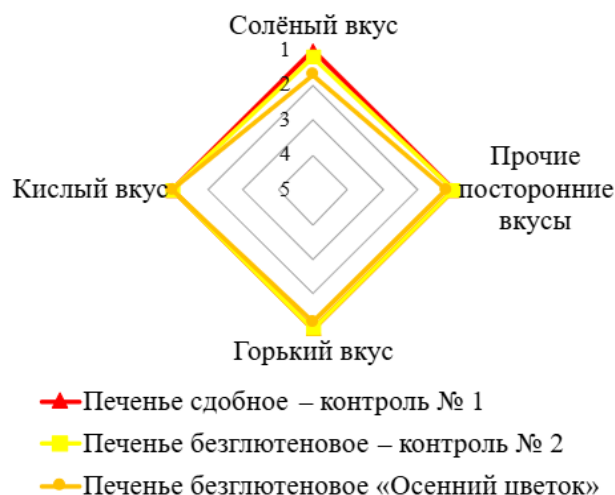


Рис. 3. Профилограммы постороннего вкуса и запаха образцов печенья
Fig. 3. Profilograms of foreign taste and smell of biscuit samples

Данные профильного анализа позволяют судить о специфичности нового вида безглютенового печенья: во вкусе и запахе экспериментального образца отмечены тыквенный, морковный флейворы, сладкий вкус и незначительный ореховый флейвор (свойствен люпиновой муке). Интенсивность данных дескрипторов не превышает значения в 4,0 балла, что говорит об умеренной дозировке функциональных ингредиентов. В то же время печенье «Осенний цветок» отличается невысокой сладостью по сравнению с контролем № 1 и № 2, что обусловлено частичной заменой сахарозы на лактозу молочной сыворотки. По мнению авторов, сладкий вкус является одним из обязательных характеристик «сдобного» вкуса печенья, поэтому рецептура может быть дополнена введением подсластителя.

Другими дескрипторами «сдобного» вкуса можно считать сливочный, молочный и ванильный флейворы. Эталоном выраженности данных признаков является профиль контроля № 1 (рис. 2): от 3,4 до 4,0 б. по каждому из показателей; интенсивность сладкого вкуса – 4,6 б. Контроль № 2 имеет чуть более низкие баллы по данным показателям (от 3,1 до 4,0) с преобладанием молочного флейвора, что по сенсорным ощущениям приближает образец к категории сдобного печенья. В свою очередь, интенсивность дескрипторов «сдобного» вкуса экспериментального печенья находится в диапазоне от 1,9 до 3,3 б. (наиболее выражен из них сладкий вкус), поэтому печенье «Осенний цветок», по данным дегустации и по мнению авторов, в своем названии не должно содержать наименования категории «сдобное печенье». Стоит также отметить, что преобладание овощных флейворов в профиле безглютенового печенья незначительно снизило оценку приятности послевкуся (в 1,2 раза).

Введение функциональных компонентов отразилось и на профилограммах постороннего вкуса и запаха. У контроля № 2 появился едва ощутимый соленый привкус, который усилился в экспериментальной рецептуре до 1,7 б. Кроме того, отмечены небольшой горький и некоторые другие привкусы (1,2 б.). Появление таких оттенков может свидетельствовать о специфическом вкусовом профиле овощных порошков (особенно порошка кожуры тыквы) или низкой сочетаемости

функциональных ингредиентов с компонентами контрольной рецептуры либо между собой. Поскольку выраженность постороннего вкуса и запаха низкая, можно сделать вывод о приемлемости печенья «Осенний цветок» по органолептическому профилю.

4. Исследование качества безглютенового печенья методом предпочтения

В апробации метода предпочтения контроль № 1 не участвовал, так как целью анализа была оценка специализированного продукта – безглютенового печенья. Результаты апробации метода предпочтения представлены в виде диаграммы (рис. 4).

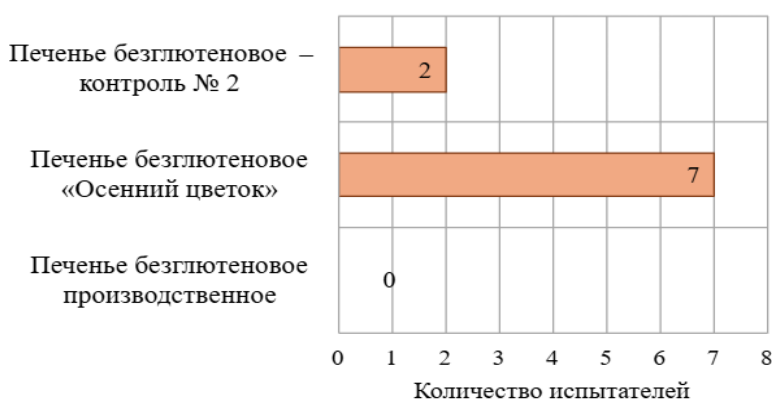


Рис. 4. Распределение мнений дегустаторов о предпочтительности образцов безглютенового печенья

Fig. 4. Distribution of tasters' opinions on the preference of gluten-free biscuit samples

Как можно видеть по диаграмме, «Осенний цветок» оказался наиболее предпочтительным образцом безглютенового печенья, которому в органолептических характеристиках проигрывает даже производственный образец. Данные анализа подтверждают приемлемый уровень качества нового вида безглютенового печенья, несмотря на выявленные специфические оттенки вкуса и запаха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги проведенной работы, следует подчеркнуть важность органолептического анализа в оценке качества печенья и других мучных кондитерских изделий. В области совершенствования технологии продуктов питания методы дегустационного анализа приобрели особое значение. В ходе исследования по изучению качества безглютенового печенья авторами использовано несколько методов органолептического анализа.

Путем анкетирования испытуемых установлены средние величины коэффициентов значимости органолептических показателей печенья. Несмотря на довольно слабую согласованность мнений дегустаторов (коэффициент конкордации 0,6), полученные данные использованы для вывода окончательных величин коэффициентов значимости.

Методом балльной шкалы проведена оценка качества сдобного и безглютенового печенья. Наиболее высокий суммарный балл ($65,3 \pm 2,0$ из $75,0$ б.) получил образец экспериментальной рецептуры «Осенний цветок», который по сравнению с производственным и контрольным образцами имеет более высокие оценки за цвет ($5,0 \pm 0,0$ б.), вкус и запах ($4,2 \pm 0,3$ б.).

Методом составления органолептического профиля выявлены основные флейворы вкуса и запаха сдобного контрольного (сладкий – $4,6 \pm 0,4$ б., сливочный – $4,0 \pm 0,0$ б., ванильный – $3,4 \pm 0,7$ б.) и безглютенового экспериментального (тыквенный – $3,6 \pm 1,2$ б., сладкий – $3,3 \pm 1,0$ б., морковный – $2,8 \pm 0,8$ б.) видов печенья. Установлена приемлемость вкусового профиля печенья «Осенний цветок», при этом сделан вывод о недостаточно развитых дескрипторах «сдобного» вкуса и запаха образца. Предложен способ улучшения рецептуры путем внесения подсластителя.

В целом, данные проведенных экспериментов подтверждают хороший уровень качества нового вида безглютенового печенья, что является основанием для дальнейшего совершенствования данной рецептуры с использованием функциональных ингредиентов из побочного продовольственного сырья (например, в направлении достижения «сдобного» вкуса и запаха). Методом предпочтения, по мнению большинства дегустаторов (7 из 9 испытателей), «Осенний цветок» выбран в качестве лучшего безглютенового печенья из представленных образцов.

Список источников

1. Лютова, Е. В. Маркетинговые исследования по изучению спроса на сдобное печенье / Е. В. Лютова, А. А. Корниенко // Балтийский морской форум: материалы XI Международного Балтийского морского форума (Калининград, 25–30 сент. 2023 г.), в 8 т. / Калинингр. гос. техн. ун-т. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2023. – Т. 4. – С. 61–65.
2. Контарева, В. Ю. Применение методов дегустационного анализа при создании новых пищевых продуктов / В. Ю. Контарева // Вестник Донского государственного аграрного университета. – 2018. – № 3–1(29). – С. 82–90.
3. Чугунова, О. В. Использование методов дегустационного анализа при моделировании рецептур пищевых продуктов с заданными потребительскими свойствами: моногр. / О. В. Чугунова, Н. В. Заворохина. – Урал. гос. экон. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2010. – 148 с. – ISBN 978-5-9656-0153-0.
4. Разработка мучных кондитерских изделий с применением физиологически ценных продуктов пчеловодства / А. А. Ковалевская, В. В. Илларионова, А. Е. Глазенко [и др.]. – DOI: 10.47370/2072-0920-2024-20-2-69-80 // Новые технологии. – 2024. – Т. 20. – № 2. – С. 69–80.
5. Anderson, M. Probiotic Fortification is Acceptable in Chocolate No-Bake Cookies / M. Anderson, C. Estey, J. Johnson. – Текст: электронный // Symposium of University Research and Creative Expression. – 2014. – 2. – URL: <https://digitalcommons.cwu.edu/source/2014/posters/2> (дата обращения: 23.10.2025).
6. Sensory analysis comparison of eight biscuits by French and Pakistani panels / J. Pagès, C. Bertrand, R. Ali [et al.]. – DOI: 10.1111/j.1745-459X.2007.00130.x // Journal of Sensory Studies. – 2007. – Vol. 22. – № 6. – P. 665–686.

7. Pasqualone, A. Production trials to improve the nutritional quality of biscuits and to enrich them with natural anthocyanins / A. Pasqualone, A. M. Bianco, V. M. Paradiso. – DOI: 10.1080/19476337.2012.753113 // CyTA-Journal of Food. – 2013. – Vol. 11. – № 4. – P. 301–308.
8. Bravi, E. Quinoa (*Chenopodium Quinoa Willd.*) as Functional Ingredient for the Formulation of Gluten-Free Shortbreads / E. Bravi, V. Sileoni, O. Marconi. – DOI: 10.3390/foods13030377 // Foods. – 2024. – Vol. 13. – № 3. – P. 377.
9. Патент № 2821697. Российская Федерация, МПК A21D 13/80 (2017.01), A21D 2/36 (2006.01). Печенье сдобное: № 2023126679: заявл. 18.10.2023: опубл. 26.06.2024 / Н. В. Меркурьев, М. Ш. Бегеулов, П. С. Харитонова. – 6 с.
10. Применение растительных эмульсионных гелей в технологии безглютенового сдобного печенья / В. А. Васькина, Е. С. Новожилова, Г. Н. Дубцова [и др.]. – DOI: 10.36107/spfr.2024.1.487 // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2024. – Т. 32. – № 1. – С. 71–84.
11. Roles of gelator type and gelation technology on texture and sensory properties of cookies prepared with oleogels / S. Li, G. Wu, Q. Jin [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129667 // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 356. – 129667.
12. Фролова, Ю. В. Исследование печенья с модифицированным жировым компонентом / Ю. В. Фролова, Р. В. Соболев, А. А. Кочеткова. – DOI: 10.24412/0235-2486-2021-4-0039 // Пищевая промышленность. – 2021. – № 4. – С. 8–11.
13. Патент № 2759805. Российская Федерация. МПК A21D 13/80 (2017.01). Печенье сдобное обогащенное: № 2021110069: заявл. 12.04.2021: опубл. 18.11.2021 / Е. В. Алексеенко, И. Г. Белявская, Л. В. Зайцева, П. С. Глебова. – 16 с.
14. Патент № 2817794. Российская Федерация. МПК A21D 8/02 (2006.01), A21D 2/36 (2006.01), A21D 13/80 (2017.01). Способ получения функционального сдобного отсадного печенья: № 2023117960: заявл. 07.07.2023: опубл. 22.04.2024 / И. В. Плотникова, Ю. В. Денисова. – 9 с.
15. Mielmann, A. Linking the Sensory Taste Properties of Chocolate-Based Biscuits to Consumers' Emotions: A Cross-Cultural Study / A. Mielmann, T. A. Brunner. – DOI: 10.3390/app12168038 // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 16. – 8038.
16. Sensory dynamic profile and consumer acceptance of short-dough biscuits with reduced sucrose and thaumatin addition / C. A. Kawakami, M. M. Selani, E. Saldaña [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodres.2024.115524 // Food Research International. – 2025. – Vol. 200. – 115524.
17. Jambrec, D. Development and application of descriptors for establishing sensory profile of gluten-free cookies by a multidimensional approach / D. Jambrec, M. Pestorić, U. Žigon // Food and Feed Research. – 2012. – Vol. 39. – № 1 – P. 41–49.
18. A gluten-free diet, not an appropriate choice without a medical diagnosis / A. Diez-Sampedro, M. Olenick, T. Maltseva, M. Flowers. – DOI: 10.1155/2019/2438934 // Journal of nutrition and metabolism. – 2019. – Vol. 2019. – № 1. – 2438934.

