САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И ДИЗАЙНА

ВЫСШАЯ ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ

ТЭ Технология и Энергетика

03 (03) 2026

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

THE SCIENTIFIC JOURNAL

Издается с 2026 года | Published since 2026

TECHNOLOGY *and* ENERGY

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026

Технология и энергетика
Научный журнал
4 номера в год
03 (03) 2026

ISSN 3033-7852

Учредитель
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Издающая организация
Высшая школа технологии и энергетики (ВШТЭ)

Главный редактор
Луканин Павел Владимирович, доктор технических наук, профессор,
первый проректор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (СПбГУПТД), директор Высшей школы технологии и энергетики (ВШТЭ)

Заместители главного редактора
Куров Виктор Сергеевич
Федорова Олеся Вячеславовна
Соколова Виктория Александровна

Выпускающий редактор
Еремина Мария Александровна

Корректор Чернышёва А. А.
Дизайн Бендерская А. О.
Компьютерная верстка Троицкая С. В.
Корректор английского текста Смит Р. А.

Журнал «Технология и энергетика» издается с 2026 года. Журнал принимает для публикации научные статьи по специальностям:

4.3.4 Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины;
2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий;
2.6.10 Технология органических веществ;
2.4.1 Теоретическая и прикладная электротехника;
2.4.2 Электротехнические комплексы и системы;
2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника.

Адрес редакции: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4.

Графические и фотоматериалы предоставлены авторами статей. Редакция не несёт ответственности за авторство иллюстративных материалов.

Отпечатано в ИПЦ СПбГУПТД, 191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, 26

Дата выхода в свет 30.09.2026. Формат 62×94 1/8. Бумага кн.-журн. Усл.-печ. л. 17,7.

Цена: Бесплатно.

12+

Тираж 60 экз. Заказ № 272

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026



УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ, КОЛЛЕГИ, ДРУЗЬЯ!

Благодарю вас за интерес к нашему журналу — ваше внимание помогает делать его содержательнее.

Главная тема третьего номера — экологический подход в науке. В традиционной рубрике журнала «Экологический инжиниринг» представлены избранные материалы Летней школы БИОС 2026, прошедшей в июле в Ленинградской области. География участников широкая — пять регионов России: Санкт-Петербург, Ленинградская, Воронежская, Новгородская области и Республика Мордовия.

Экологический вектор этого номера — не дань моде, а необходимое условие развития современной инженерии. Отмечу, что и наш коллектив внес вклад в это направление: на страницах издания представлена работа, посвящённая поиску новых источников сырья для тепловой энергии на основе отходов производства биоразлагаемой упаковки.

В разделе «Научный дебют» опубликованы лучшие работы студентов и магистрантов — участников IX Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и автоматизация в современном обществе», состоявшейся 6 мая 2026 года в Санкт-Петербурге на базе ВШТЭ СПбГУПТД. География авторов не ограничивается Россией: представители Белорусского национального технического университета предложили решение по микротурбинной утилизации энергии падающей сточной воды в перепадных колодцах без изменения гидравлики сети.

Уважаемые коллеги! Приглашаю вас публиковать свои статьи в нашем журнале — мы открыты для исследований, посвящённых экологии, энергетике, автоматизации и смежным направлениям. Делитесь своими идеями и результатами, и ваш голос будет услышан научным сообществом.

Желаю вам интересного чтения и новых научных открытий!

Главный редактор,
директор Высшей школы технологии и энергетики
Павел Владимирович Луканин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аким Эдуард Львович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозы и композиционных материалов Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна (ВШТЭ СПбГУПТД)

Баранов Игорь Владимирович
доктор технических наук, профессор, директор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Национального исследовательского университета ИТМО

Беззубцева Марина Михайловна
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергообеспечения предприятий и электротехнологий Санкт-Петербургского государственного аграрного университета

Бушуев Евгений Николаевич
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники Ивановского государственного энергетического университета имени В. И. Ленина

Винничек Любовь Борисовна
доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой организации аграрного производства и менеджмента Санкт-Петербургского государственного аграрного университета

Витковская Раиса Федоровна
доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института прикладной химии и экологии, профессор кафедры инженерной химии и промышленной экологии Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

Волков Владимир Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой энергообеспечения предприятий и электротехнологий Санкт-Петербургского государственного аграрного университета

Гарькавая Виктория Федоровна
доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики, учета и анализа хозяйственной деятельности Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова

Дягилева Алла Борисовна
доктор химических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ВШТЭ СПбГУПТД

Зильберглейт Марк Аронович
доктор химических наук, профессор кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии Белорусского государственного технологического университета, Республика Беларусь, г. Минск

Колибаба Ольга Борисовна
кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения Ивановского государственного энергетического университета имени В. И. Ленина

Кругликов Петр Александрович
доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Научно-производственного объединения по исследованию и проектированию энергетического оборудования имени И. И. Ползунова (НПО ЦКТИ)

Кряжев Анатолий Максимович
доктор технических наук, старший научный сотрудник, зам. генерального директора ООО «Техсервис», г. Новодвинск Архангельской области

Куколев Максим Игоревич
доктор технических наук, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Куров Виктор Сергеевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры процессов и аппаратов химической технологии, заместитель директора ВШТЭ СПбГУПТД

Луканин Павел Владимирович
доктор технических наук, профессор, директор ВШТЭ, первый проректор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

Лысенко Максим Валентинович
доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики, учета и анализа хозяйственной деятельности Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова

Медведев Геннадий Валериевич
доктор технических наук, профессор, директор Энергетического института Санкт-Петербургского государственного аграрного университета

Мидуков Николай Петрович
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий ВШТЭ СПбГУПТД

Морозов Андрей Евгеньевич
доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры лесоводства Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ), г. Екатеринбург

Сафин Рушан Гареевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ), г. Казань

Смирнова Екатерина Григорьевна
доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой технологии бумаги и картона ВШТЭ СПбГУПТД

Трухтенкова Анна Леонидовна
кандидат химических наук, старший научный сотрудник, главный технолог ООО «Отрадненская бумажно-картонная фабрика», доцент кафедры технологии химической переработки биомассы дерева Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова

Францкевич Виталий Станиславович
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств Белорусского государственного технологического университета, Республика Беларусь, г. Минск

Яковлев Павел Викторович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплотехники и теплоэнергетики Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II

Яцун Ирина Валерьевна
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механической обработки древесины Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ), г. Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

ЭНЕРГЕТИКА

3 От главного редактора

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

8 **Чорноус А. С., Кейзер П. М., Смирнова Е. Г.**
Способ получения волокнистого полуфабриката из лузги подсолнечника

14 **Бахтин А. В., Кейзер П. В., Соколова В. А.**
Сравнительный анализ способов изготовления образцов для испытания механической прочности гофрокартона

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

25 **Мидуков Н. П., Худницкий Д. В., Портнягина Е. А.**
Разработка двухкомпонентной заглушки с возможностью герметизации в условиях вибрации

32 **Козин Ю. В., Беренгартен М. Г.**
Масштабный переход комбинированного контактного устройства для процесса жидкостной экстракции

37 **Гончаров Н. А., Кушнеров А. И.**
Разработка системы управления для линии обезжиривания и промывки

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ

44 **Антонов И. В., Образцова А. А.**
Разработка структуры информационной системы управления климатическими рисками для территориально-производственных комплексов

53 **Алефирова А. А., Антонов И. В., Адылова А. Ж.**
Выявление взаимосвязи содержания биогенных элементов с трофическим статусом водохранилища Сестрорецкий Разлив

60 **Шишкин И. А., Романова Л. В., Барххуев Х. О.**
Экспериментальная оценка тепловой нагрузки берегового выпуска сточных вод методом инфракрасной термографии

71 **Шишкин И. А., Кушнеров А. И., Барххуев Х. О., Сашнина И. А.**
Модернизация программно-технического комплекса автоматизированного гидробиологического мониторинга водных объектов на основе компьютерного зрения

80 **Кадровая поддержка производства: Институт «Крона» и партнеры ВШТЭ**

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

85 **Рыжиков В. А., Луканин П. В., Федорова О. В., Аким Э. Л.**
Основные тенденции использования отходов производства биоразлагаемой упаковки в формировании сырья для получения тепловой энергии

НАУЧНЫЙ ДЕБЮТ

93 **Фомина В. А., Куделко В. В., Пантелей Н. В.**
Микротурбинная утилизация энергии падающей сточной воды в перепадных колодцах без изменения гидравлики сети

99 **Гатиятова С. Э., Черкасов А. С.**
Перспективы использования водородных технологий в энергетических установках

105 **Рожков А. И., Никифоров Д. К.**
Сравнительный анализ пассивных сглаживающих электрических фильтров и их моделирование с использованием Qucs-S для блоков питания

111 **Газизова Р. Н., Низамова А. Ш.**
Методы анализа топлива, полученного при подземной газификации угля

117 **Петров С. А., Ершов К. К.**
Обзор технологий сбора энергии с дорожных покрытий

CONTENT

3 By Chief Editor

MODERN TECHNOLOGIES OF WOOD PROCESSING AND USE

8 **Chornous A. S., Keizer P. M., Smirnova E. G.**
Method for producing a fibrous semi-finished product from sunflower husk

14 **Bakhtin A. V., Keizer P. M., Sokolova V. A.**
Comparative analysis of sample preparation methods for mechanical strength testing of corrugated board

PROCESSES AND APPARATUSES OF CHEMICAL TECHNOLOGIES

25 **Midukov N. P., Khudnitsky D. V., Portnyagina E. A.**
Development of a two-component plug with sealing capability under vibration

32 **Kozin Yu. V., Berengarten M. G.**
Scale-up of a combined contact device for liquid extraction

37 **Goncharov N. A., Kushnerov A. I.**
Development of a control system for a degreasing and rinsing production line

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

44 **Antonov I. V., Obraztsova A. A.**
Development of the structure of an information system for climate risk management for territorial production complexes

53 **Alefirova A. A., Antonov I. V., Adylova A. Zh.**
Relationship between biogenic element content and trophic status of the Sestroretsky Razliv Reservoir

60 **Shishkin I. A., Romanova L. V., Barkhhuev Kh. O.**
Experimental assessment of thermal load from a shore wastewater outfall by infrared thermography

71 **Shishkin I. A., Kushnerov A. I., Barkhhuev Kh. O., Sashnina I. A.**
Modernization of the software and hardware complex for automated hydrobiological monitoring of water bodies based on computer vision

80 **Production HR support “Krona” Institute and HSTE partners**

HEAT POWER ENGINEERING AND HEAT ENGINEERING

85 **Ryzhikov V. A., Lukanin P. V., Fedorova O. V., Akim E. L.**
Key trends in utilizing of biodegradable packaging production waste as a feedstock for heat energy

SCIENTIFIC DEBUT

93 **Fomina V. A., Kudelko V. V., Panteley N. V.**
Microturbine-based energy recovery from falling wastewater in drop wells without altering network hydraulics

99 **Gatiyatova S. E., Cherkasov A. S.**
Hydrogen technologies in power plants: prospects and applications

105 **Rozhkov A. I., Nikiforov D. K.**
Comparative analysis of passive smoothing filters and their simulation using Qucs-S for power supplies

111 **Gazizova R. N., Nizamova A. Sh.**
Methods for analysis of fuel produced by underground coal gasification

117 **Petrov S. A., Ershov K. K.**
A review of technologies for harvesting energy from road pavements

TECHNOLOGY

ENERGY

Оригинальное практическое исследование
УДК 676.168
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_8–13

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛОКНИСТОГО ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА

Артем Сергеевич Чорноус, Павел Матвеевич Кейзер, Екатерина Григорьевна Смирнова

Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Чорноус А. С., Кейзер П. М., Смирнова Е. Г., 2026

Автор-корреспондент: А. С. Чорноус, e-mail: artyom549@yandex. ru

АННОТАЦИЯ

В работе исследована возможность получения волокнистого полуфабриката из лузги подсолнечника методом сульфитно-щелочной варки для использования в композиции бумаги для гофрирования. В качестве сырья применялась лузга подсолнечника урожая 2022 года (Краснодарский край) со следующим составом: целлюлоза (Кюшнера) — 63%, лигнин — 28,1%, зольность — 8%. Варки проводились в лабораторном автоклаве при температуре 165 °С, продолжительностью 5 часов, в гидромодуле 1/12 и трёх уровнях активной щелочи (12, 14 и 18% в пересчёте на Na_2O) при двух соотношениях гидроксида натрия к сульфиту натрия (30/70 и 50/50). Установлено, что с увеличением количества активной щелочи снижаются как выход полуфабриката, так и число Каппа. Наилучшие результаты по сохранению углеводов достигнуты при соотношении $NaOH/Na_2SO_3$ 30/70: число Каппа снижается быстрее выхода, что свидетельствует о меньшей деградации углеводов. Из полученных полуфабрикатов изготовлены лабораторные образцы бумаги массой 125 г/м² в композиции с сульфатной небелёной хвойной целлюлозой марки НС-3; определены показатели удельного сопротивления разрыву и сопротивления продавливанию. Показано, что полуфабрикат, полученный при 14–18% активной щелочи и соотношении $NaOH/Na_2SO_3$ 30/70, может вводиться в композицию бумаги для гофрирования марки Б-2 в количестве до 30%, марки Б-3 — до 50%. Морфологический анализ подтвердил, что волокна лузги подсолнечника (средняя длина 0,482 мм) не могут использоваться самостоятельно, но пригодны как вспомогательный компонент в композиции с длинноволокнистыми полуфабрикатами.

Ключевые слова: лузга подсолнечника, делигнификация, целлюлоза, физико-механические свойства бумаги, волокнистый полуфабрикат, число Каппа, бумага для гофрирования

Для цитирования: Чорноус А. С., Кейзер П. М., Смирнова Е. Г. Способ получения волокнистого полуфабриката из лузги подсолнечника // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 8–13. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_8–13.

METHOD FOR PRODUCING A FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCT FROM SUNFLOWER HUSK

Artem Sergeevich Chornous, Pavel Matveevich Keizer, Ekaterina Grigorievna Smirnova

Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: A. S. Chornous, e-mail: artyom549@yandex.ru

ABSTRACT

The work investigates the possibility of obtaining a fibrous semi-finished product from sunflower husk through sulfite-alkaline pulping for utilization in the composition of corrugating paper. Sunflower husk from the 2022 harvest (Krasnodar Region) served as the raw material, having the following composition: cellulose (Kürschner) — 63%, lignin — 28.1%, ash content — 8%. Pulping was performed in a laboratory autoclave at 165 °C for 5 hours with a liquor-to-material ratio

of 1/12 and three active alkali levels (12, 14, and 18% as Na_2O), using two sodium hydroxide-to-sodium sulfite ratios (30/70 and 50/50). Both the semi-finished product yield and the Kappa number are established to decrease with an increase in active alkali. Optimal carbohydrate retention was achieved at a $NaOH/Na_2SO_3$ ratio of 30/70: the Kappa number dropped faster than the yield, indicating less carbohydrate degradation. Laboratory paper samples with a basis weight of 125 g/m² were produced from the obtained semi-finished products in a composition with unbleached sulfate softwood pulp of grade NS-3. The tensile strength and burst strength values were determined. The study shows that the semi-finished product produced at 14–18% active alkali and a $NaOH/Na_2SO_3$ ratio of 30/70 can be incorporated into corrugating paper of grade B-2 in amounts up to 30%, and into grade B-3 — up to 50%. Morphological analysis has confirmed that sunflower husk fibers (average length of 0.482 mm) cannot be employed independently but are applicable as an auxiliary component in a composition with long-fiber semi-finished product.

Keywords: sunflower husk, delignification, cellulose, physical and mechanical properties of paper, fibrous semi-finished product, Kappa number, corrugating paper

For citation: Chornous A. S., Keizer P. M. and Smirnova E. G. (2026) 'Method for producting a fibrous semi-finished product from sunflower husk', Technology and Energy, no. 3, vol. 3, pp. 8–13. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_8–13.

ВВЕДЕНИЕ

Щелочные способы варки позволяют перерабатывать широкий спектр однолетнего растительного сырья для получения волокнистых полуфабрикатов, применяемых в производстве бумаги и картона. Однако они имеют определенные недостатки. В сильнощелочной среде разлагаются углеводы в результате щелочного гидролиза, что снижает выход, кроме того, однолетние растения содержат довольно много кремнезема, и сильнощелочные варочные растворы в значительной степени растворяют его. Растворенный кремнезем создает проблемы с осаждением силиката в выпарных аппаратах и на установках каустизации. Известен щелочной метод варки с пенообразователем и хелатирующим реагентом [1, 2], а также метод с применением энзимов и высокотемпературной пероксидно-щелочной делигнификацией [3, 4].

Чтобы получить удовлетворительную целлюлозу с более высоким выходом, применяют ступенчатые варки, сочетающие щелочную и кислотную делигнификацию. Авторами [5] предложен способ получения волокнистого полуфабриката из лузги подсолнечника в растворе реагента низкой концентрации, выбранного из ряда: NaOH; HNO_3; $Na_2S_2O_4$; Na_2SO_3; Na_2CO_3, а также авторами [6] предлагается выделять целлюлозу из лузги подсолнечника щелочной обработкой и кислотной с применением азотной или перуксусной кислоты.

Получение целлюлозы из лузги подсолнечника осложняется высокой плотностью упаковки целлюлозных фибрилл и наличием на поверхности пленки меланина, что обеспечивает трудную доступность для реагентов и снижает в целом реакционную способность.

Цель работы: получение полуфабриката из лузги подсолнечника методом сульфитно-щелочной варки, исследование влияния различных режимов варки на выход волокнистого полуфабриката, исследование прочностных характеристик бумаги с добавлением волокнистого полуфабриката различного выхода для оценки возможности использования в производстве бумаги для гофрирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании волокнистый полуфабрикат из лузги подсолнечника получали методом сульфитно-щелочной варки. В качестве объекта исследования была выбрана лузга подсолнечника из Краснодарского края урожая 2022 года, следующего компонентного состава: содержание целлюлозы (Кюшнера) — 63% [7], лигнин (модификации Комарова) — 28,1% [8], зольность — 8% [9], растворимые в горячей воде вещества — 20,5% [7], растворимые в органических растворителях вещества — 1,7% [10].

Условия эксперимента были заданы следующие: время варки 5 часов (3 часа, собственно, на варку). Были заданы три уровня активной щелочи (12, 14, и 18% в пересчете на Na_2O), температура варки 165 °С и два варианта соотношения гидроксида натрия к сульфиту натрия (30/70, 50/50). Время варки составляло 5 часов. Все варки проводились в лабораторном автоклаве, использовалось 200 г. а. с. лузги, гидромодуль 1/12. В конце каждой варки материал промывали горячей водой. Оставшийся раствор отделяли ручным прессованием. Проваренный материал разделяли на волокна с использованием лабораторного рафинера. После проведения варок полученный волокнистый полуфабрикат промывался до нейтральной реакции сточных вод, и определялся его выход и число Каппа.

Для изготовления опытных образцов бумаги использовали полученные полуфабрикаты из лузги подсолнечника в различных соотношениях с сульфатной небелёной хвойной целлюлозой марки НС-3. Целлюлоза марки НС-3 размалывалась до степени помола 21 °ШР, лузга до 65 °ШР.

Для исследования физико-механических свойств бумаги была выбрана масса отливок — 125 г/м^2, которая соответствует одной из часто применяемых для производства бумаги для гофрирования в соответствии с ГОСТ 7377–85. Показатели прочности при растяжении были определены в соответствии с ГОСТ ИСО 1924-1-96. Определения сопротивления продавливанию проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 2758–2017.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, представленные в таблице, показывают, что выход высокий при высоком числе Каппа. Это указывает на значительную стойкость лузги по отношению к щелочным варочным растворам. С увеличением количества активной щелочи снижается как выход, так и число Каппа. При более низком количестве активной щелочи выход выше.

При одинаковом количестве активной щелочи, но различном соотношении гидроксид натрия/сульфит натрия выход выше при соотношении 50/50 (гидроксид натрия/сульфит натрия).

При соотношении 50/50 (гидроксид натрия/сульфит натрия) и увеличении содержания активной щелочи с 12 до 18% выход снижается быстрее, чем число Каппа, что указывает на разложение углеводов.

При соотношении 30/70 (гидроксид натрия/сульфит натрия) и увеличении содержания активной щелочи от 12 до 18% число Каппа снижается быстрее, чем выход, что является следствием сохранения углеводов. Это указывает на лучший потенциал для использования в производстве бумаги.

Чтобы оценить возможность применения полученных полуфабрикатов в производстве бумаги для гофрирования, были получены лабораторные образцы бумаги из исследуемого волокна и предварительно подготовленной целлюлозы с различным композиционным составом, массой 125 г/м^2. У полученных образцов определяли удельное сопротивление разрыву, сопротивление продавливанию. Результаты представлены на рисунках 1 и 2.

На рисунке 1 представлена зависимость снижения удельного сопротивления разрыву от содержания в композиции волокнистого полуфабриката из лузги подсолнечника. Наиболее высокий показатель удельного сопротивления разрыву наблюдается у образцов бумаги, полученных с добавлением волокнистого полуфабриката (далее — ВПФ) из лузги подсолнечника варками № 5 и № 6. В соответствии со стандартом бумага для гофрирования массой 125 г/м^2 по показателю «удельное сопротивление разрыву в машинном направлении» должна соответствовать нормам для марки Б-1: 8 кН/м, для марки Б-2: 6 кН/м, для марки Б-3: 5,5 кН/м. ВПФ, полученный варкой № 5, в композицию бумаги марки Б-2 можно добавлять до 40%, марки Б-3 — до 50%; ВПФ, полученный варкой № 6, в композицию бумаги марки Б-2 можно добавлять до 50%, марки Б-3 — до 55%.

На рисунке 2 представлена зависимость снижения сопротивления продавливанию от содержания в композиции волокнистого полуфабриката из лузги подсолнечника. С увеличением в композиции волокнистых полуфабрикатов, полученных варками № 5 и № 6, происходит равномерное понижение сопротивления продавливанию на 33% (с 350 кПа до 234 кПа). После достижения их содержания в композиции 50% происходит снижение сопротивления продавливанию на 75% (с 234 кПа до 58 кПа).

В соответствии со стандартом бумага для гофрирования массой 125 г/м^2 по показателю «абсолютное сопротивление продавливанию» должна соответствовать нормам

Таблица. Влияние активной щелочи и соотношения сульфит натрия/гидроксид натрия на выход и число Каппа
Table. The effect of active alkali and the Na_2SO_3/NaOH ratio on the yield and Kappa number

№ варки	Температура, °С	Продолжительность, час	Активная щелочь, %	Соотношение NaOH/Na_2SO_3	Выход, %	Число Каппа
1	165	5	12	50/50	68,8	68,1
2	165	5	14	50/50	64,5	65,7
3	165	5	18	50/50	58,7	62,2
4	165	5	12	30/70	66,8	64,1
5	165	5	14	30/70	62,2	58,2
6	165	5	18	30/70	56,45	47,8

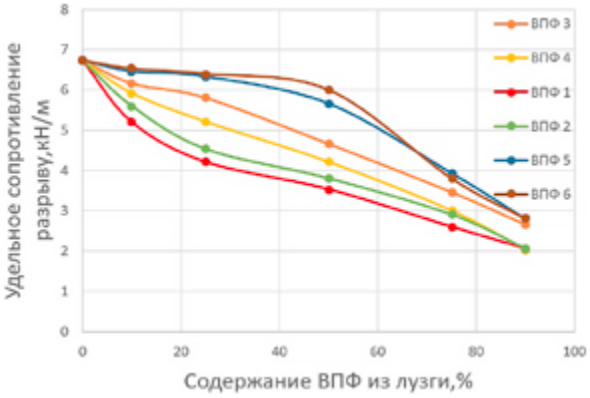


Рисунок 1. Зависимость удельного сопротивления разрыву (кН/м) от содержания в композиции волокнистого полуфабриката из лузги подсолнечника (%)

Figure 1. Tensile strength (kN/m) as a function of the fibrous semi-finished product content (%) from sunflower husk in the composition

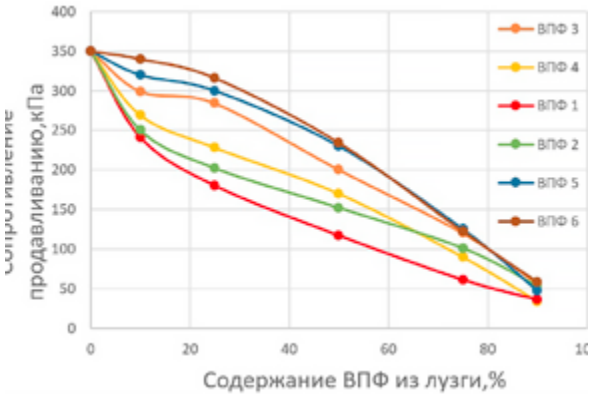


Рисунок 2. Зависимость сопротивления продавливанию (кПа) от содержания в композиции волокнистого полуфабриката из лузги подсолнечника (%)

Figure 2. Relationship between burst strength (kPa) and the content (%) of fibrous semi-finished product from sunflower husk in the composition

для марки Б-0 и Б-1: 320 кПа, для марки Б-2: 275 кПа, для марки Б-3: 175 кПа. Волокнистый полуфабрикат, полученный варкой № 3, можно добавлять в композицию бумаги марки Б-2 до 25%, марки Б-3 — до 50%; ВПФ, полученный варкой № 5, можно добавлять в композицию бумаги марки Б-2 до 30%, марки Б-3 — до 70%; ВПФ, полученный варкой № 6, можно добавлять в композицию бумаги марки Б-1 до 30%, марки Б-2 до 40%, марки Б-3 до 70%.