References

1. Lyutova, E. V. Marketing research on the demand for shortbread biscuits / E. V. Lyutova, A. A. Kornienko // Baltic Maritime Forum: proceedings of the XI International Baltic Maritime Forum (Kaliningrad, September 25–30 2023), in 8 volumes /

Kaliningrad State Technical University. – Kaliningrad: Publishing House of Baltic Fishing Fleet State Academy, 2023. – Vol. 4. – P. 61–65.

2. Kontareva, V. Y. Application of methods of tasting analysis in the creation of new food products / V. Y. Kontareva // Bulletin of the Don State Agrarian University. – 2018. – № 3–1(29). – P. 82–90.

3. Chugunova, O. V. Use of Tasting Analysis Methods in Modeling Food Formulations with Given Consumer Properties. / O. V. Chugunova, N. V. Zavorokhina. – Ural State University of Economics. – Yekaterinburg: Publishing House of Ural State University of Economics, 2010. – 148 p. – ISBN 978-5-9656-0153-0.

4. Development of flour confectionery products with the use of physiologically valuable beekeeping products / A. A. Kovalevskaya, V. V. Illarionova, A. E. Glazenko [et al.]. – DOI: 10.47370/2072-0920-2024-20-2-69-80 // New technologies. – 2024. – Vol. 20. – № 2. – P. 69–80.

5. Anderson, M. Probiotic Fortification is Acceptable in Chocolate No-Bake Cookies / M. Anderson, C. Estey, J. Johnson. – Text: electronic // Symposium of University Research and Creative Expression. – 2014. – 2. – URL: <https://digitalcommons.cwu.edu/source/2014/posters/2> (accessed on 23.10.2025).

6. Sensory analysis comparison of eight biscuits by French and Pakistani panels / J. Pagès, C. Bertrand, R. Ali [et al.]. – DOI: 10.1111/j.1745-459X.2007.00130.x // Journal of Sensory Studies. – 2007. – Vol. 22. – № 6. – P. 665–686.

7. Pasqualone, A. Production trials to improve the nutritional quality of biscuits and to enrich them with natural anthocyanins / A. Pasqualone, A. M. Bianco, V. M. Paradiso. – DOI: 10.1080/19476337.2012.753113 // CyTA-Journal of Food. – 2013. – Vol. 11. – № 4. – P. 301–308.

8. Bravi, E. Quinoa (*Chenopodium Quinoa Willd.*) as Functional Ingredient for the Formulation of Gluten-Free Shortbreads / E. Bravi, V. Sileoni, O. Marconi. – DOI: 10.3390/foods13030377 // Foods. – 2024. – Vol. 13. – № 3. – P. 377.

9. Patent № 2821697. Russian Federation. IPC A21D 13/80 (2017.01), A21D 2/36 (2006.01). Butter cookies: № 2023126679: declar. 18.10.2023: publ. 26.06.2024 / N. V. Merkuriev, M. Sh. Begeulov, P. S. Kharitonova. – 6 p.

10. The use of plant emulsion gels in the technology of gluten-free shortbread biscuits / V. A. Vaskina, E. S. Novozhilova, G. N. Dubtsova [et al.]. – DOI: 10.36107/spfp.2024.1.487 // Storage and processing of agricultural raw materials. – 2024. – Vol. 32. – № 1. – P. 71–84.

11. Roles of gelator type and gelation technology on texture and sensory properties of cookies prepared with oleogels / S. Li, G. Wu, Q. Jin [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129667 // Food Chemistry. – 2021. – Vol. 356. – 129667.

12. Frolova, Yu. V. Study of biscuits with a modified fat component / Yu. V. Frolova, R. V. Sobolev, A. A. Kochetkova. – DOI: 10.24412/0235-2486-2021-4-0039 // Food industry. – 2021. – № 4. – P. 8–11.

13. Patent № 2759805 Russian Federation, IPC A21D 13/80 (2017.01). Enriched butter biscuits; № 2021110069; declared 12.04.2021; publ. 18.11.2021 / Alekseenko E. V., Belyavskaya I. G., Zaitseva L. V., Glebova P. S. – 16 p.

14. Patent № 2817794. Russian Federation. IPC A21D 8/02 (2006.01), A21D 2/36 (2006.01), A21D 13/80 (2017.01). Method of producing functional butter jiggling cookie: № 2023117960: declar. 07.07.2023: publ. 22.04.2024 / I. V. Plotnikova, Y. V. Deniso-va. – 9 p.

15. Mielmann, A. Linking the Sensory Taste Properties of Chocolate-Based Biscuits to Consumers' Emotions: A Cross-Cultural Study / A. Mielmann, T. A. Brunner. – DOI: 10.3390/app12168038 // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 16. – 8038.

16. Sensory dynamic profile and consumer acceptance of short-dough biscuits with reduced sucrose and thaumatin addition / C. A. Kawakami, M. M. Selani, E. Saldaña [et al.]. – DOI: 10.1016/j.foodres.2024.115524 // Food Research International. – 2025. – Vol. 200. – 115524.

17. Jambrec, D. Development and application of descriptors for establishing sensory profile of gluten-free cookies by a multidimensional approach / D. Jambrec, M. Pestorić, U. Žigon // Food and Feed Research. – 2012. – Vol. 39. – № 1 – P. 41–49.

18. A gluten-free diet, not an appropriate choice without a medical diagnosis / A. Diez-Sampedro, M. Olenick, T. Maltseva, M. Flowers. – DOI: 10.1155/2019/2438934 // Journal of nutrition and metabolism. – 2019. – Vol. 2019. – № 1. – 2438934.

Информация об авторах

А. А. Корниенко – аспирант кафедры пищевой биотехнологии

Е. В. Лютова – кандидат технических наук, доцент кафедры пищевой биотехнологии

Information about the authors

A. A. Kornienko – postgraduate student of the Department of Food Biotechnology

E. V. Lyutova – Candidate of Technical sciences, Associate Professor of the Department of Food Biotechnology

Вклад авторов

А. А. Корниенко – идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи

Е. В. Лютова – научное руководство

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

A. A. Kornienko – the idea, data collection, data processing, article writing

E. V. Lyutova – scientific advising

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; одобрена после рецензирования 11.11.2025; принята к публикации 21.11.2025.

The article was submitted 01.11.2025; approved after reviewing 11.11.2025; accepted for publication 21.11.2025.

СУДОСТРОЕНИЕ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 629.5.06

DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-95-109

**Разработка прототипа устройства идентификации неисправности
информационно-измерительного канала частоты оборотов двигателя
внутреннего сгорания**

Александр Андреевич Житников¹✉, Алексей Александрович Марченко²

^{1,2} Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, Россия

¹ zhitnikov-alexandr@mail.ru ✉

² Marchenko_Alx@inbox.ru

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и лабораторной проверки прототипа устройства, предназначенного для оперативного выявления аномалий в работе информационно-измерительных каналов частоты вращения судовых двигателей внутреннего сгорания. Предложенный прототип реализует комплексный подход к диагностике, основанный на одновременном применении двух независимых методов контроля. Первый метод заключается в анализе временных характеристик дискретного сигнала, формируемого индуктивным датчиком частоты вращения: осуществляется измерение длительности и периодичности импульсов, что позволяет выявлять такие неисправности, как обрыв сигнальной цепи, залипание или пропуск импульсов, а также деградацию магнитной системы датчика. Второй метод основан на непрерывном мониторинге уровня унифицированного аналогового токового сигнала стандарта 4–20 мА, используемого в большинстве промышленных систем автоматики. Оценка его статических и динамических характеристик позволяет диагностировать неисправности, связанные с деградацией преобразователя, нестабильностью питания или нарушением целостности линии передачи. Устройство реализовано на базе микроконтроллера. Практическая значимость разработки заключается в возможности существенного сокращения времени локализации и устранения неисправностей информационно-измерительных каналов частоты оборотов за счет автоматического распознавания аномалий без привлечения дополнительных средств диагностики. Кроме того, устройство обеспечивает повышение общей устойчивости функционирования судовой энергетической установки благодаря возможности интеграции диагностической информации в систему управления. В частности, полученные данные могут использоваться для блокировки ложных срабатываний защитных функций, вызванных деградацией измерительного канала, тем самым предотвращая необоснованные переходы судовой энергетической установки в аварийные режимы и снижая риск неплановых остановок. Таким образом, предложенное решение способствует повышению эксплуатационной надежности и безопасности судовых технических средств.

Ключевые слова: датчик частоты оборотов, информационно-измерительный канал, система управления, алгоритм, аварийная остановка, аналоговый сигнал, дискретный сигнал.

Для цитирования: Житников А. А., Марченко А. А. Разработка прототипа устройства идентификации неисправности информационно-измерительного канала частоты оборотов двигателя внутреннего сгорания // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 95–109. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-95-109.

Original article

Development of a prototype device for identifying a malfunction of the information-measuring channel of the internal combustion engine speed

Aleksandr A. Zhitnikov^{1✉}, Aleksey A. Marchenko²

^{1,2} Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

¹ zhitnikov-alexandr@mail.ru[✉]

² Marchenko_Alx@inbox.ru

Abstract. This article presents the results of the development and laboratory testing of a prototype device designed to quickly detect anomalies in the operation of speed measurement channels in marine internal combustion engines. The proposed prototype implements a comprehensive diagnostic approach based on the simultaneous use of two independent monitoring methods. The first method involves analyzing the temporal characteristics of a discrete signal generated by an inductive speed sensor: measuring the pulse duration and periodicity, which enables the detection of faults such as open circuits, stuck or missing pulses, and degradation of the sensor's magnetic system. The second method is based on continuous monitoring of the standard 4–20 mA analog current signal used in most industrial automation systems. Evaluating its static and dynamic characteristics enables the diagnosis of faults related to converter degradation, power supply instability, or transmission line integrity issues. The device is based on a microcontroller. The practical significance of this development lies in its ability to significantly reduce the time it takes to localize and troubleshoot faults in RPM data and measurement channels by automatically recognizing anomalies without the need for additional diagnostic tools. Furthermore, the device improves the overall operational stability of the ship's power plant by integrating diagnostic information into the control system. Specifically, the obtained data can be used to block false alarms of protective functions caused by measurement channel degradation, thereby preventing unnecessary transitions of the ship's power plant to emergency modes and reducing the risk of unscheduled shutdowns. Thus, the proposed solution contributes to the increased operational reliability and safety of shipboard technical equipment.

Keywords: speed sensor, information-measuring channel, control system, algorithm, emergency stop, analog signal, discrete signal.

For citation: Zhitnikov A. A., Marchenko A. A. Development of a prototype device for identifying a malfunction of the information-measuring channel of the internal combustion engine speed. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(80):95–109. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-95-109.

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах управления судовыми двигателями внутреннего сгорания информационно-измерительные каналы частоты оборотов играют ключевую роль в обеспечении стабильной и эффективной работы силовой установки. Данные устройства обеспечивают сбор информации о частоте вращения коленчатого вала и его угловом положении, что позволяет системе управления точно регулировать моменты впрыска топлива, зажигания и других параметров, влияющих на энергетические характеристики и экологические показатели двигателя [1–3].

На сегодняшний день структура информационно-измерительного канала частоты оборотов двигателя внутреннего сгорания может варьировать в широком диапазоне решений в зависимости от целей и условий эксплуатации. В основе большинства современных систем лежат бесконтактные датчики, основанные на принципах индуктивной, магниторезистивной или оптической сенсорики. Они обеспечивают высокую точность измерений при минимальном износе и устойчивость к вибрационным и температурным воздействиям, характерным для судовых условий.

Особую опасность представляют неисправности, возникающие в информационно-измерительных каналах частоты оборотов, поскольку они зачастую не сопровождаются явными внешними признаками до момента развития аварийной ситуации. Наиболее распространенным сценарием является постепенная деградация характеристик датчика, вызванная воздействием агрессивной среды. Факторами, влияющими на ухудшение характеристик, могут быть повышенная влажность, температурные колебания, вибрации, загрязнения масляными парами или солями [4–6]. В таких условиях возможно ослабление амплитуды выходного сигнала, искажение его формы или потеря отдельных импульсов.

Не менее критичны и внезапные отказы, связанные с обрывом проводников, коротким замыканием в цепи датчика или полным выходом из строя его электронной части. В таких случаях электронный блок управления, не получая необходимых данных о частоте вращения вала, может остановить двигатель или перевести его в аварийный режим работы. В условиях морской эксплуатации, где доступ к резервным средствам ограничен, такие ситуации могут повлечь за собой необходимость экстренного захода в порт, простой судна и значительные экономические потери.