После получения образцов волокнистых полуфабрикатов исследовались их морфологические характеристики на анализаторе волокна «MorFi». Исследования показали, что средняя длина волокна незначительно зависит от режимов варки и составляет 0,482 мм. Анализ данных исследования фракционного состава волокна подтверждает широкий спектр длин волокна в оболочках лузги. В волокнистых полуфабрикатах много коротких волокон, фракция волокна 0,2–0,3 мм является основной в массе волокна и составляет порядка 28%, фракция волокна 0,2–0,4 мм составляет 20%, фракция волокна 0,3–0,5 мм составляет 15%, остальные фракции (от 0,5 до 1 мм) тоже присутствуют и распределены равномерно. Средняя длина анализируемого волокна (0,482 мм) в 2 раза меньше средней длины волокна лиственной целлюлозы (0,8–1,6 мм). Более подробное исследование морфологического состава полученных волокнистых полуфабрикатов приведено в работе [11].

Из этого можно сделать вывод, что волокнистые полуфабрикаты из лузги подсолнечника не могут использоваться самостоятельно для формирования листа бумаги, но могут быть использованы в композиции с длинноволокнистыми полуфабрикатами.

Результаты показали, что применение 14–18% активной щелочи при продолжительности варки 3 часа при температуре 165 °С и соотношении сульфита натрия/гидроксида натрия 70:30 позволит из лузги подсолнечника получить целлюлозу, пригодную к использованию в качестве вспомогательного полуфабриката при производстве бумаги для гофрирования. Такие полуфабрикаты можно вводить в бумажную массу в количестве до 30% при производстве бумаги для гофрирования марки Б-2 и до 50% при производстве бумаги для гофрирования марки Б-3, что особенно актуально в условиях дефицита макулатурного сырья.

Список литературы

1. Чжао Иминь. Способ получения технического волокна из кожуры семян подсолнечника: пат. 1718915 Китай / Чжао Иминь. № 200510016940; заявл. 05.07.2005; опубл. 11.01.2006.
2. Чжао Иминь. Способ производства целлюлозы из кожуры семян подсолнечника: пат. 1311131 Китай / Чжао Иминь. № 200510016940; заявл. 05.07.2005; опубл. 18.04.2007.
3. Способ получения целлюлозы из шелухи семян подсолнечника: пат. 102031713 Китай / Пан Фэнцзянь, Чжан Чжихун, Цао Цигуй [и др.]; заявитель Шаньдун Хэлун Ко., Лтд. — № 201010501628; заявл. 02.10.2010; опубл. 27.04.2011.
4. Способ получения неотбеленной целлюлозы из скорлупы семян подсолнечника: пат. 105862494 Китай / Лю Чунь, Гуань Сюцюнь, Гао Хунся [и др.]; заявитель Сычуаньский университет науки и техники. № 201610362717; заявл. 26.05.2016; опубл. 17.08.2016.
5. Щербакова Т. П. Волокнистый полуфабрикат из лузги подсолнечника и способ его получения: пат. 2813172 Рос. Федерация / Щербакова Т. П., Казанов Р. Г., Яковлев Е. А. № 2023114556; заявл. 02.06.2023; опубл. 07.02.2024. 6 с.

6. Способ получения целлюлозы из лузги подсолнечника: пат. 2808821 Рос. Федерация / Плеханова А. Ю., Щербакова Т. П., Казанов Р. Г. [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». № 2023114555; заявл. 02.06.2023; опубл. 04.12.2023.
7. Оболенская А. В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы / А. В. Оболенская, З. П. Ельницкая, А. А. Леонович. Москва: Экология, 1991. 320 с.
8. ГОСТ 11960–79. Полуфабрикаты волокнистые и сырье из однолетних растений для целлюлозно-бумажного производства. Метод определения лигнина: межгосударственный стандарт: дата введения 1981-01-01 / разработан Министерством целлюлозно-бумажной промышленности. Москва: Издательство стандартов, 1980. 7 с.
9. ГОСТ 18461–93. Целлюлоза. Метод определения содержания золы: межгосударственный стандарт: дата введения 1995-01-01 / разработан Госстандартом России. Москва: Издательство стандартов, 1994. 6 с.
10. ГОСТ 6841–77. Целлюлоза. Метод определения смол и жиров: межгосударственный стандарт: дата введения 1982-01-01 / разработан Министерством лесной промышленности СССР. Москва: Издательство стандартов, 1977. 6 с.
11. Морфологические характеристики волокнистых полуфабрикатов из лузги подсолнечника / П. М. Кейзер, А. С. Чорноус, Е. Г. Смирнова, В. К. Дубовый // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. № 1 (257). С. 467–478. DOI: 10.21266/2079–4304.2026.257.467–478.
12. Исследование технологических свойств растительных отходов как альтернативного экологического топлива / Л. И. Калашникова, А. А. Овчинникова, А. В. Александрова, А. А. Калашникова // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 4 (18). С. 32–34.
13. Материалы из нетрадиционных видов волокон и сопутствующие продукты: технологии получения, свойства, перспективы применения: монография / [под ред. А. В. Вураско]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург: УГЛТУ, 2024. 195 с.: ил. ISBN 978-5-94984-910-1.
14. Получение целлюлозного волокна из лузги подсолнечника / Д. В. Тунцев, А. В. Куликов, Д. Б. Просвирников, Р. Р. Ахмедзянова // Аграрный научный журнал. 2023. № 6. С. 151–155. DOI: 10.28983/asj. y2023i6 pp151–155.
15. Получение аналогов целлюлозы с использованием одношнекового экструдера / В. В. Коньшин, А. Н. Афаньков, И. А. Серских [и др.] // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: мат. I Международной VII Всероссийской конференции, 27–29 ноября 2024, г. Кемерово: КузГТУ, 2024.

References

1. Zhao Yimin (2006) Method for obtaining technical fiber from sunflower seed husks: Pat. 1718915 China. No. 200510016940; Appl. 05.07.2005; Publ. 11.01.2006.
2. Zhao Yimin (2007) Method for the production of cellulose from sunflower seed husks: Pat. 1311131 China. No. 200510016940; Appl. 05.07.2005; Publ. 18.04.2007.
3. Pang Fengjian, Zhang Zhihong, Cao Qigui, et al. (2011) Method for obtaining cellulose from sunflower seed husks: Pat. 102031713 China. Applicant: Shandong Helong Co., Ltd. No. 201010501628; Appl. 02.10.2010; Publ. 27.04.2011.
4. Liu Chun, Guan Xiuqun, Gao Hongxia, et al. (2016) Method for obtaining unbleached cellulose from sunflower seed shells: Pat. 105862494 China. Applicant: Sichuan University of Science and Engineering. No. 201610362717; Appl. 26.05.2016; Publ. 17.08.2016.
5. Shcherbakova T. P., Kazanov R. G. and Yakovlev E. A. (2024) Fibrous semi-finished product from sunflower husks and method for its production: Pat. 2813172 Russian Federation. No. 2023114556; Appl. 02.06.2023; Publ. 07.02.2024. 6 p.
6. Plekhanova A. Yu., Shcherbakova T. P., Kazanov R. G., et al. (2023) Method for obtaining cellulose from sunflower husks: Pat. 2808821 Russian Federation. Applicant: Kazan National Research Technological University (KNRTU). No. 2023114555; Appl. 02.06.2023; Publ. 04.12.2023.
7. Obolenskaya A. V., Elnitskaya Z. P. and Leonovich A. A. (1991) Laboratory works on the chemistry of wood and cellulose: textbook for universities. Moscow: Ekologiya. 320 p.
8. GOST 11960–79. Fibrous semi-finished products and raw materials from annual plants for pulp and paper manufacture. Method for determination of lignin: interstate standard (1980). Date of introduction 1981-01-01. Developed by the Ministry of Pulp and Paper Industry. Moscow: Izdatelstvo Standartov. 7 p.
9. GOST 18461–93. Pulp. Method for determination of ash content: interstate standard (1994). Date of introduction 1995-01-01. Developed by Gosstandart of Russia. Moscow: Izdatelstvo Standartov. 6 p.
10. GOST 6841–77. Pulp. Method for determination of resins and fats: interstate standard (1977). Date of introduction 1982-01-01. Developed by the Ministry of Forestry Industry of the USSR. Moscow: Izdatelstvo Standartov. 6 p.
11. Keizer P. M., Chornous A. S., Smirnova E. G. and Dubovy V. K. (2026) 'Morphological characteristics of fibrous semi-finished products from sunflower husks', Izvestia of the Saint-Petersburg Forestry Academy, (1 (257)), pp. 467–478. DOI: 10.21266/2079–4304.2026.257.467–478.
12. Kalashnikova L. I., Ovchinnikova A. A., Aleksandrova A. V. and Kalashnikova A. A. (2011) 'Investigation of technological properties of plant waste as an alternative eco-friendly fuel', Science Vector of Togliatti State University, (4 (18)), pp. 32–34.
13. Vurasko A. V. (ed.) (2024) Materials from non-traditional types of fibers and related products: production technologies, properties, application prospects: monograph. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forest Engineering University. Ekaterinburg: USFEU. 195 p.: ill. ISBN 978-5-94984-910-1. Text: electronic.
14. Tuntsev D. V., Kulikov A. V., Prosvirnikov D. B. and Akhmedzyanova R. R. (2023) 'Production of cellulose fiber

from sunflower husks', The Agrarian Scientific Journal, (6), pp. 151–155. DOI: 10.28983/asj. y2023i6 pp151–155.
15. Konshin V. V., Afankov A. N., Serskikh I. A., et al. (2024) 'Production of cellulose analogs using a single-screw extruder', in Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects: Materials of the I International VII All-Russian Conference, November 27–29, 2024. Kemerovo: KuzSTU.

Информация об авторах

Чорноус Артем Сергеевич, *аспирант кафедры технологии бумаги и картона, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0009-0001-5976-1766, e-mail: artyom549@yandex.ru.*

Кейзер Павел Матвеевич, *кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бумаги и картона, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 4864–8012, ORCID: 0009-0001-5976-1766; e-mail: kpm022@yandex.ru.*

Смирнова Екатерина Григорьевна, *профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии бумаги и картона, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 6773–5170, Scopus AuthorID: 57189233797; ORCID: 0000-0002-8482-0684, e-mail: smirnovalta@gmail.com.*

Information about the authors

Chornous Artem Sergeevich, *Chornous Artem Sergeyevich, PhD student of the Department of Pulp and Paper Technology, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0009-0001-5976-1766, e-mail: artyom549@yandex.ru.*

Keiser Pavel Matveevich, *PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Pulp and Paper Technology, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 4864–8012, e-mail: kpm022@yandex.ru.*

Smirnova Ekaterina Grigorievna, *Dr. Sci.in Engineering, Head of the Department of Pulp and Paper Technology, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 6773–5170, Scopus AuthorID: 57189233797; ORCID: 0000-0002-8482-0684, e-mail: smirnovalta@gmail.com.*

Оригинальное практическое исследование
УДК 676.012.1
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_14–24

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГОФРОКАРТОНА

Андрей Владимирович Бахтин, Павел Матвеевич Кейзер, Виктория Александровна Соколова

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Бахтин А. В., Кейзер П. В., Соколова В. А., 2026

Автор-корреспондент: А. В. Бахтин, e-mail: bahtin73@mail. ru

АННОТАЦИЯ

Определение качества упаковочной продукции неразрывно связано не только с использованием современного испытательного оборудования, но и с задачей подготовки образцов для испытаний. Это особенно значимо при испытаниях гофрокартона. Сравнение способов вырезания стандартных образцов позволяет правильно планировать процесс испытаний, обоснованно выбирать способы подготовки материалов для минимизации их влияния на численные значения показателей. В работе рассматривается сравнение двух способов механического вырезания образцов из нескольких видов гофрокартона: с помощью специализированных резаков и с помощью станка лазерной резки. В результате научно-практической работы, выполненной на базе учебно-научного центра «Научно-испытательная лаборатория биоразлагаемых материалов», показано, какие виды испытаний имеют зависимость от способа создания кромки испытуемого образца гофрокартона. Применение различных способов приготовления стандартных образцов обуславливаются видом испытаний, количеством образцов, свойствами материала и требованиями соответствующих стандартов. Сравнительный анализ полученных данных показывает, что такой показатель, как разрывная длина, нечувствителен к процессу образования кромки образца, в то же время из результатов испытаний на торцевое сжатие можно сделать вывод, что в среднем образцы, полученные с помощью лазера, примерно в 1,5 раза прочнее тех, что получены механическим путем. Последнее связано с отсутствием механического контакта с образцом в станке лазерной резки, в то время как при механическом вырезании образец повреждается еще до начала испытаний. Полученные результаты могут быть использованы в лабораториях отраслевых предприятий для проектирования и оптимизации испытаний качества упаковочной продукции на основе гофрокартона.

Ключевые слова: качество гофрокартона, механическая прочность, подготовка образцов, способ торцевого сжатия, сопротивление расслаиванию, разрывная длина, лазерная резка образцов

Для цитирования: Бахтин А. В., Кейзер П. В., Соколова В. А. Сравнительный анализ способов изготовления образцов для испытания механической прочности гофрокартона // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 14–24. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_14–24.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SAMPLE PREPARATION METHODS FOR MECHANICAL STRENGTH TESTING OF CORRUGATED BOARD

Andrey Vladimirovich Bakhtin, Pavel Matveevich Keizer, Victoria Alexandrovna Sokolova

Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: A. V. Bakhtin, e-mail: bahtin. vshte@mail. ru

ABSTRACT

Packaging product quality assessment is inextricably linked not only to modern testing equipment but also to sample preparation for testing. This is especially relevant for corrugated board testing. Comparing standard sample cutting methods enables proper test planning and informed selection of preparation techniques to minimize their impact on measured values. The paper compares two mechanical cutting methods applied to several types of corrugated board: specialized cutting dies and a laser cutting machine. It was demonstrated which test types depend on the method of forming the edge of the corrugated board specimen based on the scientific and practical work performed at the Academic and Research Center "Research and Testing Laboratory of Biodegradable Materials". The choice of standard sample preparation methods depends on the test type, the number of samples, the material properties, and the requirements of applicable standards. A comparative analysis of the data shows that breaking length is insensitive to edge formation. However, edgewise compression tests indicate that laser-cut samples are on average about 1.5 times stronger than mechanically cut ones. This is because there is no mechanical contact with the sample in a laser cutting machine, whereas mechanical cutting damages the sample before testing begins. The obtained data can be used in industry laboratories to design and optimize quality testing of corrugated board packaging products.

Keywords: corrugated board quality, mechanical strength, sample preparation, edgewise compression method, delamination resistance, breaking length, laser cutting of samples

For citation: Bakhtin A. V., Keizer P. V., Sokolova V. A. (2026) 'Comparative analysis of methods for manufacturing samples for testing the mechanical strength of corrugated cardboard', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 14–24. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_14–24.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время идет активное развитие рынка упаковочных материалов из гофрокартона взамен пластиковой упаковки — он демонстрирует сопоставимые характеристики с EPS в поддержании жесткости опоры, одновременно предлагая преимущество экологической устойчивости [1]. Эта тенденция требует оптимизации всех этапов производства, в том числе развития методов испытаний, обеспечения испытательных лабораторий современным оборудованием, позволяющим с достаточной степенью воспроизводимости результатов создавать условия для выявления различных видов брака продукции [2]. В Высшей школе технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна работает одна из таких испытательных лабораторий, занимающаяся независимой экспертной оценкой качества бумаги, картона, гофрокартона и упаковочной продукции из них[1]. Лаборатория в основном состоит из стандартных приборов для определения механических и прочностных показателей бумажной продукции. Совместно с компанией ОРБИС лаборатория укомплектована новейшим оборудованием китайского производителя. В ходе ее работы выявляются различные особенности эксплуатации оборудования, что приводит к развитию технологий испытаний. В современном мире развитие измерительной техники и испытательного оборудования идет по пути совершенствования и ускорения самого процесса испытаний и создания протоколов и отчетов по ним. Некоторые производители оборудования в достаточно бюджетном сегменте в основном ориентируются на качество и надежность самих приборов, не ставя особых акцентов на сопутствующие принадлежности и дополнительное программное обеспечение. Однако когда приходится иметь дело с потоком испытаний, огромное значение имеют автоматизация труда лаборантов и удобство их работы. Это не только ускоряет производство работ, но и снижает вероятность ошибок, обусловленных человеческим фактором. Одной из важнейших задач для проведения испытаний является подготовка образцов определенных размеров. Здесь как китайские, так и многие западные производители используют набор стандартных механических резаков, что требует определенной сноровки и физических усилий лаборантов. Приобретение отдельных резаков для каждого вида испытаний также не является экономически выгодным решением. Кроме того, эти приспособления занимают достаточно большое количество места в помещениях с кондиционированием, что приводит к увеличению требуемых площадей и затрат на их содержание и обслуживание.

В стандартах на испытания не указывается способ вырезания образцов, что открывает возможности для автоматизации данного процесса. Например, одним из способов получения образцов заданной геометрии может служить вырезание с помощью лазера. Этот способ актуален для тонких, легко повреждаемых бумаг, а также для многослойного

1 https://vshte. ru/paper-quality-control-center

гофрированного картона, образцы которого могут легко деформироваться еще до проведения испытаний. Также при обычном механическом вырезании край образца сминается, в результате чего получаются заниженные показатели прочности. Чтобы этого избежать, ищут разные пути: например, в работе [3] особое внимание уделено коэффициенту вариации между предельной деформацией и углом расположения линий гофров и даны рекомендации относительно угла расположения линий гофров. В данной работе представлены результаты испытаний различных типовых видов гофрокартона, образцы которого были получены двумя различными способами механического вырезания: на стандартном оборудовании и на станке лазерной резки. Несмотря на указание некоторых исследователей на меньшую эффективность последней на толстых гофрированных картонах [4], при вырезании образцов было решено попробовать этот способ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования используем следующие материалы.

Материал 1. Трехслойный картон с профилем С, состоящий из слоёв:
- картон для плоских слоёв — тест-лайнер 110 г/м^2 из вторичного волокна;
- бумага для гофрирования 125 г/м^2 из вторичного волокна;
- картон для плоских слоёв — тест-лайнер 175 г/м^2 из вторичного волокна.

Материал 2. Трехслойный картон с профилем С, состоящий из слоёв:
- картон для плоских слоёв– крафт-лайнер 135 г/м^2 из первичного волокна;
- бумага для гофрирования 140 г/м^2 из вторичного волокна;
- картон для плоских слоёв — крафт-лайнер 200 г/м^2 из первичного волокна.

Изготовление образцов механическим способом. При помощи резака ECT (PAT) YT-BY25 (см. рисунок 1) нарезали картон на образцы длиной (100,0 ± 0,5) мм и шириной (25,0 ± 0,5) мм так, чтобы ширина образцов совпадала с направлением гофров согласно ГОСТ 20683–97[2], для испытания на торцевое сжатие; длиной (100,0 ± 0,5) мм и шириной (25,0 ± 0,5) мм для испытания на сопротивление расслаиванию[3].

Также нарезали образцы длиной (200±1) мм и шириной (25±1) мм для испытания на сопротивление разрыву согласно ГОСТ Р 52901–2007.

Изготовление образцов с помощью лазера. При помощи лазерного станка (см. рисунок 2) нарезали картон на образцы.

В программу управления лазерным станком загружалось векторное изображение с требуемым количеством и размером образцов. Резка осуществлялась за 1 проход, высота над материалом 14 мм, расстояние между образцами 5 мм. Подбор параметров мощности и скорости осуществлялся опытным путем, исходя из технических характеристик устройства лазерной резки (таблица 1).

Таблица 1. Технические характеристики лазерного станка[4]
Table 1. Technical specifications of the laser cutting machine

Наименование параметра	Значения параметра
Лазерный модуль	LT40W-AA
Максимальная оптическая мощность лазера	5Вт
Максимальное фокусное расстояние	45 мм (38 мм занимает высота магнитной защитной крышки на модуле)
Настраиваемое фокусное расстояние	7 мм
Рабочее поле (ШхВ)	215×210 мм
Скорость работы охлаждающего вентилятора в лазерном модуле	9000 об/мин
Контроллер	Arduino Mega

Сохраняя максимальную оптическую мощность лазера 5 Вт, изготовили 3 образца одинакового размера длиной 100 мм и шириной 25 мм из материала 2 на разных скоростях — 30, 80 и 100 мм/мин, для изучения степени термического воздействия на картон. Изготовленные таким образом образцы изучили с помощью микроскопа «Микромед МИКМЕД 5.0» (см. рисунок 3).

2 ГОСТ 20683–97. Картон тарный. Метод определения сопротивления торцевому сжатию. (Метод непарафинированного торца). Минск: ИПК Издательство стандартов, 2001. 7 с.

3 ГОСТ 22981–78. Картон гофрированный. Метод определения сопротивления расслаиванию. Москва: Издательство стандартов, 1978.

4 Источник: ГОСТ Р 52901–2007. Картон гофрированный для упаковки продукции. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2008. 7 с.

Скорость для материала 1 подбирали максимально возможную, так чтобы после реза образцы были полностью отделены от листа гофрокартона. Выбрав скорость резки для материала 1–250 мм/мин и для материала 2–80 мм/мин, изготовили 60 образцов размером 100 мм в длину и 25 мм в ширину и 20 образцов 200 мм в длину и 25 мм в ширину. Из материала 2 изготовили такое же количество образцов тех же размеров. Кондиционирование образцов производили согласно ГОСТ 13523–78: температура 23±1 °С, влажность 50 ±2 % [5].

Для испытания прочностных характеристик образцов провели с ними три вида экспериментов. Замеряли: сопротивление торцевому сжатию вдоль гофров; сопротивление расслаиванию; прочность на разрыв и удлинение при растяжении. Результаты приведем ниже.

1. Сопротивление торцевому сжатию вдоль гофров. Эта характеристика показывает максимальную нагрузку, которую образец гофрокартона способен выдержать вдоль сжатия гофров до момента разрушения. Характеризует способность картонной коробки выдерживать вертикальные нагрузки при штабелировании, что особенно важно, если коробка используется для перевозки товара или хранения в складских помещениях. Этот параметр испытывали по ГОСТ 20683–97.

На специальном приборе для испытания на сжатие YT-YS3000A (рисунок 4) образец длиной 100 мм и шириной 25 мм поставили на торец на сжимающую плиту между двумя плоскопараллельными металлическими параллелепипедами.

Сопротивление расслаиванию. Эта характеристика показывает качество склейки и сопротивление разрушению при сжатии. Она также важна для тарного и упаковочного картона, применяемого в логистике и на складах [6]. Коробки с высоким показателем сопротивления расслаиванию сохраняют целостность структуры и не распадаются на отдельные составляющие. Этот параметр испытывали по ГОСТ 22981–78[5] также на приборе для испытания на сжатие YT-YS3000A.