Сложность диагностики подобных неисправностей усугубляется тем, что их проявления часто могут восприниматься персоналом как проблемы в работе механической части двигателя [7–10]. Более того, в условиях эксплуатации при высоких температурах окружающей среды или при резких изменениях нагрузки могут возникать временные сбои, не фиксируемые системой самодиагностики, но приводящие к эпизодическим нарушениям в работе агрегата. Такие неисправности особенно опасны, поскольку не позволяют своевременно принять меры и могут спровоцировать внезапную остановку двигателя в ответственный момент, например, при маневрировании в узкости или швартовке [11, 12].

На сегодняшний день судостроительные компании реализуют различные подходы к повышению надежности и достоверности показаний информационно-

измерительных каналов [13]. К наиболее консервативному варианту относится дублирование средств измерений ответственных узлов. Данный подход отличается своей дороговизной как для постройки, так и для эксплуатации системы управления судна.

Одним из наиболее распространенных направлений, активно используемых на сегодняшний день, является установка интеллектуальных датчиков с алгоритмами самодиагностики. Устройства такого рода, как правило, передают информацию о показаниях в систему управления в виде цифрового сигнала, однако алгоритмы самодиагностики средств измерений направлены на внутренние схемы датчиков, что не дает возможности диагностировать информационно-измерительный канал целиком [14].

К активно развивающимся направлениям решения данной проблемы можно отнести использование методов машинного обучения. Методы данного направления являются достаточно перспективными, но они также имеют существенные недостатки. К основным из них можно отнести необходимость обучения на большом объеме данных, внедрения серьезных вычислительных мощностей для работы и отсутствие прозрачности принятых решений [15].

Целью данной работы является разработка прототипа устройства идентификации неисправности в информационно-измерительном канале частоты оборотов, не требующего значительных материальных и вычислительных затрат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов исследования были использованы высокочастотный дискретный сигнал с индуктивного датчика частоты оборотов и унифицированный выходной сигнал токовой петли 4-20 мА. Метод идентификации неисправности будет заключаться в анализе выходного сигнала для поиска ненормального режима работы информационно-измерительного канала частоты оборотов двигателя внутреннего сгорания.

Для выявления некорректного сигнала использовалось вычисление минимального и максимального значения времени для одного импульса. Выход за временной диапазон импульса идентифицируется алгоритмом как неисправность. Время для вычисления одного импульса находилось из данных о максимальных и минимальных значениях оборота двигателя (рис. 1).

Для определения неисправности по наличию унифицированного аналогового сигнала 4-20 мА был использован алгоритм сравнения заданных значений максимальных и минимальных оборотов двигателя внутреннего сгорания с текущим значением измеряемого параметра. Причина необходимости анализа такого рода сигнала заключается в его уязвимости к электромагнитным помехам разного рода. Опасность заключается в том, что кратковременный импульс может быть интерпретирован системой управления как ненормальный режим работы агрегата. Такого рода уязвимость не может быть определена выходным сигналом индуктивного датчика, так как данное устройство оценивает только наличие или отсутствие сигнала.

Аппаратная часть прототипа устройства была построена на микроконтроллере ATmega328P с дополнительными электронными элементами: стабилизатор напряжения L7805CV-DG, резисторы номинальными

сопротивлениями 200 Ом, оптопара PC817A, реле SRD-05VDC-SL-C. Все компоненты размещаются на печатной макетной плате и скрепляются между собой проводами.

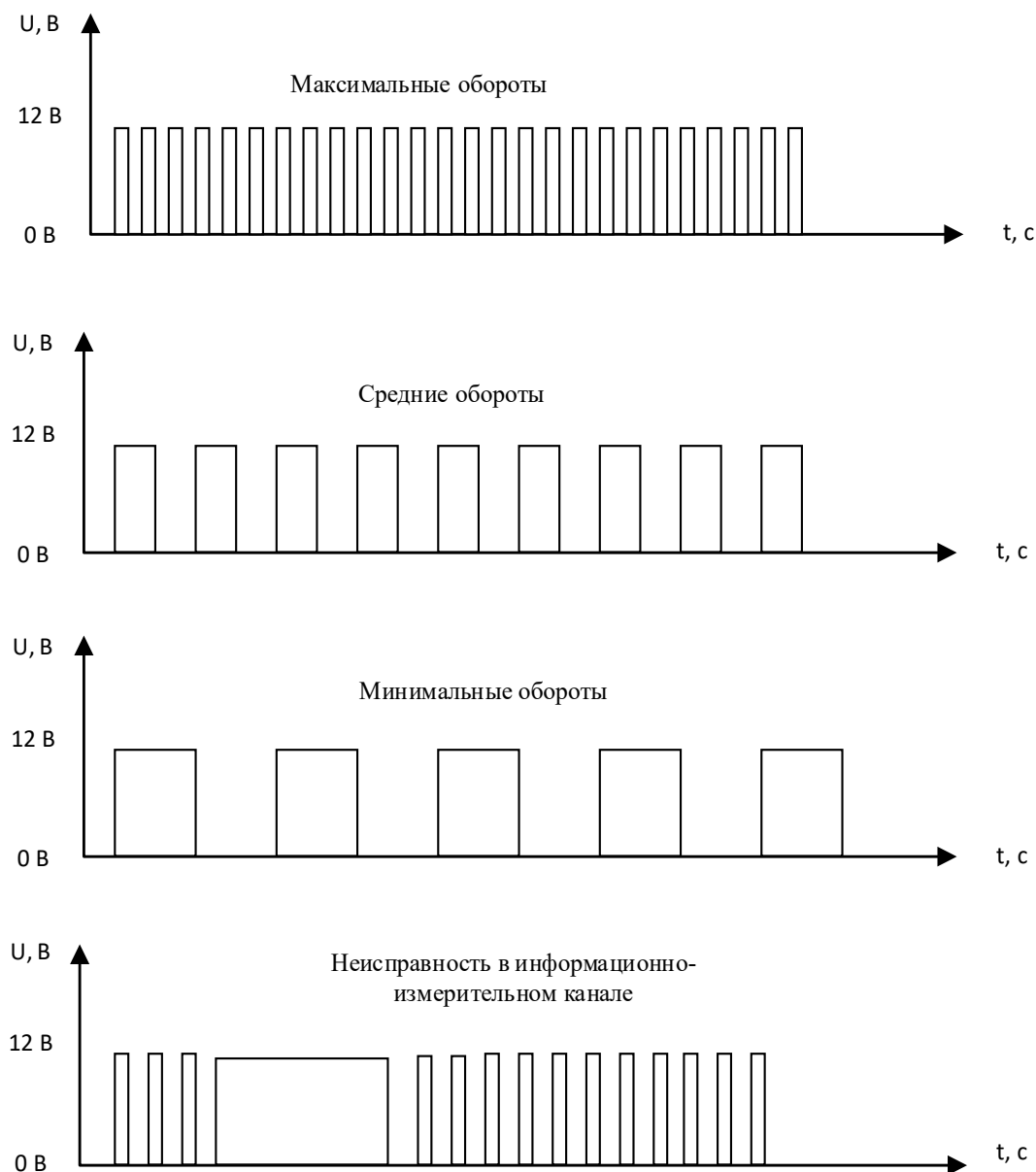


Рис. 1. Диапазоны временных интервалов дискретных сигналов индуктивного датчика частоты оборотов

Fig. 1. Time interval ranges of discrete signals of the inductive speed sensor

Для оценки работоспособности прототипа применялись многофункциональный калибратор Beamex MC5-R для имитации значения выходных сигналов в информационно-измерительном канале и проверки работоспособности алгоритма прототипа, источник питания АТН-2031 и высокоточный мультиметр ТУ720 Yokogawa.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Алгоритм работы микроконтроллера для определения неисправности в информационно-измерительном канале частоты оборотов основывается на измерении времени одного импульса (рис. 2). Продолжительность дискретного сигнала с индуктивного датчика может быть разной, но его максимальное и минимальное значения не должны выходить за диапазон частоты оборотов двигателя внутреннего сгорания.

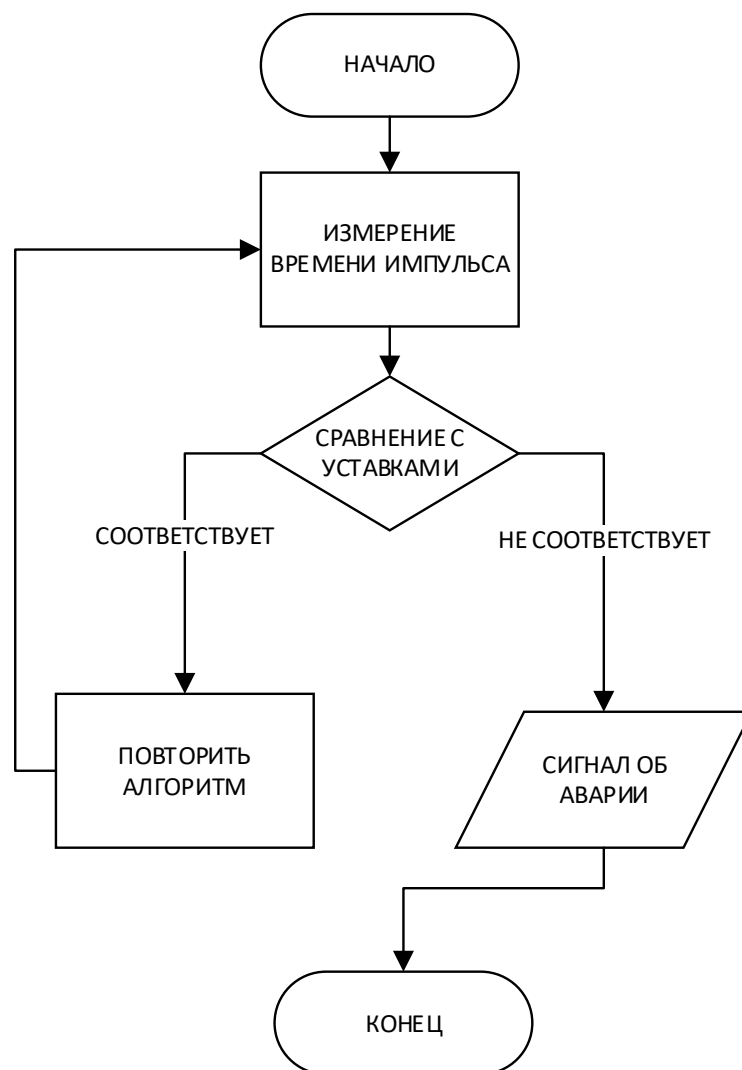


Рис. 2. Структурная схема алгоритма для высокочастотного индуктивного датчика
Fig. 2. Structural diagram of the algorithm for a high-frequency inductive sensor

Алгоритм анализа выходного унифицированного сигнала 4-20 мА направлен на оценку достоверности показаний частоты оборотов. Оценка производится по верхнему и нижнему уровням допустимых значений измеряемого параметра. Ключевое отличие данного алгоритма от предыдущего заключается в анализе величины сигнала, а не его времени.

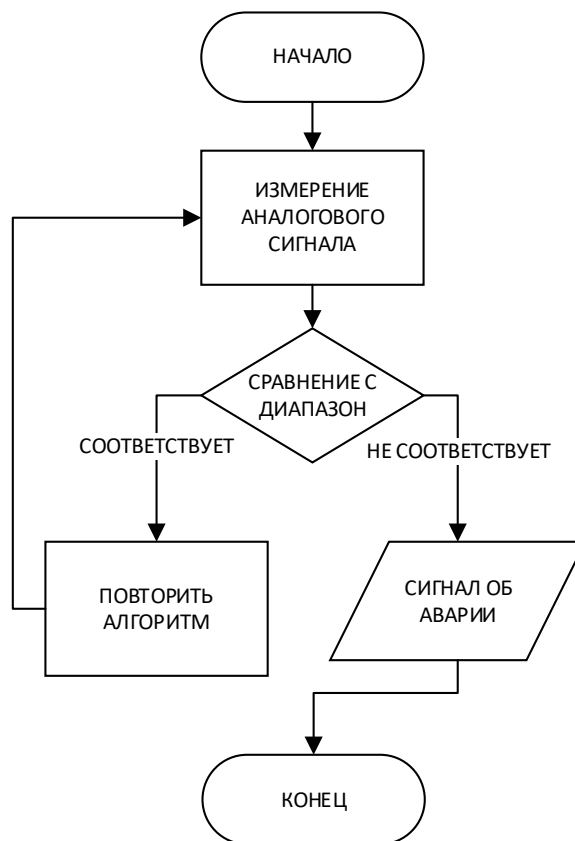


Рис. 3. Структурная схема алгоритма для анализа аналогового сигнала
Fig. 3. Structural diagram of the algorithm for analyzing an analog signal

Аппаратная часть представляет собой совокупность электронных компонентов, размещенных на распаячной макетной плате. Питание для устройства осуществляется через стабилизатор напряжения L7805. Анализ входных сигналов производится микроконтроллером. Высокочастотный сигнал оборотов с индуктивного датчика поступает на вход микроконтроллера через оптопару. Данная мера применяется по причине того, что промышленные датчики данного типа рассчитаны на 12 и 24 В. Это значение необходимо снизить до 5 В. Аналоговый унифицированный сигнал тока считывается микроконтроллером при помощи сопротивления общим номиналом 200 Ом. Микроконтроллер измеряет падение напряжения на сопротивлении в диапазоне от 0,8 до 4 В. В случае обнаружения неисправности микроконтроллер будет выдавать дискретный сигнал на реле SRD-05VDC-SL-C. Данный сигнал можно использовать для интеграции устройства в общую систему управления или подключения устройства сигнализации об ошибке.