2. Прочность на разрыв и удлинение при растяжении. Эта характеристика показывает, насколько долговечен материал и насколько он эластичен, что очень важно для материалов, испытывающих длительные деформирующие нагрузки. Этот параметр испытывали по ГОСТ 13525.1–79 [7] на горизонтальной разрывной машине MESSMER-BÜCHEL (рисунок 5).

5 ГОСТ 13523–78. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод кондиционирования образцов. Москва: Издательство стандартов, 1978. 6 с.

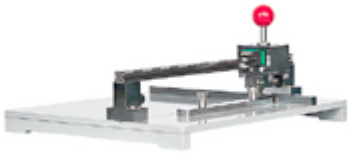


Рисунок 1. Резак для образцов ECT (PAT) YT-BY25
Figure 1. Cutting tool for ECT (PAT) YT-BY25 samples

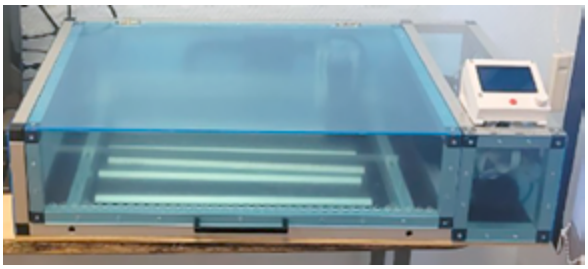


Рисунок 2. Лазерный станок (оригинальная разработка кафедры АТПиП ВШТЭ СПбГУПТД)
Figure 2. Laser cutting machine (Original development of the Department of Automation of Technological Processes and Production (ATPiP)



Рисунок 3. Микроскоп «Микромед МИКМЕД 5.0»
Figure 3. Microscope «Micromed MIKMED 5.0»



Рисунок 4. Прибор для испытания на сжатие YT-YS3000A
Figure 4. Compression tester YT-YS3000A



Рисунок 5. Горизонтальная разрывная машина MESSMER-BÜCHEL
Figure 5. MESSMER-BÜCHEL horizontal tensile testing machine

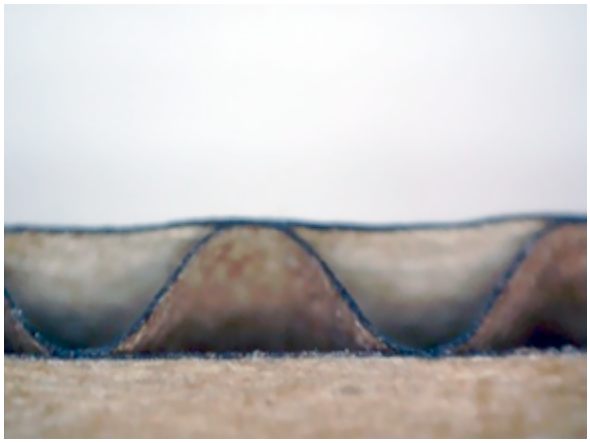


Рисунок 6. Вид образца из материала 2, полученного на лазерном станке при скорости 30 мм/мин (увеличение 4х)

Figure 6. View of a sample made of material 2, obtained on a laser cutting machine at a speed of 30 mm/min (4x magnification)

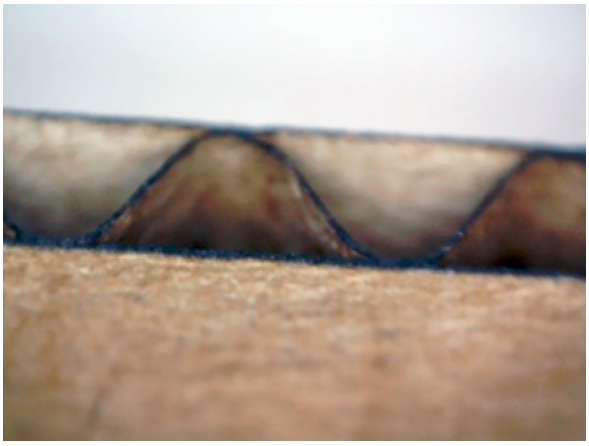


Рисунок 7. Вид образца из материала 2, полученного на лазерном станке при скорости 80 мм/мин (увеличение 4х)

Figure 7. View of a sample made of material 2, obtained on a laser cutting machine at a speed of 80 mm/min (4x magnification)

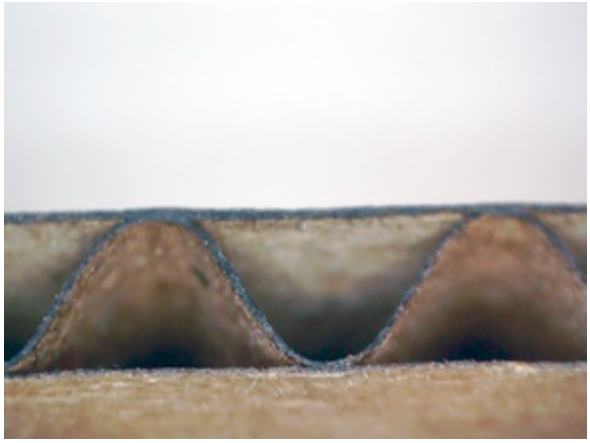


Рисунок 8. Вид образца из материала 2, полученного на лазерном станке при скорости 100 мм/мин (увеличение 6х)

Figure 8. View of a sample made of material 2, obtained on a laser cutting machine at a speed of 100 mm/min (6x magnification)

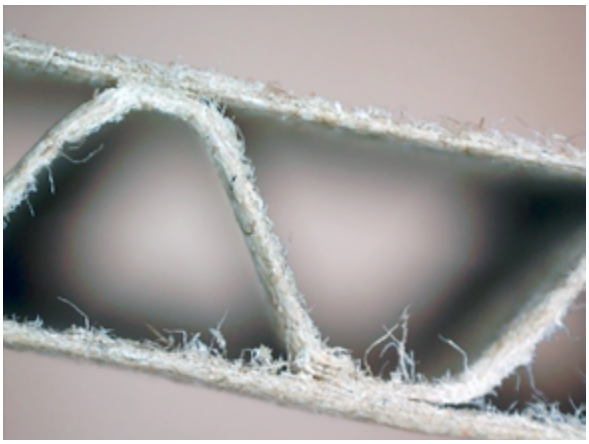


Рисунок 9. Срез образца из материала 1, полученного механическим способом (увеличение 8х)

Figure 9. Cross-section of a sample of material 1 produced by mechanical cutting (8x magnification)

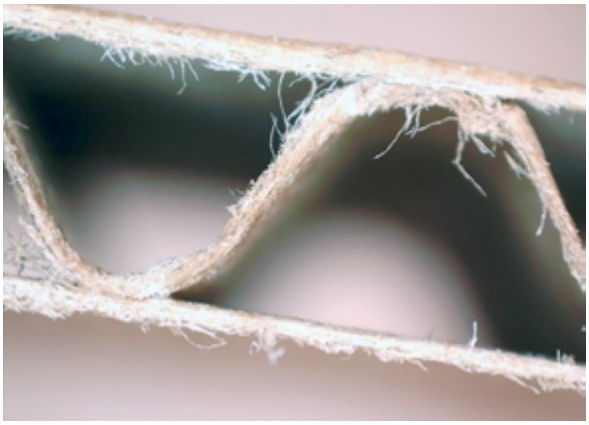


Рисунок 10. Срез образца из материала 2, полученного механическим способом (увеличение 8х)

Figure 10. Cross-section of a sample of material 2 produced by mechanical cutting (8x magnification)

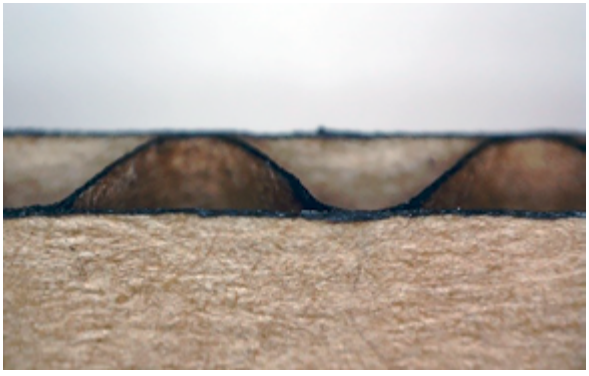


Рисунок 11. Продольный вид гофры образца из материала 1, полученного на лазерном станке при скорости 80 мм/мин (увеличение 6х)

Figure 11. Longitudinal view of corrugation in a material 1 sample obtained on a laser cutting machine at 80 mm/min (6x magnification)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микроскопическое исследование. Образцы, полученные с помощью лазера на разных скоростях реза, представлены на рисунках 6, 7, 8.

Образцы, вырезанные на скорости 30 мм/мин, имеют термическую деформацию лайнера из-за более длительного воздействия; образцы, вырезанные из листа на скорости 100 мм/мин оставались частично соединены с ним. В связи с этим была выбрана скорость реза для получения образцов лазерным способом 80 мм/мин.

Получив образцы механическим способом и при помощи лазерного станка, изучили их кромки. Кромки образцов, полученные механическим способом, представлены на рисунках 9 и 10.

На изображениях заметны множество выступающих волокон и локальные зоны расслоения в некоторых местах, что свидетельствует о механическом повреждении структуры картона. Также присутствует небольшая деформация краёв лайнера. Можно сделать вывод: при резке картона нож загибает края.

Образцы, полученные на лазерном станке, представлены на рисунках 11 и 12.

На рисунке 11 отчетливо видно, что кромки образцов, полученных на лазерном станке из материала 1, подгорают



Рисунок 12. Продольный вид гофры образца из материала 2, полученного на лазерном станке при скорости 80 мм/мин (увеличение 6х)

Figure 12. Longitudinal view of corrugation in a material 2 sample obtained on a laser cutting machine at 80 mm/min (6x magnification)

гораздо сильнее, чем из материала 2, можно увидеть небольшую неровность реза. Опытным путем подобрали скорость реза для этого материала — 250 мм/мин.

На рисунке 12 видно, что на кромках образца, полученного на лазерном станке из материала 2, гораздо меньше гари по сравнению с образцами из материала 1. Сами кромки ровные, никаких отделившихся волокон

Таблица 2. Результаты проведения испытаний на торцевое сжатие
Table 2. Edgewise compression test result

Материал, вид резки и вес 1 м², г/м²	Макул., мех. 475	Целл., мех. 575	Макул., лаз 475	Целл., лаз. 575	Единицы измерения
1	401	606	613	892	Н
2	401	601	613	892	Н
3	395	596	608	884	Н
4	394	595	601	879	Н
5	392	595	601	868	Н
6	391	586	598	834	Н
7	387	584	597	832	Н
8	385	584	588	830	Н
9	385	583	588	789	Н
10	381	573	588	751	Н
11	381	568	587	742	Н
12	381	568	579	741	Н
Макс.	401	606	613	892	Н
Мин.	381	568	579	741	Н
Средн.	390	587	597	828	Н
Ст. откл	7	12	11	59	Н

не наблюдается, качество их существенно лучше по сравнению с образцами, полученными механическим путём.

Испытание на торцевое сжатие. В ходе испытаний были получены и занесены в таблицу 2 следующие данные.

Для более корректного сравнения полученных результатов с результатами испытания прочих образцов переводим единицы измерения из ньютонов (Н) в килоньютоны на метр (kH/м) по формуле (1):

$$x_{kH/м} = \frac{x_H}{1000 \times l}, \frac{kH}{м}, \quad (1)$$

где $x_{kH/м}$ — полученные значения в переведённых единицах измерения, kH/м;
x_H — исходные значения в исходных единицах измерения, Н;
1000 — переводной коэффициент;
l — длина образца.

Полученные результаты расчётов отражены в таблице 3.

Кромки образцов, полученных лазерным способом (рисунки 13, 14), не деформировались. Кромки образцов, полученных механическим путём (рисунки 15, 16), в процессе испытания значительно деформировались.

Исходя из результатов испытаний на торцевое сжатие, можно сделать вывод, что образцы, полученные с помощью лазера, в среднем прочнее тех, что получены механическим путем примерно в 1,5 раза.