Общий вид устройства после сборки представлен на рис. 4. Основные компоненты устройства:

- 1 – микроконтроллер ATmega328P;
- 2 – стабилизатор напряжения L7805;
- 3 – оптопара PC817A;
- 4 – реле SRD-05VDC-SL-C;
- 5 – резисторы общим сопротивлением 200 Ом.

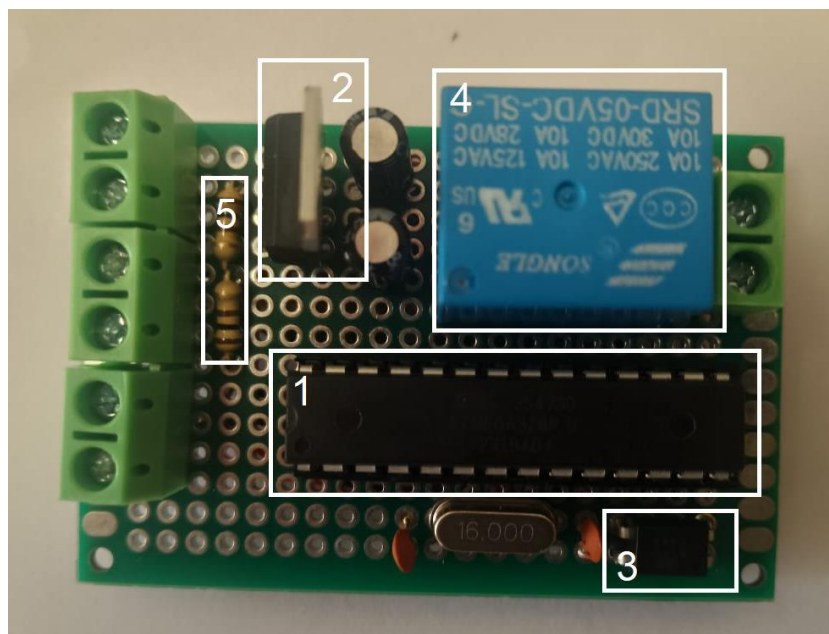


Рис. 4. Прототип устройства идентификации неисправности информационно-измерительного канала частоты оборотов двигателя внутреннего сгорания
Fig. 4. Prototype of a device for identifying a malfunction of the information-measuring channel of the internal combustion engine speed

Для произведения проверки работоспособности к прототипу устройства подключался источник питания АТН-2031, а также цифровой мультиметр ТУ720 Yokogawa для отслеживания замыкания контактов реле и многофункциональный калибратор MC5-R для имитации показаний датчика (рис. 5).

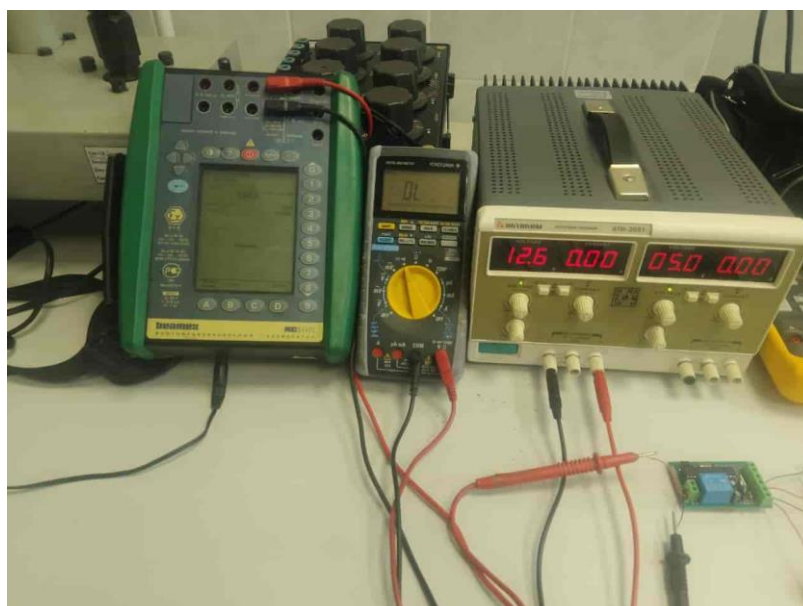


Рис. 5. Проверка работоспособности прототипа
Fig. 5. Testing the prototype's functionality

Параметры времени дискретного импульса индуктивного датчика и входного аналогового сигнала 4-20 мА были настроены на диапазон частоты оборотов от 300 до 900 за одну минуту. В дополнение к этому был реализован учет того, что за один оборот вала двигателя датчик производит один дискретный импульс и длина импульса равняется 1/8 одного оборота вала. Общий вид рассматриваемой системы можно увидеть на рис. 6.

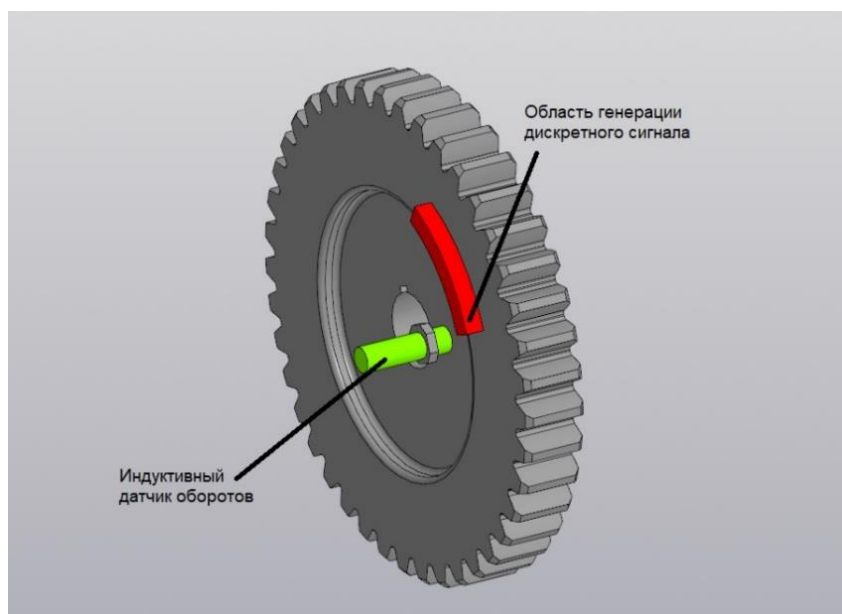


Рис. 6. Общий вид рассматриваемой системы
Fig. 6. General view of the system under consideration

Процедура проведения проверки работоспособности производилась в два этапа. На первом этапе осуществлялась проверка алгоритма для высокочастотного сигнала индуктивного датчика. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты проверки алгоритма для высокочастотного сигнала
Table 1. Results of testing the algorithm for the high-frequency signal

Частота сигнала, Гц	Эквивалентные обороты ДВС, об./мин	Время одного импульса, мс	Обнаружение отказа
4	240	31,25	да
5	300	25	нет
10	600	12,5	нет
15	900	8,3	нет
16	960	7,8125	да

После проведения отладки алгоритма и подтверждения работоспособности устройства микроконтроллер был перепрограммирован на алгоритм анализа аналогового сигнала 4-20 мА для проведения тех же мероприятий (табл. 2).

Таблица 2. Результаты проверки алгоритма аналогового сигнала 4-20 мА
Table 2. Results of testing the 4-20 mA analog signal algorithm

Значение сигнала тока 4-20, мА	Эквивалентные обороты ДВС, об./мин	Напряжение на микроконтроллере, В	Обнаружение отказа
3,5	-28	0,7	да
4	0	0,8	да
8	225	1,6	да
12	450	2,4	нет
16	675	3,2	нет
20	900	4	нет
20,5	928	4,1	да

Из представленных таблиц видно, что устройство реагирует на отклонения показаний частоты оборотов при выходе за определенный диапазон значений для обоих видов сигналов.

Необходимо отметить, что разработанное устройство не может быть применено ко всем типам судовых двигателей внутреннего сгорания без дополнительной настройки. По причине того, что диапазоны допустимых значений частоты вращения коленчатого вала и соответствующие им временные интервалы импульсов существенно варьируют в зависимости от модели двигателя, алгоритм идентификации неисправности должен быть настроен индивидуально для каждого конкретного агрегата.

Кроме того, для применения устройства с использованием унифицированного аналогового сигнала токовой петли 4-20 мА необходимо также внедрять задержку времени с учетом времени запуска агрегата и выхода его на минимальные обороты. Данный алгоритм может быть реализован при помощи дополнительного дискретного входа микроконтроллера.

ОБСУЖДЕНИЕ

Использование такого рода устройств или внедрение дополнительных алгоритмов в систему управления судовым двигателем внутреннего сгорания может иметь определенный ряд преимуществ. Внедрение дополнительных алгоритмов диагностики или автономных устройств контроля состояния информационно-измерительных каналов частоты оборотов в состав систем управления судовыми двигателями внутреннего сгорания позволяет повысить общую надежность энергетической установки.

Одним из ключевых практических эффектов от применения подобных решений является существенное сокращение временных затрат технического персонала на локализацию и устранение неисправностей. В условиях ограниченного времени на диагностику, особенно в морских условиях, когда доступ к береговым ресурсам отсутствует, возможность автоматического выявления аномалий позволяет избежать многочасовых проверок, замеров параметров и последовательного исключения потенциальных источников сбоя. Вместо этого обслуживающий персонал получает четко сформированный сигнал о характере и месте возникновения нарушения, что сокращает время простоя и

минимизирует риск принятия ошибочных решений. Кроме того, внедряя данное устройство появляется возможность интеграции выходного дискретного сигнала устройства в логику управления судовой автоматикой. Такой сигнал может быть использован не только для визуальной или звуковой индикации неисправности, но и для коррекции алгоритмов аварийного реагирования.

Данное устройство имеет ряд основных преимуществ перед существующими подходами для решения поставленной задачи. Предложенный подход отличается дешевизной и, более того, может быть реализован внутри программируемого логического контроллера. Также данное решение будет дешевле, чем установка интеллектуальных датчиков или затраты на вычислительную технику для применения методов машинного обучения. Кроме того, предлагаемое устройство диагностирует проблему на всем протяжении информационно-измерительного канала частоты оборотов, а не только внутри самого датчика. Это позволит диагностировать проблему в более широком диапазоне.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что реализация дополнительного уровня диагностики может повысить не только информативность системы управления, но и сформировать более гибкую и адаптивную стратегию реагирования на отказы, что в совокупности способствует увеличению безотказности работы судовой силовой установки, снижению эксплуатационных рисков и оптимизации затрат на техническое обслуживание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы была реализована разработка прототипа устройства, предназначенного для автоматизированного выявления аномалий в работе информационно-измерительного канала частоты оборотов судового двигателя внутреннего сгорания.

В ходе выполнения работы проведен анализ типовых отказов датчиков оборотов, а также сформулированы технические требования к устройству диагностики. На основе полученных данных разработаны два алгоритма обработки входных сигналов: первый ориентирован на анализ временных характеристик дискретного импульсного сигнала, формируемого индуктивным датчиком, второй – на оценку уровня унифицированного аналогового сигнала токовой петли 4-20 мА. Оба алгоритма были реализованы в виде программы для микроконтроллера.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют практическую реализуемость предложенного подхода к повышению отказоустойчивости судовых двигателей за счет диагностики выходных сигналов информационно-измерительных каналов частоты оборотов. Разработанный прототип может служить основой для решений, ориентированных на модернизацию существующих систем управления, не обладающих достаточной глубиной диагностики в части анализа качества входных сигналов.

Список источников

1. Коновалов, П. О. Опыт развития и применения в эксплуатации систем мониторинга технического состояния судовых ДВС / П. О. Коновалов, А. А. Иванченко, Г. Л. Ларионов. – DOI: 10.18411/trnio-08-2023-246 // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 100 (5). – С. 102 – 108. – EDN TWWL BX.
2. Kang, Y. J. Hierarchical level fault detection and diagnosis of ship engine systems / Y. J. Kang. – DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118814 // Expert Systems with Applications. – 2023. – Vol. 213. – P. 118814.
3. Kougiatsos, N. Distributed cyber-physical framework for sensor fault diagnosis of marine internal combustion engines / N. Kougiatsos, V. A. Reppa. – DOI: 10.1109/TCST.2024.3378992 // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2024. – Vol. 32. – № 5. – P. 1718–1729.
4. Orhan, M. Literature review and future research agenda on fault detection and diagnosis studies in marine machinery systems / M. Orhan, M. A. Celik. – DOI: 10.1177/14750902221149291 // Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2024. – Vol. 238. – № 1. – P. 3–21.
5. Velasco-Gallego, C. RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery / C. Velasco-Gallego, I. Lazakis. – DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117634 // Expert Systems with Applications. – 2022. – Vol. 204. – P. 117634.
6. Бурков, Д. Е. Применение судовой информационной системы для контроля и мониторинга технического состояния судового оборудования / Д. Е. Бурков. – DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902. – EDN PTA EFT // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала Макарова. – 2023. – Т. 15. – № 5. – С. 893–902.
7. Валов, Д. С. Системы управления судовыми энергетическими установками автономных судов / Д. С. Валов, С. А. Валгин. – EDN QGRTJJ // Актуальные исследования. – 2023. – № 5 (135). – С. 19–28.
8. Vrvilo, P. Methods and equipment for analysis and diagnosis of marine engines during navigation / P. Vrvilo. – DOI: 10.1080/15567036.2024.2422568 // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2024. – Vol. 46. – № 1. – P. 15808–15824.
9. Pagonis, D. N. Sensors and Measurement Systems for Marine Engineering Applications / D. N. Pagonis. – DOI: 10.3390/app14093761 // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – № 9. – P. 3761.
10. Kim, D. Explainable anomaly detection framework for maritime main engine sensor data / D. Kim. – DOI: 10.3390/s21155200 // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 15. – P. 5200.
11. Liu, B. Research on fault early warning of marine diesel engine based on CNN-BiGRU / B. Liu. – DOI: 10.3390/jmse11010056 // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 11. – № 1. – P. 56.
12. Jovanović, I. Combined Fault Tree Analysis and Bayesian Network for Reliability Assessment of Marine Internal Combustion Engine / I. Jovanović. – DOI: 10.1007/s11804-025-00692-7 // Journal of Marine Science and Application. – 2023. – №. 2 – P. 1–20.

13. Jombo, G. Sensor Fault Detection and Diagnosis: Methods and Challenges / G. Jombo, E. Zhang, N. Lu // Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (Ferrara, 4–7 June 2024) / IFAC SAFEPROCESS. – 2024.
14. Self-Detection and Self-Diagnosis Methods for Sensors in Intelligent Integrated Sensing System / M. Zhu, J. Li, W. Wang, D. Chen. – DOI: 10.1109/JSEN.2021.3090990 // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21, № 17. – P. 19247–19254.
15. Sana, U. A distributed sensor-fault detection and diagnosis framework using machine learning / U. Sana, L. Young, S. Koo. – DOI: 10.1016/j.ins.2020.08.068 // Information Sciences. – 2021. – Vol. 547. – P. 777–796.

References

1. Konovalov, P. O. Experience in the Development and Application of Systems for Monitoring the Technical Condition of Marine Internal Combustion Engines / P. O. Konovalov, A. A. Ivanchenko, G. L. Larionov. – DOI: 10.18411/trnio-08-2023-246. – EDN TWVLBX // Trends in the Development of Science and Education. – 2023. – № 100 – (5). – P. 102–108.
2. Kang, Y. J. Hierarchical Level Fault Detection and Diagnosis of Ship Engine Systems / Y. J. Kang. – DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118814 // Expert Systems with Applications. – 2023. – Vol. 213. – P. 118814.
3. Kougiatsos, N. Distributed Cyber-Physical Framework for Sensor Fault Diagnosis of Marine Internal Combustion Engines / N. Kougiatsos, V. A. Reppa. – DOI: 10.1109/TCST.2024.3378992 // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2024. – Vol. 32. – № 5. – P. 1718–1729.
4. Orhan, M. Literature review and future research agenda on fault detection and diagnosis studies in marine machinery systems / M. Orhan, M. A. Celik. – DOI: 10.1177/14750902221149291 // Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2024. – Vol. 238. – № 1. – P. 3–21.
5. Velasco-Gallego, C. RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery / C. Velasco-Gallego, I. Lazakis. – DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117634 // Expert Systems with Applications. – 2022. – Vol. 204. – P. 117634.
6. Burkov, D. E. Application of a shipboard information system for monitoring and controlling the technical condition of shipboard equipment / D. E. Burkov. – DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-893-902. – EDN PTAEFT // Bulletin of the Admiral Makarov State University of Maritime and River Fleet. – 2023. – V. 15. – № 5. – P. 893–902.
7. Valov, D. S. Control systems for marine power plants of autonomous vessels / D. S. Valov, S. A. Valgin. – EDN QGRTJJ // Current research. – 2023. – № 5 (135). – P. 19–28.
8. Vrvilo, P. Methods and equipment for analysis and diagnosis of marine engines during navigation / P. Vrvilo. – DOI: 10.1080/15567036.2024.2422568 // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2024. – Vol. 46. – № 1. – P. 15808–15824.

9. Pagonis, D. N. Sensors and Measurement Systems for Marine Engineering Applications / D. N. Paganis. – DOI: 10.3390/app14093761 // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – № 9. – P. 3761.
10. Kim, D. Explainable anomaly detection framework for maritime main engine sensor data / D. Kim. – DOI: 10.3390/s21155200 // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 15. – P. 5200.
11. Liu, B. Research on fault early warning of marine diesel engine based on CNN-BiGRU / B. Liu. – DOI: 10.3390/jmse11010056 // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 11. – № 1. – P. 56.
12. Jovanović, I. Combined Fault Tree Analysis and Bayesian Network for Reliability Assessment of Marine Internal Combustion Engine / I. Jovanović. – DOI: 10.1007/s11804-025-00692-7 // Journal of Marine Science and Application. – 2023. – № 2 – P. 1–20.
13. Jombo, G. Sensor Fault Detection and Diagnosis: Methods and Challenges / G. Jombo, E. Zhang, N. Lu // Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (Ferrara, 4–7 June 2024) / IFAC SAFEPROCESS. – 2024.
14. Self-Detection and Self-Diagnosis Methods for Sensors in Intelligent Integrated Sensing System / M. Zhu, J. Li, W. Wang, D. Chen. – DOI: 10.1109/JSEN.2021.3090990 // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21, № 17. – P. 19247–19254.
15. Sana, U. A distributed sensor-fault detection and diagnosis framework using machine learning / U. Sana, L. Young, S. Koo – DOI 10.1016/j.ins.2020.08.068 // Information Sciences. – 2021. – Vol. 547. – P. 777–796.

Информация об авторах

А. А. Житников – аспирант кафедры «Системы управления»

А. А. Марченко – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы управления»

Information about the authors

A. A. Zhitnikov – Postgraduate student of the Department of Control Systems

A. A. Marchenko – Candidate of Technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Control Systems

Вклад авторов

А. А. Житников – идея, сбор материала, обработка материала и написание статьи

А. А. Марченко – научное редактирование текста и научное руководство

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

A. A. Zhitnikov – idea, collection of material, processing of material, and writing of the article

A. A. Marchenko – scientific editing of the text and scientific supervision

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.11.2025; одобрена после рецензирования 25.11.2025; принята к публикации 03.12.2025.

The article was submitted 15.11.2025; approved after reviewing 25.11.2025; accepted for publication 03.12.2025.

Научная статья

УДК 639.2/.3:51-7; 639.2/.3:007; 629.562.2

DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-110-124

**Численное моделирование гидродинамики осесимметричной сетной
конструкции методом «вихрь – функция тока»**

Алексей Олегович Ражев^{1✉}, Александр Алексеевич Недоступ², Павел
Владимирович Насенков³, Карина Витальевна Коновалова⁴

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

¹aleksej.razhev@klgtu.ru[✉]

²nedostup@klgtu.ru

³pavel.nasenkov@klgtu.ru

⁴karina.konovalova@klgtu.ru

Аннотация. В статье представлены математическая и имитационная модель для моделирования гидродинамики таких осесимметричных сетных конструкций, как траловый мешок методом «вихрь – функция тока». Новизной исследования является сведение задачи к расчету в двухмерной системе координат, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс получения результата. Описаны достоинства и недостатки метода. Представлены системы уравнений в частных производных, а также конечно-разностные схемы и методы их решения. Обозначены начальные и граничные условия. Предложены алгоритмы решения уравнений Навье-Стокса и Пуассона для гетерогенной вычислительной системы. Рассмотрена неявная конечно-разностная схема и решение методами расщепления с получением трехдиагональных систем линейных уравнений. Показано их решение методом прогонки. Приведен результат численного моделирования ω – ψ методом на разработанной программе для ЭВМ. Полученные результаты сопоставлены с результатами численного моделирования на основе эвристических зависимостей. Показано, что результаты численного моделирования согласуются с данными натурного эксперимента в гидроканале. Область применения: научные исследования, учебный процесс, проектирование и эксплуатация рыболовных тралов, системы виртуальной реальности.

Ключевые слова: гидродинамика, траловый мешок, вихрь – функция тока, гетерогенная система, численное моделирование, уравнение Пуассона.

Финансирование: Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00008, <https://rscf.ru/project/25-21-00008/>.

Для цитирования: Ражев А. О., Недоступ А. А., Насенков П. В., Коновалова К. В. Численное моделирование гидродинамики осесимметричной сетной конструкции методом «вихрь – функция тока» // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 110–124. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-110-124.

Original article

Numerical simulation of hydrodynamics of an axisymmetric grid structure using the "vortex – current function" method

Aleksey O. Razhev¹✉, Aleksandr A. Nedostup², Pavel V. Nasenkov³, Karina V. Konovalova⁴

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

¹aleksej.razhev@klgtu.ru✉

²nedostup@klgtu.ru

³pavel.nasenkov@klgtu.ru

⁴karina.konovalova@klgtu.ru

Abstract. The article presents a mathematical and simulation model for modeling the hydrodynamics of axisymmetric mesh structures such as a trawl codend using the vortex–current function method. The novelty of the research is to reduce the problem to calculation in a two-dimensional coordinate system, which will reduce the complexity of calculations and speed up the process of obtaining a result. The advantages and disadvantages of the method are described. Systems of partial differential equations, as well as finite difference schemes and methods for their solution are presented. The initial and boundary conditions are indicated. Algorithms for solving the Navier-Stokes and Poisson equations for a heterogeneous computing system are proposed. An implicit finite-difference scheme and a solution by splitting methods to obtain tridiagonal systems of linear equations are considered. Their solution by the run-through method is shown. The result of numerical simulation using the ω – ψ method on the developed computer program is presented. The obtained results are compared with the results of numerical modeling based on heuristic dependencies. It is shown that the results of numerical simulation are consistent with the data of a field experiment in a hydraulic channel. Scope of application: scientific research, educational process, design and operation of fishing trawls, virtual reality systems.

Keywords: hydrodynamics, trawl codend, vortex – current function, heterogeneous system, numerical modeling, Poisson equation.

Funding: The research was carried out at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kaliningrad State Technical University" under the grant of the Russian Science Foundation No. 25-21-00008, <https://rscf.ru/project/25-21-00008/>.

For citation: Razhev A. O., Nedostup A. A., Nasenkov P. V., Konovalova K. V. Numerical simulation of hydrodynamics of an axisymmetric grid structure using the "vortex – current function" method. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(80):110–124. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-110-124.

ВВЕДЕНИЕ

Сетные инженерные конструкции являются ключевым технологическим элементом в таких областях, как промышленный рыбный промысел и аквакультура. Один из основных компонентов рыболовного трала – траловый мешок. Эффективность тралового лова и качество улова во многом зависят от формы тралового мешка, которая, в свою очередь, определяется действующими на него внутренними (натяжения) и внешними (гидродинамическими) силами. Эти параметры необходимо учитывать при проектировании рыбопромысловых судов.

Конструктивно траловый мешок представляет собой осесимметричную сетную конструкцию (рис. 1).