Смятие кромок образцов, полученных механическим путем, может говорить о деформации образцов при взаимодействии с ножом в связи с его недостаточной заточкой или быстрым затуплением в процессе резки, чего при лазерном резе не происходит.

Испытание на сопротивление расслаиванию. В ходе проведения испытаний были получены результаты (таблица 4).

Для более корректного сравнения полученных результатов с результатами испытания прочих испытаний переводим единицы измерения из ньютонов (Н) в килоньютон на метр (Н/м) по формуле (2).

$$x_{H/м} = \frac{x_H}{l}, \frac{H}{м}, \quad (2)$$

Таблица 3. Таблица описательной статистики результатов испытания на торцевое сжатие в килоньютонах на метр
Table 3. Table of descriptive statistics for edge crush test results in kN/m

Материал, вид резки и вес 1 м², г/м²	Макул., мех. 475	Целл., мех. 575	Макул., лаз 475	Целл., лаз. 575	Единицы измерения
R (Макс.)	4,01	6,06	6,13	8,92	kH/м
R (Мин.)	3,81	5,68	5,79	7,41	kH/м
R (Средн.)	3,90	5,87	5,97	8,28	kH/м
R (Ст. откл.)	0,07	0,12	0,11	0,59	kH/м

Таблица 4. Результаты проведения испытаний на сопротивление расслаиванию
Table 4. Delamination resistance test result

Номер опыта	Сила, которую выдерживает образец до разрушения, Н			
	Механический способ		Лазерный способ	
	Материал 1	Материал 2	Материал 1	Материал 2
1	16,93	27,37	16,31	25,82
2	14,65	25,10	16,94	25,07
3	16,66	26,90	14,10	29,54
4	18,66	29,02	17,02	24,37
5	14,17	25,64	18,00	23,64
6	18,94	27,17	14,31	30,39
7	17,78	24,42	13,92	29,53
Максимальное значение, Н	18,94	29,02	18,00	30,39
Минимальное значение, Н	14,17	24,42	13,92	23,64
Среднее значение, Н	16,77	26,23	15,80	26,91
Стандартное отклонение, Н	1,81	1,66	1,66	2,82

где $x_{Н/м}$ — полученные значения в переведённых единицах измерения, Н/м;
$x_Н$ — исходные значения в исходных единицах измерения, Н;
l — длина образца, м;

Полученные значения представлены в таблице 5.

Можно сделать вывод, что вид резки не влияет на прочностные характеристики полученных образцов, а небольшая разница обусловлена размером выборки.

Испытание на сопротивление разрыву. Полученные в ходе исследований результаты представлены в таблице 6.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что способ получения образцов не влияет на сопротивление разрыву, а разница в значениях не превышает погрешности.

Таблица 5. Результаты испытания на сопротивление расслаиванию в ньютонах на метр
Table 5. Results of the delamination resistance test expressed in newtons per meter

Материал, вид резки и вес 1 м², г/м²	Макул., мех. 475	Целл., мех. 575	Макул., лаз 475	Целл., лаз. 575	Единицы измерения
P (Макс.)	695	955	730	995	Н/м
P (Мин.)	640	870	655	850	Н/м
P (Средн.)	665	916	684	921	Н/м
P (Ст. откл.)	21	34	25	49	Н/м

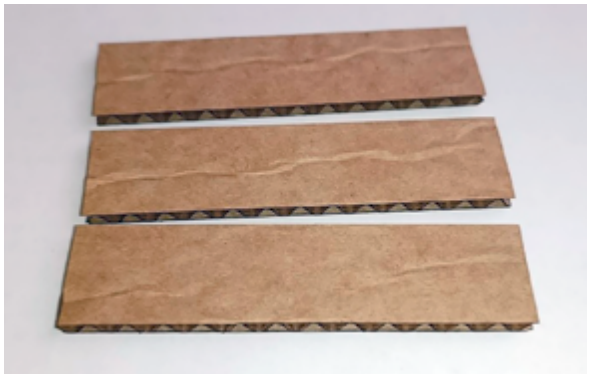


Рисунок 13. Образцы, изготовленные из материала 2 на лазерном станке после испытания на торцевое сжатие
Figure 13. Samples fabricated from material 2 on a laser cutting machine after the edgewise compression test

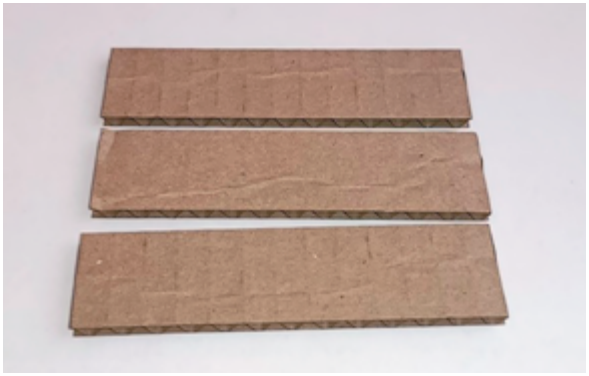


Рисунок 14. Образцы, изготовленные из материала 1 на лазерном станке после испытания на торцевое сжатие
Figure 14. Samples fabricated from material 1 on a laser cutting machine after the edgewise compression test

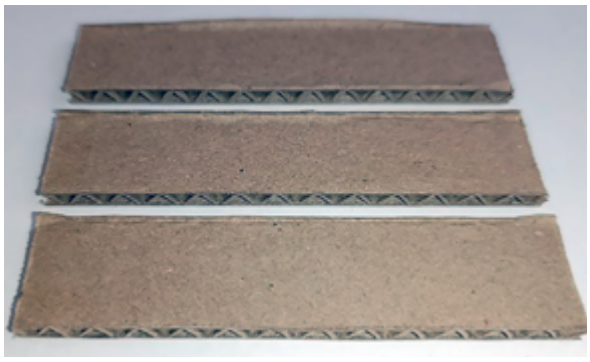


Рисунок 15. Образцы, изготовленные из материала 1 механическим способом после испытания на торцевое сжатие
Figure 15. Samples fabricated from material 1 mechanically after the edgewise compression test

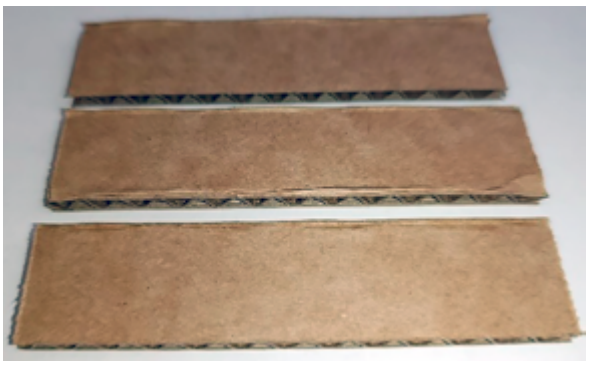


Рисунок 16. Образцы, изготовленные из материала 2 механическим способом после испытания на торцевое сжатие
Figure 16. Samples fabricated from material 2 mechanically after the edgewise compression test

Таблица 6. Результаты проведения испытаний на сопротивление разрыву, Н
Table 6. Tensile strength test result, N

Материал, вид резки и вес 1 м², г/м²	Макул., мех. 475	Целл., мех. 575	Макул., лаз 475	Целл., лаз. 575	Единицы измерения
1	16,93	27,37	16,31	25,82	Н
2	14,65	25,10	16,94	25,07	Н
3	16,66	26,90	14,10	29,54	Н
4	18,66	29,02	17,02	24,37	Н
5	14,17	25,64	18,00	23,64	Н
6	18,94	27,17	14,31	30,39	Н
7	17,78	24,42	13,92	29,53	Н
Макс.	18,94	29,02	18,00	30,39	Н
Мин.	14,17	24,42	13,92	23,64	Н
Средн.	16,77	26,23	15,80	26,91	Н
Ст. откл.	1,81	1,66	1,66	2,82	Н

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа данных получено, что разница между лазерным и механическим резом видна только в результатах испытаний на торцевое сжатие. Однако следует отметить, что кромки образцов, полученных механическим способом, сильно деформировались, в то время как образцы, полученные на лазерном станке, остались прежними. Можно предположить, что разница в результатах обусловлена в большей мере качеством подготовки режущего инструмента, установленного на механическом резаке, или способом резки, который способствует образованию неровных кромок, чего не происходило с образцами, полученными на лазерном станке. Все прочие параметры различаются в пределах погрешности.

Значения испытания на торцевое сжатие в среднем больше (примерно в 1,5 раза) у картона, полученного на лазерном станке. Последнее связано с отсутствием механического контакта с образцом в станке лазерной резки, в то время как при механическом вырезании образец повреждается еще до начала испытаний.

На основании результатов проведенной работы можно говорить о целесообразности замены длительных по времени традиционных способов подготовки образцов на механических резаках на современную экспресс-подготовку на лазерном резаке. В результате использования устройства для лазерной резки полностью устраняется влияние человеческого фактора на подготовку образцов. Кроме того, образцы одного типа идеально параллельны друг другу и могут располагаться через минимальные расстояния, что приводит к экономии материалов для испытаний и новым возможностям исследований образцов. Один универсальный станок для вырезания образцов позволит получить значительную экономию при закупках оборудования по сравнению с традиционными механическими устройствами, которые ориентированы только на конкретные испытания. При возникновении необходимости в новых типах образцов уже не будет требоваться приобретение дополнительного оборудования, а только нужен новый векторный чертеж для загрузки в станок.

В данной работе использовался лазерный роботизированный комплекс [8, 9], разработанный в Высшей школе технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна на кафедре автоматизации технологических процессов и производств для задач учебно-научного центра «Научно-испытательная лаборатория биоразлагаемых материалов». Совершенствование прототипа этого устройства продолжается с целью получения увеличения скорости и качества реза, а также автоматизации загрузки требуемых векторных чертежей в зависимости от выбранного стандарта испытаний.

Полученные данные могут быть использованы в лабораториях отраслевых предприятий для проектирования и оптимизации испытаний качества упаковочной продукции на основе гофрокартона и других листовых материалов.

Список литературы

1. Kim S., Jang Y., Kim W., Lee C. and Park J. (2025). Dynamic Behavior of Corrugated Cardboard Edge Damaged by Vibration Input Environments. Materials. Vol. 18. 4364. 10.3390/ma18184364.
2. Бахтин А. В. Совершенствование системы оценки качества картона / А. В. Бахтин // Совершенствование методологии познания в целях развития науки: сборник статей Международной научно-практической конференции, Саратов, 03 ноября 2019 года. Саратов: Омега Сайнс, 2019. С. 30–32.

3. Косарев И. А., Гурьев А. В. Конструкционная прочность изделий из гофрированного картона // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2025. № 1. С. 210–220. DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-210-220.
4. Nolot J.-B., Féron J., Chauvin N., Delloque P., Odof S., Meuret M. and Erre D. Corrugated Packaging Manufacturing Evaluation Laser Cutting vs. Traditional Methods // Conference: IAPRI Member's Conference 32ND. ROANOKE VA USA — 2025. URL: https://www. researchgate. net/publication/396311017_Corrugated_Packaging_Manufacturing_Evaluation_Laser_Cutting_vs_Traditional_Methods.
5. Steen W. M. Laser Material Processing / W. M. Steen, J. Mazumder. 4th ed. London: Springer, 2010. 558 p. ISBN 978-1-84996-061-8.
6. Судоплатова А. Д. Оценка прочности различных типов гофрокартона для производства тары // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 10. С. 121–127.
7. ГОСТ 13525.1–79. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2007. 15 с.
8. Бахтин А. В. Тенденции развития современного оборудования для определения показателей качества бумаги, картона и гофрокартона / А. В. Бахтин, В. А. Соколова // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VIII международной научно-технической конференции имени профессора В. И. Комарова, Архангельск, 11–13 сентября 2025 года. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 2025. С. 53–57.
9. Соколова В. А., Пути улучшения качества продукции на деревообрабатывающем предприятии / Соколова В. А., Кривоногова А. С., Иванов А. М., Марков В. А., Парфенопуло Г. К. // Сб. ст. по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2018 года. Отв. ред. В. А. Соколова. 2019. С. 50–55.