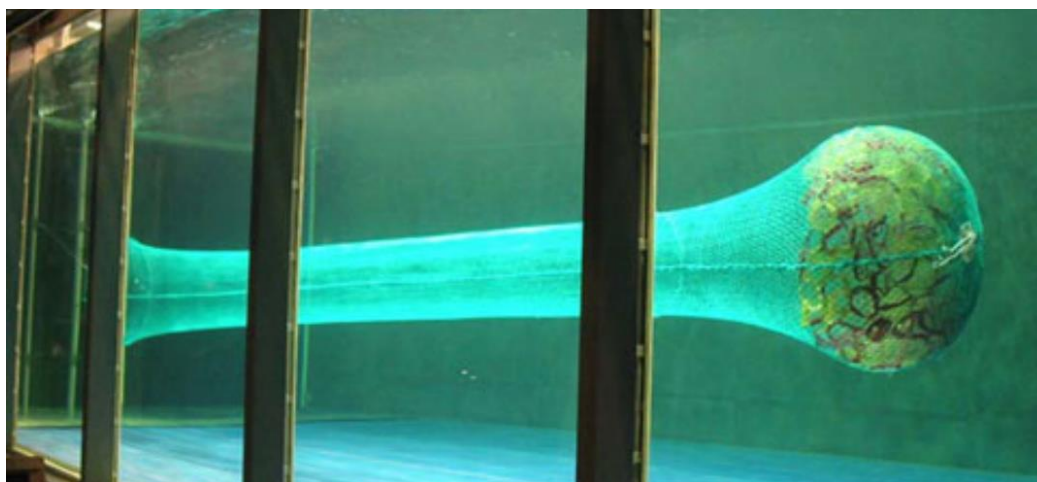


Рис. 1. Траловый мешок
Fig. 1. Trawl codend

В процессе траления на траловый мешок действуют гидродинамические силы, вызванные движением мешка в потоке воды. Для их определения с целью предварительной оценки можно воспользоваться эвристическими зависимостями [1]. Для более точного расчета необходимо учитывать такие гидродинамические характеристики, как поле давлений и скоростей вблизи поверхности тралового мешка.

Кроме формы тралового мешка на эффективность лова влияют характеристики течения внутри мешка, в том числе в режимах изменения скорости траления, при которых возникают переходные процессы.

Для определения характеристик течения в указанных режимах работы трала необходимо вычислять гидродинамические поля внутри тралового мешка и их изменение с течением времени (в динамике).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Методы, основанные на вычислении гидродинамических характеристик при помощи эвристических зависимостей [1], подходят только для установившихся режимов работы трала. Для оценки влияния переходных процессов необходимо

осуществлять гидродинамический расчет, основанный на системах уравнений Навье-Стокса.

Поставим задачу определения гидродинамических полей посредством математического моделирования сетной инженерной конструкции на примере тралового мешка. При условии, что плотность элементов сетной конструкции и улова близка к плотности жидкости, в которую погружена конструкция (справедливо для тралового мешка), силы гидродинамического сопротивления будут многократно превышать гидростатические. В нормальном режиме работы вектор скорости перемещения тралового мешка параллелен его оси. С учетом изложенного гидростатическими силами можно пренебречь, а задачу свести к расчету в двухмерной системе координат, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс моделирования и получения результата.

Для решения задач гидродинамики существуют различные методы, такие как «давление – скорость» и «вихрь – функция тока» [2, 3]. Преимуществом метода «вихрь – функция тока» перед методом «давление – скорость» являются:

- автоматическое выполнение условия несжимаемости жидкости;
- отсутствие давления в системе уравнений и, соответственно, отсутствие необходимости в граничных условиях для давления;
- уменьшение количества уравнений – вместо 3-х уравнений в методе «давление – скорость» при двумерной постановке задачи решаются два;
- удобство визуализации; линии с постоянным значением функции тока являются линиями тока жидкости, что делает функцию тока идеальным инструментом для визуализации структуры течения; вихревое поле наглядно показывает области вращения жидкости и наличие вихрей.

Главным недостатком метода «вихрь – функция тока» является невозможность его применения при трехмерной постановке задачи. Указанный недостаток не критичен для расчета гидродинамики осесимметричных тел, находящихся в потоке, направленном вдоль оси симметрии. При такой постановке задачу можно решать в двухмерной системе координат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Введем расчетную декартову систему координат Oxy . Ось Ox направим вправо, вдоль оси симметрии сетной конструкции, а ось Oy – от оси симметрии вверх. На рис. 2 представлена система координат для расчета тралового мешка.

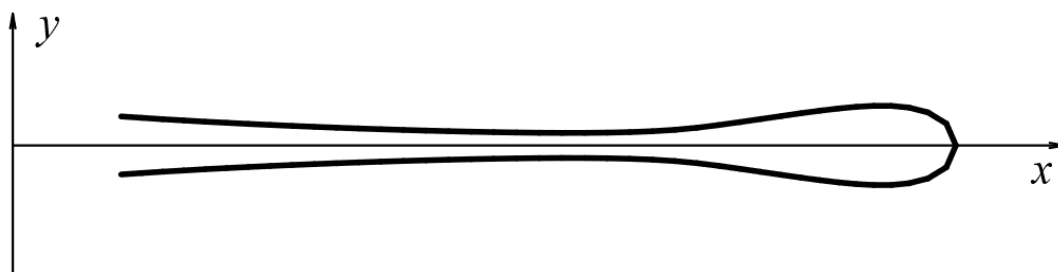


Рис. 2. Система координат для расчета тралового мешка
Fig. 2. The coordinate system for calculating the codend

При решении задач гидродинамики методом «вихрь – функция тока» (далее – ω – ψ методом) вводятся понятия полей вихря ω и функции тока ψ :

$$\omega = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}, \quad (1)$$

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (2)$$

где v_x, v_y – проекции скорости потока жидкости в произвольной точке на плоскости Оху на оси координат.

Запишем уравнения неразрывности и Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в векторной форме:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (4)$$

где $\mathbf{v}$ – вектор скорости потока жидкости в произвольной точке пространства (плоскости – для двумерного случая); t – время; ρ – плотность жидкости; p – давление жидкости в произвольной точке пространства (плоскости – для двумерного случая); ν – кинематическая вязкость жидкости.

Перепишем (3) для двумерного случая, а (4) для x -компоненты вектора скорости:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (6)$$

Для y -компоненты уравнение (6) выглядит аналогично.

Подставив (6) для обеих x и y компонент скорости в (1) (продифференцировав по y и x соответственно) с учетом (5), получим уравнение Гельмгольца [4]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + v_x \frac{\partial \omega}{\partial x} + v_y \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

Подставив (2) в (1), получим уравнение Пуассона [5]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega. \quad (8)$$

Уравнения (2), (7) и (8) вместе с начальными и граничными условиями образуют полную систему, в которой нет давления, при этом условие несжимаемости жидкости (3) выполняется автоматически, а для нахождения решения необходимо решить только два уравнения – Гельмгольца и Пуассона.

В качестве начальных условий для полей скоростей, вихря и функции тока примем

$$v_x = v_w, v_y = 0, \omega = 0,$$

$$\psi(y) = \int v_w dy, \psi(0) = 0,$$

где v_w – заданная скорость набегающего потока жидкости.

Зададим граничные условия. На границах расчетной сетки для вихря применим граничное условие первого рода, для функции тока – второго рода (условие Неймана):

$$\omega = 0,$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = v_x \text{ – на левой и правой границах,}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -v_y \text{ – на верхней и нижней границах.}$$

На поверхности непроницаемой стенки применим обобщенное условие Томсона [2]:

$$\omega_b = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial \mathbf{n}^2}, \quad (9)$$

где ω_b – вихрь на полностью непроницаемой стенке; $\mathbf{n}$ – вектор нормали к поверхности, направленный от сетной конструкции.

С учетом сплошности сетной поверхности F_O перепишем граничное условие (9):

$$\omega = F_O \omega_b + \omega_w,$$

где ω_w – вихрь в жидкости, вычисленный согласно (7).

На рис. 3 приведен алгоритм решения для одного временного шага τ .

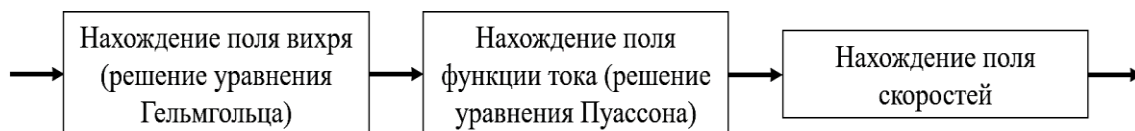


Рис. 3. Алгоритм решения ω – ψ методом
Fig. 3. The algorithm for solving the ω – ψ method

Нахождение поля вихря осуществляется по аналогии с решением уравнения Навье-Стокса методом «давление – скорость». При использовании неявной конечно-разностной аппроксимации на регулярной сетке с шагом h по осям Ox и Oy и метода расщепления каждый временной шаг k дробится на два. Уравнение (7) расщепляется на два, первое уравнение – вдоль оси Ox , второе – вдоль оси Oy :

$$\frac{\omega^{(k+\frac{1}{2})} - \omega^{(k)}}{\tau} = -v_x \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^{(k+\frac{1}{2})} + \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^{(k+\frac{1}{2})}, \quad (10)$$

$$\frac{\omega^{(k+1)} - \omega^{(k+\frac{1}{2})}}{\tau} = -v_y \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^{(k+1)} + v \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^{(k+1)}, \quad (11)$$

$$v_x \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^{(k+\frac{1}{2})} = \frac{(v_{xi,j} + |v_{xi,j}|)(\omega_{i,j}^{(k+\frac{1}{2})} - \omega_{i-1,j}^{(k+\frac{1}{2})}) + (v_{xi,j} - |v_{xi,j}|)(\omega_{i+1,j}^{(k+\frac{1}{2})} - \omega_{i,j}^{(k+\frac{1}{2})})}{2h}, \quad (12)$$

$$v_y \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^{(k+1)} = \frac{(v_{yi,j} + |v_{yi,j}|)(\omega_{i,j}^{(k+1)} - \omega_{i,j-1}^{(k+1)}) + (v_{yi,j} - |v_{yi,j}|)(\omega_{i,j+1}^{(k+1)} - \omega_{i,j}^{(k+1)})}{2h}, \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^{(k+\frac{1}{2})} = \frac{\omega_{i-1,j}^{(k+\frac{1}{2})} - 2\omega_{i,j}^{(k+\frac{1}{2})} + \omega_{i+1,j}^{(k+\frac{1}{2})}}{h^2},$$

$$\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^{(k+1)} = \frac{\omega_{i,j-1}^{(k+1)} - 2\omega_{i,j}^{(k+1)} + \omega_{i,j+1}^{(k+1)}}{h^2},$$

где k – номер шага. В угловых скобках обозначены индексы дробных шагов.

Уравнение (10) разрешается относительно неизвестной ω на дробном шаге $k + 1/2$, а уравнение (11) – на дробном шаге $k + 1$. С целью повышения устойчивости метода в (12) и (13) применяются противоточные производные [3, 5].

Нахождение поля скоростей из поля функции тока выполняется по конечно-разностной схеме:

$$v_{xi,j} = \frac{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}}{2h}, \quad v_{yi,j} = \frac{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j-1}}{2h}.$$

Уравнения (10) и (11) являются линейными. Для нахождения поля вихря на каждом временном дробном шаге необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Приведем (9) и (10) к матричному виду:

$$\mathbf{A}\omega = \mathbf{d},$$

где $\mathbf{A}$ – матрица коэффициентов при векторе-столбце неизвестных ω ; $\mathbf{d}$ – вектор-столбец правых частей уравнения.

Поскольку матрица $\mathbf{A}$ является трехдиагональной, полученные СЛАУ можно решить методом прогонки [3, 5]. На прямом проходе для $i = [1...n]$ получаем:

$$\delta_i = -a_{i,i+1} / (a_{i,i} + a_{i,i-1}\delta_{i-1}), \quad \beta_i = (d_i - a_{i,i-1}\beta_{i-1}) / (a_{i,i} + a_{i,i-1}\delta_{i-1}),$$

где β и δ – временные переменные; $\beta_0 = 0$, $\delta_0 = 0$, $a_{1,i-1} = 0$, $a_{n,i+1} = 0$; n – количество узлов расчетной сетки вдоль разрешаемого направления (Ox – для (9), Oy – для (10)).

На обратном проходе для $i = [n...1]$ получаем:

$$\omega_i = \delta_i \omega_{i+1} + \beta_i$$

при $\omega_{n+1} = 0$.