References

1. Kim S., Jang Y., Kim W., Lee C. and Park J. (2025) 'Dynamic behavior of corrugated cardboard edge damaged by vibration input environments', Materials, Vol. 18, 4364. DOI: 10.3390/ma18184364.
2. Bakhtin A. V. (2019) 'Improvement of the system for assessing cardboard quality', in Improvement of the methodology of cognition for the development of science: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Saratov, 03 November 2019. Saratov: Omega Sains, pp. 30–32.
3. Kosarev I. A. and Guryev A. V. (2025) 'Structural strength of corrugated cardboard products', News of Higher Educational Institutions. Forest Journal, No. 1, pp. 210–220. DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-210-220.
4. Nolot J.-B., Féron J., Chauvin N., Delloque P., Odof S., Meuret M. and Erre D. (2025) 'Corrugated packaging manufacturing evaluation: laser cutting vs. traditional methods', in Conference: IAPRI Member's Conference 32nd, Roanoke, VA, USA. Available at: https://www. researchgate. net/publication/396311017_Corrugated_Packaging_Manufacturing_Evaluation_Laser_Cutting_vs_Traditional_Methods (Accessed: [date]).
5. Steen W. M. and Mazumder J. (2010) Laser material processing. 4th ed. London: Springer. ISBN 978-1-84996-061-8.
6. Sudoplatova A. D. (2021) 'Assessment of the strength of various types of corrugated cardboard for packaging production', News of TulGU. Technical Sciences, No. 10, pp. 121–127.
7. GOST 13525.1–79 (2007) Fibrous semi-finished products, paper and cardboard: methods for determining tensile strength and elongation at tension. Technical specifications. Moscow: Standartinform.
8. Bakhtin A. V. and Sokolova V. A. (2025) 'Trends in the development of modern equipment for determining the quality indicators of paper, cardboard and corrugated cardboard', in Problems of mechanics of pulp and paper materials: proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference named after Professor V. I. Komarov, Arkhangelsk, 11–13 September 2025. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, pp. 53–57.
9. Sokolova V. A., Krivonogova A. S., Ivanov A. M., Markov V. A. and Parfenopulo G. K. (2019) 'Ways to improve product quality at a woodworking enterprise', in Collection of articles based on the materials of the scientific and technical conference of the Institute of Technological Machines and Forest Transport on the results of research work in 2018, ed. by V. A. Sokolova, pp. 50–55.

Информация об авторах

Бахтин Андрей Владимирович, *кандидат технических наук, доцент, директор учебно-научного центра «Научно-испытательная лаборатория биоразлагаемых материалов», Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4; SPIN-код: 5517–9430; Author ID: 341037; e-mail: bahtin73@mail.ru*

Кейзер Павел Матвеевич, *кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бумаги и картона, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4; SPIN-код: 4864–8012; Author ID: 956110; e-mail: kpm022@yandex.ru.*

Соколова Виктория Александровна, *кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по перспективному развитию и инновациям, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4; SPIN-код: 5116–5102; Author ID: 803015; e-mail: sokolova.vshte@mail.ru.*

Information about the authors

Andrey Vladimirovich Bakhtin, *PhD in Engineering, Associate Professor, Director of the Educational and Research Center "Research and Testing Laboratory of Biodegradable Materials", Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh Street, Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 5517–9430; Author ID (RSCI): 341037; e-mail: bahtin73@mail.ru.*

Pavel Matveyevich Keyser, *PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Paper and Cardboard Technology, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh Street, Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 4864–8012; Author ID (RSCI): 956110; e-mail: kpm022@yandex.ru.*

Victoria Aleksandrovna Sokolova, *PhD in Engineering, Associate Professor, Deputy Director for Prospective Development and Innovation, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh Street, Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 5116–5102; Author ID (RSCI): 803015; e-mail: sokolova.vshte@mail.ru.*

Оригинальное практическое исследование
УДК 621.7.04
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_25–31

РАЗРАБОТКА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЗАГЛУШКИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ГЕРМЕТИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИИ

Николай Петрович Мидуков, Дмитрий Владиславович Худницкий, Елизавета Артемовна Портнягина

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Мидуков Н. П., Худницкий Д. В., Портнягина Е. А., 2026

Автор-корреспондент: Н. П. Мидуков, e-mail: mnp83@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты проектирования и изготовления герметичных заглушек, эксплуатируемых в условиях вибрации, с применением аддитивных технологий. Рассмотрены недостатки изделий из мономатериалов: жесткие пластики не обеспечивают полной герметизации из-за высокого модуля упругости, а эластичные материалы не обладают необходимой несущей способностью и теряют геометрическую стабильность под рабочим давлением. В качестве решения предложена технология создания двухкомпонентного изделия, сочетающего жесткий каркас из полилактида (PLA), воспринимающий механическую нагрузку и обеспечивающий надежность резьбового соединения, и интегрированные уплотнительные элементы из термопластичного полиуретана (TPU), выполняющие функцию герметика и демпфера. Проведен обзор конструкции 3D-принтера Sovol SV04 с системой независимых двойных экструдеров (IDEX), позволяющей печатать разнородными полимерами в едином цикле без замены филамента. Описан процесс калибровки системы по осям X, Y и Z, а также подбора параметров печати TPU, включая корректировку коэффициента подачи до 120 % для компенсации микропроскальзывания гибкой нити и обеспечения монолитности уплотнительного слоя. Освещены этапы 3D-моделирования и подготовки G-кода с учетом специфики адгезии между слоями разнородных материалов. Представлены методика и результаты экспериментальной проверки изготовленного образца на сохранение герметичности при вибрационных нагрузках (частота 50 Гц, ускорения до 9g): протечки по контуру примыкания заглушки отсутствуют. Полученные данные подтверждают эффективность комбинированной экструзионной 3D-печати для изготовления функциональных вибростойких уплотнений, что особенно актуально для задач мелкосерийного производства и оперативного ремонта оборудования.

Ключевые слова: 3D-печать, двухкомпонентная печать, полилактид, термопластичный полиуретан, двухэкструдерный принтер, заглушка, герметичность, вибростойкость

Для цитирования: Мидуков Н. П., Худницкий Д. В., Портнягина Е. А. Разработка двухкомпонентной заглушки с возможностью герметизации в условиях вибрации // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 25–31. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_25–31.

DEVELOPMENT OF A TWO-COMPONENT PLUG WITH SEALING CAPABILITY UNDER VIBRATION

Nikolay Petrovich Midukov, Dmitriy Vladislavovich Khudnitsky, Elizaveta Artemovna Portnyagina

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: N. P. Midukov, e-mail: mnp83@mail.ru

ABSTRACT

The article presents the results of designing and manufacturing hermetic plugs operated under vibration conditions using additive technologies. The disadvantages of articles manufactured from single materials are examined: rigid plastics do not provide hermetic sealing due to their high elastic modulus, while elastic materials do not exhibit the requisite load-bearing capacity and lose geometric stability under operating pressure. A technology has been proposed as a solution for creating a two-component article that combines a rigid PLA (polylactide) framework, which takes up the mechanical load and provides the reliability of the threaded connection, and integrated TPU (thermoplastic polyurethane) sealing elements serving as a sealant and a vibration damper. The design of the Sovol SV04 3D printer with an independent dual extruder (IDEX) system is reviewed; this system enables printing with dissimilar polymers in a single cycle without changing filament. In order to compensate for micro-slippage of the flexible filament and to ensure the integrity of the sealing layer, the calibration process for the X, Y, and Z axes is described, as is the selection of TPU printing parameters, including correction of the feed coefficient up to 120%. The paper covers the stages of 3D modeling and G-code preparation, with due regard for the specific adhesion between layers of dissimilar materials. The paper presents the methodology and results of experimental testing of the fabricated sample for sealing retention under vibration (50 Hz, accelerations up to 9g): no leakage along the plug's contact contour was detected. The findings confirm the effectiveness of combined extrusion 3D printing for functional vibration-resistant seals, especially relevant for small-batch production and rapid equipment repair.

Keywords: 3D printing, dual-material printing, polylactide, thermoplastic polyurethane, dual-extruder printer, plug, hermeticity, vibration resistance

For citation: Midukov N. P., Khudnitsky D. V., Portnyagina E. A. (2026) 'Development of a two-component plug with sealing capability under vibration', Technology and Energy, vol. 3, no. 3, pp. 25–31. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_25–31.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении и приборостроении аддитивные технологии (3D-печать) перешли из разряда инструментов для прототипирования в способ изготовления функциональных конечных изделий. Технология послойного наплавления, экструзии (FDM/FFF) [1] остается наиболее доступной и распространенной, однако печать одним материалом связана с ограничениями на эксплуатационные характеристики деталей. В связи с этим особый интерес представляет печать сразу из нескольких материалов, позволяющая комбинировать в одном изделии свойства различных полимеров [2], например, жесткость конструкционных пластиков и эластичность полиуретана.

Одной из актуальных инженерных задач для химической технологии является обеспечение герметичности технологических корпусов и узлов, работающих в условиях динамических нагрузок. Стандартные методы герметизации, такие как использование резиновых прокладок или литых заглушек, требуют наличия широкой номенклатуры комплектующих или дорогостоящего изготовления пресс-форм. В условиях мелкосерийного производства или необходимости оперативного ремонта 3D-печать становится безальтернативным решением по скорости и стоимости.

Жесткие термопласты (такие как полилактид, полиэтилен, ABS) обеспечивают необходимую конструкционную прочность и надежность резьбового соединения [3]. Однако из-за высокого модуля упругости они не способны компенсировать неровности сопрягаемых поверхностей, что препятствует достижению полной герметичности. В свою очередь, эластичные материалы (термопластичный полиуретан TPU) эффективно выполняют функцию уплотнителей и демпферов. Тем не менее изготовление заглушки целиком из полиуретана нецелесообразно из-за недостаточной жесткости материала: под воздействием рабочего давления деталь подвергается критической деформации, теряет геометрическую стабильность и не может надежно удерживаться.

Решением является создание композитных (двухкомпонентных) изделий, где жесткий каркас из PLA несет механическую нагрузку [4], а интегрированные элементы из TPU обеспечивают герметизацию.

Тем не менее печать комбинацией PLA и TPU сопряжена с рядом технологических трудностей. К ним относятся различия в температурах плавления, сложности адгезии между различными материалами, а также необходимость точной калибровки двухэкструдерных систем для печати гибкими филаментами.

Настоящая работа посвящена разработке технологии изготовления заглушки, способной сохранять герметичность при воздействии вибрации, используя FDM-принтер [5].

Целью работы является изготовление двухкомпонентной заглушки с возможностью герметизации в условиях вибрации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:
1. Провести обзор существующих конструкций 3D-принтеров, позволяющих создавать детали из нескольких компонентов, одним из которых является термопластичный полиуретан [6].
2. Выполнить подготовку и калибровку двухэкструдерного принтера для изготовления многокомпонентных изделий, обеспечив стабильную подачу полиуретана.
3. Создать 3D-модель и подготовить «G-code» изделия, учитывающего особенности адгезии материалов, изготовить образец на 3D-принтере [7].
4. Провести экспериментальную проверку герметичности конструкции с использованием заглушки, изготовленной по предлагаемой технологии, в условиях имитации вибрационных нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На начальном этапе работы были разработаны технические эскизы и построена твердотельная трехмерная модель двухкомпонентной заглушки для элемента рамы SUZUKI GSX-S750, GSR750 (рисунок 1) в системе автоматизированного проектирования (рисунок 2). Проектирование велось с учетом функционального разделения изделия на две зоны: жесткий корпус с резьбовым элементом для механической фиксации и эластичный контур для обеспечения герметичности. Финальные модели компонентов были экспортированы в формат STL.

Изготовление опытных образцов производилось методом послойного наплавления [8] (FDM/FFF) на принтере Sovol SV04 (рисунок 3). Его ключевой особенностью является модульная конструкция и система IDEX (Independent Dual EXtruder), обеспечивающая независимость двух экструдеров по оси X. Это позволяет реализовывать режим печати изделий из двух материалов (включая резину) без необходимости смены катушки пластика в процессе работы. Более подробные характеристики принтера представлены в таблице 1.

Обязательным условием успешной реализации двухкомпонентной печати является калибровка системы 3D-принтера по осям X, Y и Z.