Для нахождения поля вихря (рис. 3) необходимо решить уравнение Пуассона (8). Для этого применяют численные методы Ричардсона или Либмана с верхней релаксацией [6]. Метод Ричардсона, в отличие от метода Либмана, требует наличия промежуточного массива данных и легко распараллеливается. Метод Либмана требует обновления промежуточных значений искомой величины сразу после ее вычисления на каждом шаге последовательного приближения, но при последовательных вычислениях имеет более высокую скорость сходимости. В связи с этим в гетерогенных вычислительных системах [7] мы используем оба метода, первый – для вычислений на графическом процессоре (GPU), второй – на центральном процессоре (CPU). Запишем конечно-разностные схемы для метода Ричардсона:

$$\psi_{i,j}^{(k+1)} = \frac{1}{4} \left(\psi_{i+1,j}^{(k)} + \psi_{i-1,j}^{(k)} + \psi_{i,j+1}^{(k)} + \psi_{i,j-1}^{(k)} + h^2 \omega_{i,j} \right)$$

и метода Либмана с верхней релаксацией:

$$\psi_{i,j}^{(k+1)} = (1-\theta) \psi_{i,j}^{(k)} + \frac{\theta}{4} \left(\psi_{i+1,j}^{(k)} + \psi_{i-1,j}^{(k+1)} + \psi_{i,j+1}^{(k)} + \psi_{i,j-1}^{(k+1)} + h^2 \omega_{i,j} \right),$$

где θ – константа, влияющая на скорость схождения алгоритма.

Хорошие результаты получаются при

$$\theta = \frac{1}{2\xi^2} \left(1 - \sqrt{1 - \xi^2} \right), \quad \xi = \frac{1}{2} \left(\cos \frac{\pi}{n_x} + \cos \frac{\pi}{n_y} \right),$$

где n_x, n_y – размеры расчетной сетки; ξ – промежуточная величина.

Запишем условие завершения итерационного процесса при решении уравнения Пуассона:

$$\max \left| \psi_{i,j}^{(k+1)} - \psi_{i,j}^{(k)} \right| < \varepsilon_\psi,$$

где ε_ψ – заданная максимальная погрешность функции тока.

Вычисление условия завершения требует последовательных обращений к переменной, содержащей текущую погрешность. Для вычислений на CPU с этим сложностей не возникает. Для вычислений на GPU, когда множество вычислительных блоков работают по одному алгоритму, необходимо предотвращать одновременное обновление переменной с текущей погрешностью. Для этой цели можно применять алгоритм параллельной редукции с использованием разделяемой памяти. Суть его заключается в разбиении всей расчетной сетки на блоки, которые в свою очередь разбиваются на вложенные блоки. Поиск максимума осуществляется в каждом блоке последовательно, а блоки обрабатываются параллельно во времени. В полученном дереве поиска уровни вложения обрабатываются последовательно от листьев к корню. Для каждого вложенного блока заводится своя переменная текущей погрешности. Ее значение учитывается следующим уровнем. Процесс повторяется до достижения корня дерева.

При решении уравнения Пуассона на GPU можно использовать упрощенный алгоритм, не требующий вычисления максимума погрешности. Суть его заключается в создании внешнего цикла с заданным количеством итераций. Недостатком алгоритма является отсутствие контроля погрешности. Для уменьшения погрешности необходимо увеличивать количество циклов, что в свою очередь может приводить к избыточности вычислений.

Для нахождения сил, действующих на сетную конструкцию, необходимо вычислять давление жидкости вблизи сетной конструкции, но ω – ψ метод в своих итерациях не вычисляет поле давлений. Поле давлений p находится из поля функции тока путем решения уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 2 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right)^2 \right).$$

Это требует дополнительных вычислительных затрат и делает нахождение поля давлений на каждом временном шаге нецелесообразным для решения поставленной задачи. Его вычисление возможно во внешних, более редких циклах либо однократно для установившегося режима.

Решение уравнения Пуассона для нахождения поля давлений выполняется аналогично решению уравнения (8).

На рис. 4– 8 приведены поля скоростей, давлений, вихря, полученные разработанной по описанному методу программой для ЭВМ.

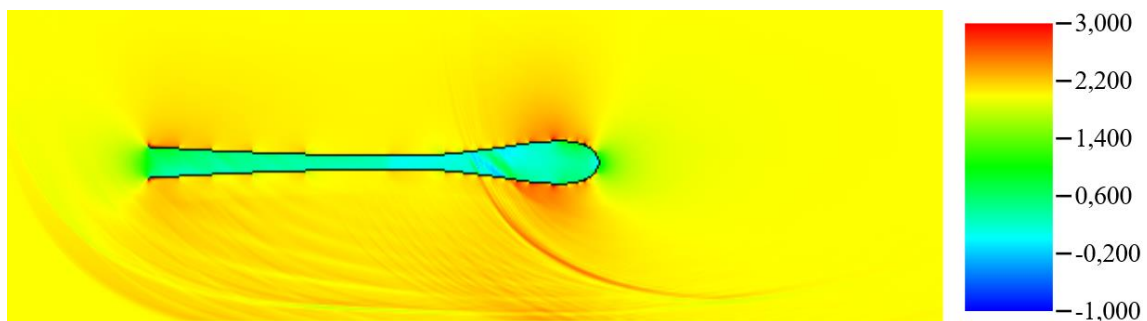


Рис. 4. Поле скоростей v_x
 Fig. 4. v_x velocity field

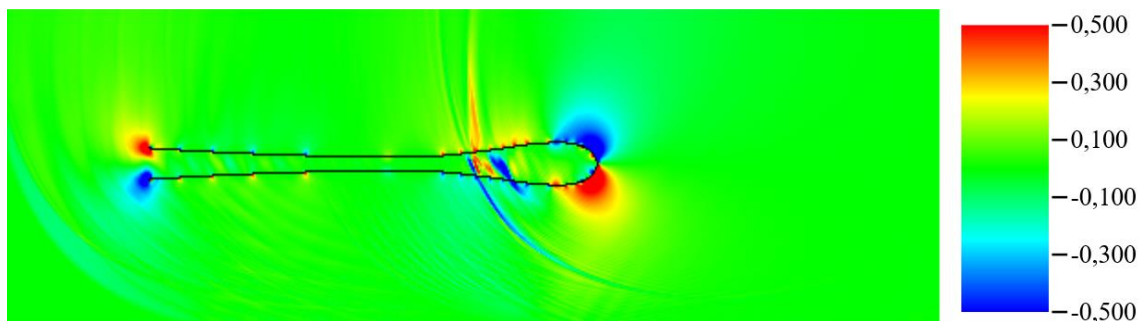


Рис. 5. Поле скоростей v_y
 Fig. 5. v_y velocity field

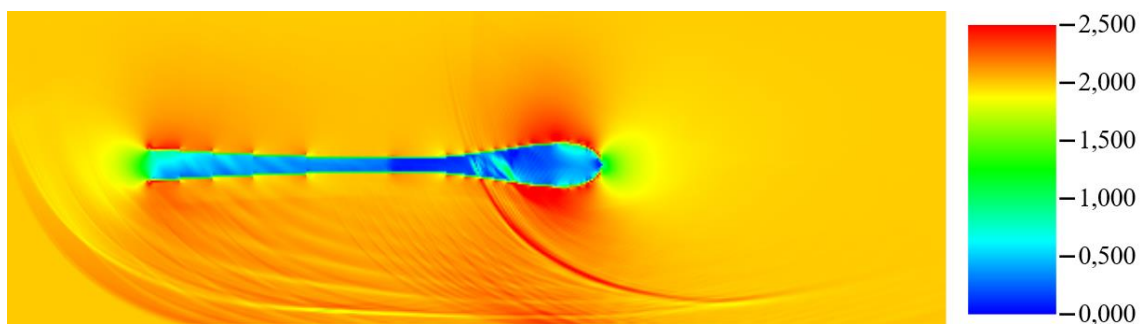


Рис. 6. Поле модуля скоростей
Fig. 6. Velocity modulus field

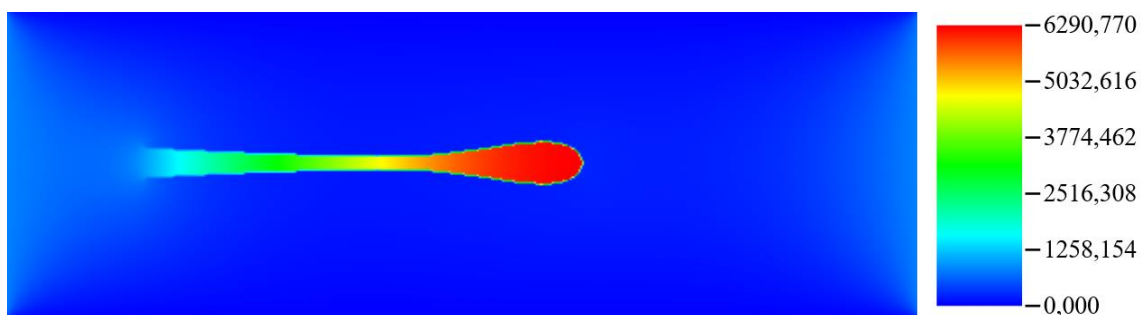


Рис. 7. Поле давлений
Fig. 7. Pressure field

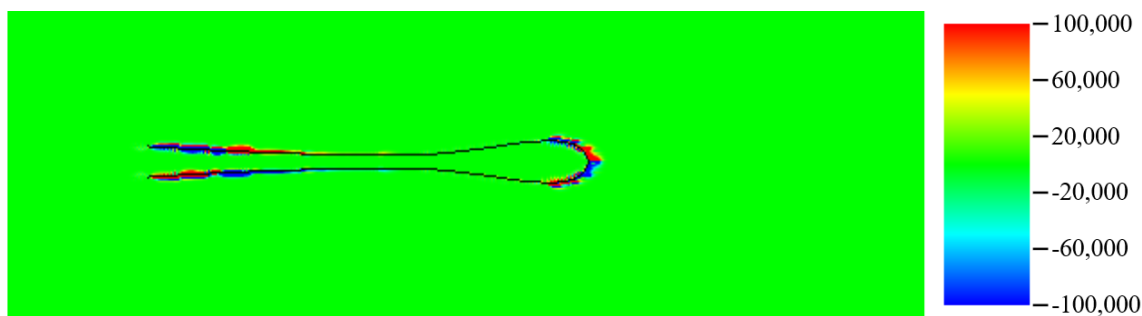


Рис. 8. Поле вихря
Fig. 8. Vortex field

На рис. 9 показаны линии тока.

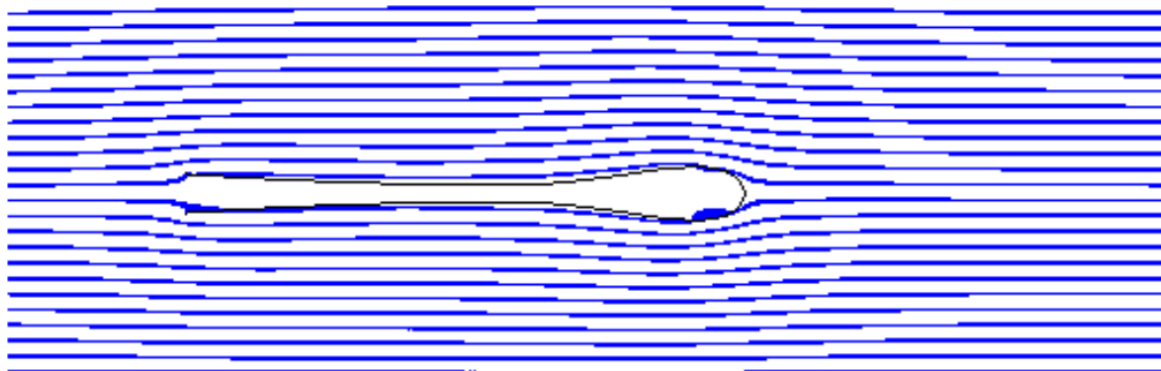


Рис. 9. Линии тока
Fig. 9. Current lines

Вектор силы гидродинамического сопротивления $\mathbf{R}$ сетной конструкции находится по формуле:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_p + \mathbf{R}_f, \quad \mathbf{R}_p = \iint_S F_o p \mathbf{n} ds, \quad \mathbf{R}_f = \iint_S F_o \rho \mathbf{v} \frac{d\mathbf{v}_s}{dn} ds,$$

где $\mathbf{R}_p$ – сила давления жидкости на конструкцию; $\mathbf{R}_f$ – сила трения жидкости о конструкцию; S – поверхность сетной конструкции; $\mathbf{n}$ – вектор нормали к элементарной поверхности ds , направленный от конструкции; $\mathbf{v}_s$ – проекция вектора скорости на плоскость, параллельную элементарной поверхности ds .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По предложенной математической модели авторами была разработана программа для ЭВМ «Гидродинамический расчет сетных инженерных конструкций» (рис. 10), моделирующая поведение осесимметричной сетной инженерной конструкции, находящейся в потоке жидкости с заданными плотностью, вязкостью и скоростью.

При расчете применяется метод «вихрь – функция тока». В процессе моделирования отображаются поля скоростей, давлений, вихря и функции тока, а также их числовые значения. Производится расчет силы гидродинамического сопротивления.

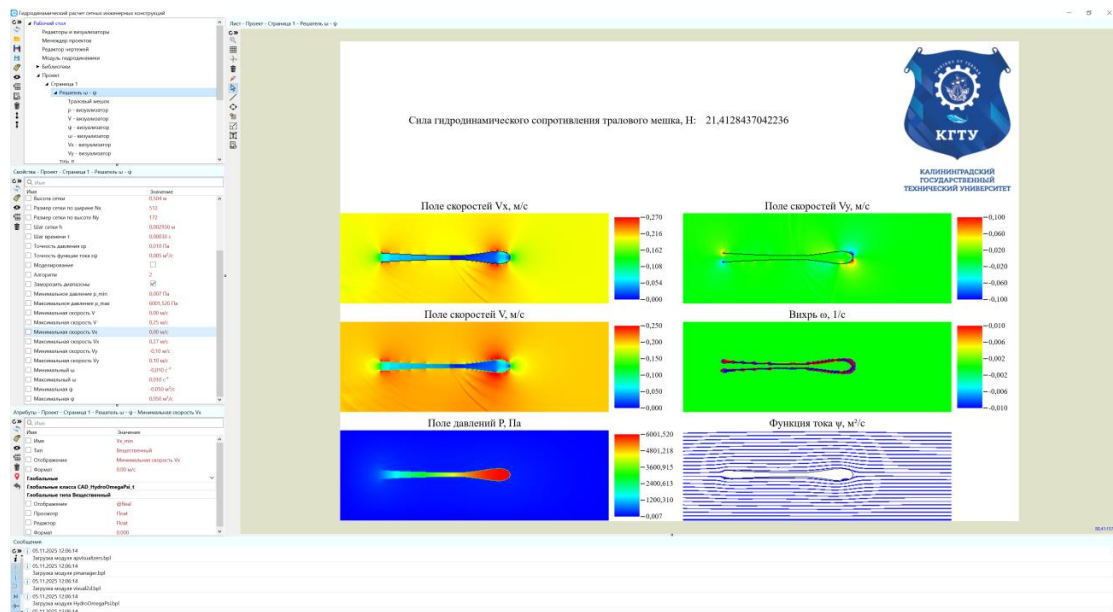


Рис. 10. Программа для ЭВМ «Гидродинамический расчет сетных инженерных конструкций»

Fig. 10. Computer program "Hydrodynamic calculation of grid engineering structures"

Для численного эксперимента был взят траловый мешок со следующими конструктивными характеристиками: количество ячеек по длине $m = 20$; количество ячеек по окружности $n = 10$; диаметр веревки $d = 2$ мм; коэффициент утолщения узла $k_y = 3$. Параметры внешнего воздействия: $v = 2$ м/с; $\rho = 1030$ кг/м³; $\nu = 1,004$ мм²/с. По входным параметрам при помощи разработанной программы для ЭВМ

«Гидродинамика тралового мешка» (рис. 11) был получен профиль сетной поверхности под действием гидродинамических сил, вычисленных по эвристическим зависимостям (14)–(18) для сети [1].

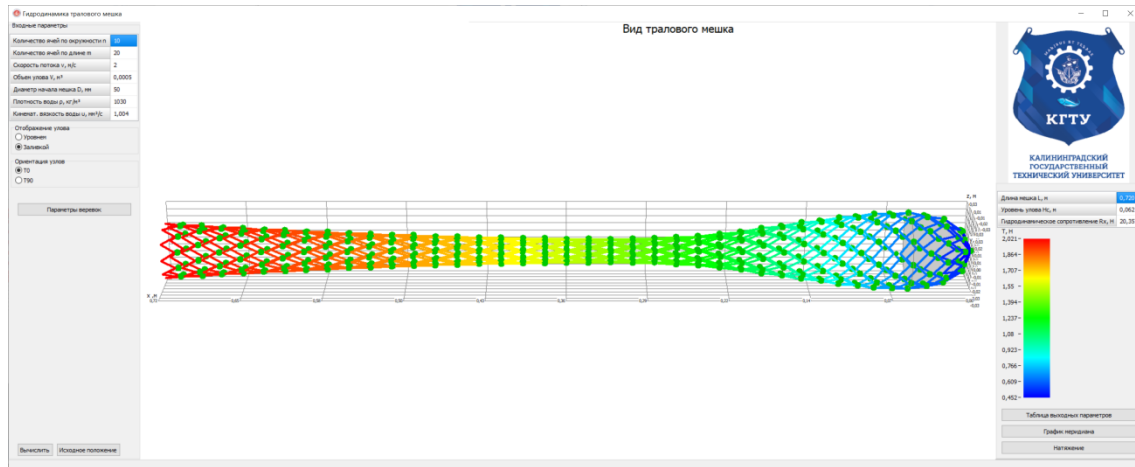


Рис. 11. Программа для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка»
Fig. 11. Computer program "Hydrodynamics of a codend"

$$R_x = c_x \frac{\rho v^2}{2} F_H, \quad R_y = c_y \frac{\rho v^2}{2} F_H, \quad (14)$$

$$c_x = c_0 + (c_{90} - c_0) |\Delta y / l|, \quad c_y = c_{90} \Delta x \Delta y / l^2, \quad (15)$$

$$c_0 = F_O \text{Re}^{-0.165}, \quad c_{90} = 16(2F_O / \text{Re})^{0.28}, \quad (16)$$

$$F_H = da_0 + \pi d_n^2 / 8, \quad (17)$$

$$\text{Re} = dv / \nu, \quad (18)$$

где R_x – гидродинамическая сила лобового сопротивления; R_y – гидродинамическая распорная сила; c_x , c_y – гидродинамические коэффициенты для сети, расположенной под углом к потоку жидкости; c_0 – гидродинамический коэффициент для сети, расположенной параллельно потоку; c_{90} – гидродинамический коэффициент для сети, расположенной перпендикулярно потоку; l – расстояние между узлами сети в плоскости Oxy ; Δx , Δy – проекции l на оси координат; F_H – площадь сечения веревки и половины узла; Re – число Рейнольдса; u_x , u_y – посадочные коэффициенты ячеек по длине и окружности сетной конструкции соответственно; a_0 – шаг ячеек; y – радиус окружности, проходящей через узел сети.

Полученный профиль с информацией о сплошности участков тралового мешка, а также параметры внешнего воздействия были загружены в программу для ЭВМ «Гидродинамический расчет сетных инженерных конструкций». В процессе моделирования был достигнут установившийся режим и получены поля скоростей, давлений, вихря, функции тока, линии тока и сила гидродинамического сопротивления. Моделирование производилось на расчетной сетке размерами 512 на 172 узлов с шагом $h = 0,003$ м.

Значение силы гидродинамического сопротивления тралового мешка $R_x = 21,4$ Н, полученное при помощи программы для ЭВМ «Гидродинамический расчет сетных инженерных конструкций», было сопоставлено со значением $R_x = 20,4$ Н, полученным при помощи программы для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка».

С учетом того, что итоговые результаты при помощи программы для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка» согласуются с таковыми при натурном эксперименте в гидроканале [8], можно сделать вывод об адекватности предложенного метода расчета осесимметричных сетных конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования можно применять при проектировании, модернизации и эксплуатации высокоэффективных рыболовных тралов, в развитии рыбопромыслового судостроения, в системах виртуальной реальности (тренажерных комплексах), дальнейших фундаментальных и прикладных научных исследованиях в области гидромеханики сетных инженерных конструкций в целом и орудий рыболовства и рыбопромысловых судов в частности.

Результаты исследования позволяют:

- рассчитывать и минимизировать лобовое сопротивление орудий лова, что напрямую ведет к снижению расхода топлива промысловыми судами;
- проектировать геометрию трала, обеспечивающую его стабильное и предсказуемое раскрытие (вертикальное и горизонтальное) в различных условиях эксплуатации;
- целенаправленно усиливать критические узлы конструкции, предотвращая их разрушение, и облегчать менее нагруженные элементы, что снижает общую массу и стоимость орудия лова;
- разрабатывать селективные модификации тралов, направленные на снижение прилова нецелевых видов гидробионтов.

Расчет силовых и пространственно-временных характеристик трала позволит:

- оптимально проектировать и размещать промысловое оборудование: подбирать мощность и расположение траловых лебедок, определять конструкцию кормового слипа, усиление элементов корпуса в зонах высоких нагрузок;
- проводить комплексный анализ «судно-трал» как единой системы, что необходимо для достижения максимальной энергоэффективности и промысловой производительности судна;
- обеспечивать безопасность эксплуатации, рассчитывая реальные нагрузки на такелаж и конструкцию судна при работе с тяжелыми орудиями лова.

Таким образом, исследование обеспечивает научно-технический задел для инновационного развития всего рыбопромыслового комплекса – от проектирования конкретных орудий лова до создания высокотехнологичных судов и подготовки кадров.

Список источников

1. Недоступ, А. А. Методы расчета сетных пассивных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства: моногр. / А. А. Недоступ. – Калининградский гос. тех. ун-т. – Калининград, 2010. – 281 с. – ISBN 978-5-94826-291-8.
2. Ferziger, J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Perić, R. L. Street. – 4th ed. – Springer, 2020. – 596 p.
3. Филатов, Е. Ю. Численное моделирование в гидродинамике: современные методы и приложения / Е. Ю. Филатов, Ф. Н. Ясинский. Труды Академии наук. Серия: физико-технические проблемы энергетики. – 2008. – № 4. – С. 15–28.
4. Strang, G. Introduction to Applied Mathematics / G. Strang, G. J. Fix. – Vol. 2. – Wellesley-Cambridge Press, 1986. – 758 p.
5. Тихонов, А. Н. Однородные разностные схемы / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1961. – Т. 1, № 1. – С. 5–63.
6. Golub, G. H. Matrix Computations / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – 4th ed. – JHU Press, 2013. – 784 p. – ISBN 0-8018-5413-X.
7. Kirk, D. B. Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach / D. B. Kirk, W. W. Hwu. – 3rd ed. – Morgan Kaufmann, 2016. – 550 p.
8. Коновалова, К. В. Оценка сопротивления траловых мешков с делью Т0, Т90 / К. В. Коновалова. – DOI: 10.24143/2073-5529-2025-1-102-111 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2025. – № 1. – С. 102–111.

References

1. Nedostup, A. A. Methods for calculating netting passive gears for inland and coastal fisheries: monographs / A. A. Nedostup. – Kaliningrad State Technical University. – Kaliningrad, 2010. – 281 p. – ISBN 978-5-94826-291-8.
2. Ferziger, J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Perić, R. L. Street. – 4th ed. – Springer, 2020. – 596 p.
3. Filatov, E. Y. Numerical modeling in hydrodynamics: modern methods and applications / E. Y. Filatov, F. N. Yasinsky // Proceedings of the Academy of Sciences. Series: physical and technical problems of energetics. – 2008. – № 4. – P. 15–28.
4. Strang, G. Introduction to Applied Mathematics / G. Strang, G. J. Fix. – Vol. 2. – Wellesley-Cambridge Press, 1986. – 758 p.
5. Tikhonov, A. N. Homogeneous difference schemes / A. N. Tikhonov, A. A. Samarsky // Journal of computational mathematics and mathematical physics. – 1961. – Vol. 1, № 1. – P. 5–63.
6. Golub, G. H. Matrix Computations / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – 4th ed. – JHU Press, 2013. – 784 p. – ISBN 0-8018-5413-X.
7. Kirk, D. B. Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach / D. B. Kirk, W. W. Hwu. – 3rd ed. – Morgan Kaufmann, 2016. – 550 p.
8. Konovalova, K. V. Assessment of resistance of trawl codends with netting T0, T90 / K. V. Konovalova. – DOI: 10.24143/2073-5529-2025-1-102-111 // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. – 2025. – № 1. – P. 102–111.

Информация об авторах

А. О. Ражев – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
А. А. Недоступ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства
П. В. Насенков – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленного рыболовства
К. В. Коновалова – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры промышленного рыболовства

Information about the authors

A.O. Razhev – Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow
A. A. Nedostup – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Commercial Fisheries
P. V. Nasenkov – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Commercial Fisheries
K. V. Konovalova – Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of the Department of Commercial Fisheries

Вклад авторов

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

Contribution of the authors

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

Статья поступила в редакцию 24.11.2025; одобрена после рецензирования 07.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 24.11.2025; approved after reviewing 07.12.2025; accepted for publication 15.12.2025.

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

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

Редактор С. В. Супрунова

Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
Лицензия № 05609 от 14.08.2001
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «КГТУ»
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
Подписано в печать 30.01.2026. Выход в свет 01.02.2026. Формат 60 x 88 (1/8).
Печ. л. 15,6. Уч.-изд. л. 10. Тираж 1000 экз. Заказ № 1.