На первом этапе производилась настройка по Z. Для обеспечения равномерной экструзии и надежной адгезии первого слоя по всей площади рабочей зоны выполнялось многоточечное выравнивание печатной платформы (Bed leveling). Данная процедура позволила компенсировать геометрические погрешности стола и установить оптимальную величину зазора между соплами и платформой (Z-offset).

Следующим важным этапом стало точное совмещение двух независимых экструдеров по осям абсцисс (X) и ординат (Y). Точная настройка этих параметров необходима для идеального совпадения двух разнородных материалов в соответствии с цифровой 3D-моделью,



Рисунок 1. Клетка на мотоцикл SUZUKI GSX-S750, GSR750 (Пример конструкции рамы, которая контактирует с окружающей средой и испытывает вибрационные нагрузки

Figure 1. Motorcycle cage for SUZUKI GSX-S750, GSR750 (An example of a frame structure in contact with the environment and subjected to vibration loads.

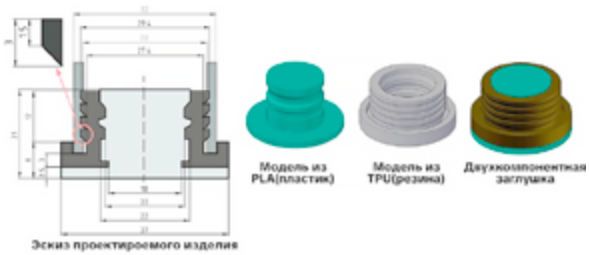


Рисунок 2. Эскиз изделия и результат моделирования

Figure 2. Product sketch and simulation result

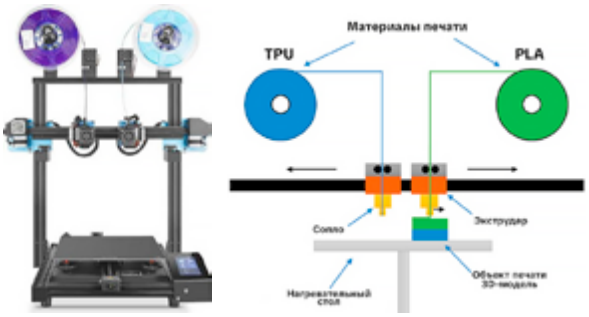


Рисунок 3. 3D-принтер Sovol SV04

Figure 3. 3D printer Sovol SV04

Таблица 1. Характеристики принтера Sovol SV04
Table 1. Sovol SV04 printer characteristics

Параметр	Характеристика
Технология построения	Послойное наплавление (FDM/FFF)
Рабочая область (XYZ)	300 × 300 × 400 мм
Конфигурация экструдеров	2 независимых экструдера (IDEX)
Технология печати	Пластиковая нить (FDM/FFF)
Поддерживаемые материалы	TPU, PLA, ABS, PETG, WOOD
Система управления	32-разрядная плата Creality V5.2.1 с драйверами шаговых двигателей TMC2209 (режим StealthChop)
Интерфейс управления	Цветной сенсорный дисплей
Подключение и управление	USB, SD карта

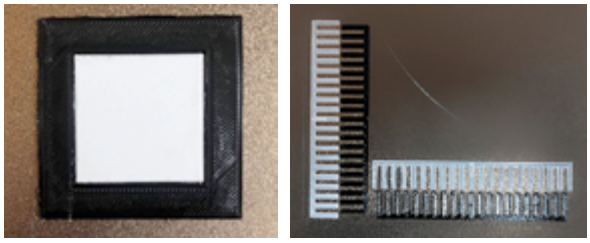


Рисунок 4. Результат калибровки
Figure 4. Calibration result

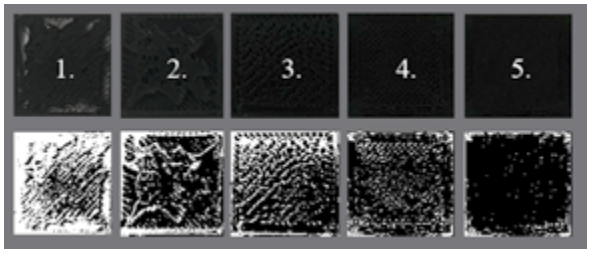


Рисунок 5. Результат подбора параметров печати: 1 — коэффициент подачи 100%, заполнение 5%, 2 — коэффициент подачи 100%, заполнение 10%, 3 — коэффициент подачи 100%, заполнение 100%; 4 — коэффициент подачи 105%, заполнение 100%; 5 — увеличение коэффициента подачи до 120%, заполнение 100%

Figure 5. Result of selecting printing parameters: 1 — feed rate 100%, fill 5%; 2 — feed rate 100%, fill 10%; 3 — feed rate 100%, fill 100%; 4 — feed rate 105%, fill 100%; 5 — increase in feed rate up to 120%, fill 100%

исключая образование зазоров или нахлестов на границе сред.

После внесения вычисленных поправок в настройки принтера была проведена повторная контрольная печать. Оценка финальных тестовых образцов подтвердила высокую точность позиционирования сопел. Результат успешной калибровки экструдеров представлен на рисунке 4.

Следующим этапом исследования стала оптимизация параметров 3D-печати для эластичного материала (TPU). На основе анализа профильной литературы и серии натурных экспериментов были определены настройки «слайсера», напрямую влияющие на качество изделия.

Было установлено, что использование низкого коэффициента внутреннего заполнения (infill) приводит к деформации детали. При заполнении на уровне 10% (рисунок 5, образцы 1 и 2) наблюдается провисание верхних сплошных слоев и образование впадин из-за недостаточной площади внутренней опоры для мягкого пластика.

Другой существенной проблемой стало образование микропустот в структуре детали. Это явление обусловлено высокой эластичностью TPU, которая вызывает микропроскальзывание филамента в подающем механизме экструдера. Для компенсации этого эффекта требуется корректировка коэффициента подачи пластика (Flow Rate) (рисунок 5, образец 3). Стандартные рекомендации для TPU предполагают увеличение потока до 105–115%, однако в рамках нашего эксперимента этого оказалось недостаточно: на образце 4 (рисунок 5), напечатанном с потоком 105%, дефекты сохранились.

Таким образом, увеличение коэффициента подачи до 120% позволило полностью компенсировать проскальзывание нити. Как видно на последнем образце (рисунок 5, образец 5), такое значение параметра значительно уменьшило количество пустот и обеспечило необходимую монолитность уплотнительного слоя.

После подбора оптимальных параметров печати TPU был подготовлен «G-code» в специализированном программном обеспечении (слайсере) Sovol 3D Cura, поддерживающем режим двухкомпонентной печати. Для каждого экструдера были заданы индивидуальные

Таблица 2. Параметры двухэкструдерной печати
Table 2. Parameters of dual-extruder printing

Наименование	ед. изм.	Левый экструдер (TPU)	Правый экструдер (PLA)
Высота слоя	мм	0,2	0,2
Высота первого слоя	мм	0,2	0,2
Толщина стенок	мм	0,4	1,6
Заполнение	%	100	40
Температура экструдера	°C	230	220
Температура стола	°C	80	80
Поток	%	120	100
Скорость	мм/с	20	40
Охлаждение	%	30	100
Поддержки		нет	нет

температурные профили, соответствующие свойствам материалов (PLA и TPU), представленные в таблице 2.

Изготовление заглушки выполнялось методом 3D-печати (FDM/FFF) на оборудовании с двумя независимыми экструдерами (система IDEX). Наличие двух отдельных печатающих головок позволило в едином рабочем цикле использовать жесткий пластик (PLA) для создания прочного корпуса и эластичный полиуретан (TPU) для формирования уплотнителя. Такой подход избавил от необходимости останавливать печать для замены филамента и исключил риск смешивания материалов в сопле [9].

В процессе работы осуществлялся контроль за равномерной подачей гибкой нити TPU, а также за качеством сплавления слоев в местах контакта жесткой и эластичной частей детали, поскольку от этого напрямую зависит прочность и целостность изделия.

По итогам производственного цикла был получен качественный опытный образец (рисунок 6): деталь сформирована без дефектов экструзии, ее геометрия полностью соответствует заданной 3D-модели, а разнородные полимеры (PLA и TPU) продемонстрировали высокую степень межслойного сцепления (адгезии) [10].

Для экспериментальной оценки эксплуатационных характеристик и подтверждения надежности уплотнения в условиях динамических нагрузок была проведена серия испытаний. Целью данного этапа являлась проверка способности эластичного материала (TPU) сохранять герметичность при воздействии вибрации, имитирующей реальные условия работы механизма [11].

Испытуемый образец двухкомпонентной заглушки устанавливался в тестовый резервуар, заполненный водой. Для создания необходимых динамических нагрузок резервуар фиксировался на рабочей платформе лабораторного вибростола модели JG-201 (рисунок 7).



Рисунок 6. Результат 3D-печати проектируемого изделия
Figure 6. Result of 3D printing of the designed product

Выбор данного оборудования обусловлен наличием функции плавной регулировки амплитуды вибрации, что позволяет точно моделировать различные режимы механического воздействия на деталь и выявлять потенциальные резонансные явления, ведущие к разгерметизации. В ходе эксперимента фиксировалось отсутствие протечек по контуру примыкания заглушки к посадочному месту.

Основные технические характеристики применяемого вибрационного оборудования представлены в таблице 3.

Для объективной фиксации результатов испытаний на герметичность была применена методика визуального контроля. На рабочую платформу вибростолика укладывался сухой контрольный лист бумаги, на который устанавливалась испытательная сборка, представляющая собой имитатор рабочего узла, заполненный жидкостью с плотно зафиксированной в ней напечатанной заглушкой (рисунок 7).

В ходе вибрационного воздействия лист бумаги выполнял функцию индикатора влаги: малейшее нарушение герметичности уплотнительного контура из TPU

Таблица 3. Характеристики вибростола
Table 3. Characteristics of the vibration table

Наименование параметра	Значение
Модель	JG-201 (арт. TEX000111)
Производитель	OEM-Китай
Потребляемая мощность	100 Вт
Диаметр рабочей поверхности	110 мм
Частота колебаний	50 Гц
Регулируемый диапазон колебаний (ускорений)	1...9 g
Режимы работы	1 режим интенсивности (с плавной регулировкой амплитуды)
Габаритные размеры (Д × Ш × В)	140 × 150 × 120 мм

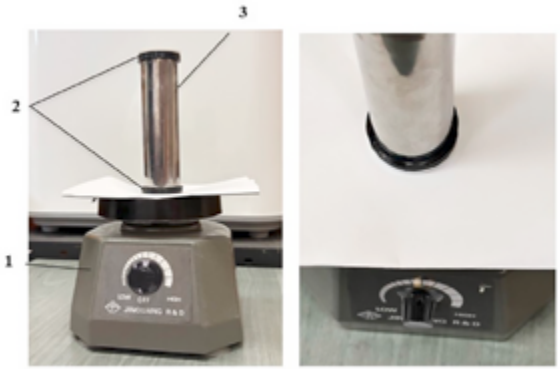


Рисунок 7. Проверка изделия на герметичность: 1 — вибростол; 2 — изготовленные заглушки; 3 — труба
Figure 7. Leak test of the product: 1 — vibration table; 2 — manufactured plugs; 3 — pipe

и просачивание жидкости немедленно привели бы к образованию видимых мокрых следов на бумаге. По завершении цикла испытаний контрольный лист остался абсолютно сухим, что наглядно подтвердило надежность спроектированного двухкомпонентного уплотнения в условиях динамических нагрузок [12].

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования была успешно разработана и практически реализована технология изготовления двухкомпонентной заглушки, способной обеспечивать надежную герметизацию в условиях вибрационных нагрузок. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Комбинирование жесткого полилактида (PLA) и термопластичного эластомера (TPU) в одной детали позволило нивелировать недостатки мономатериалов. PLA обеспечил необходимую конструкционную прочность и надежность резьбового соединения, а интегрированный контур из TPU выполнил функцию демпфера и герметика.

Использование 3D-принтера с системой независимых двойных экструдеров (IDEX) оказалось оптимальным решением для печати разнородными полимерами в едином цикле. Тщательная калибровка и корректный подбор параметров печати (скорости, температурных режимов и др.) обеспечили стабильную подачу гибкого филамента и высокую межслойную адгезию на границе раздела жесткого и эластичного пластиков.

Доказана эксплуатационная надежность изделия. Стендовые испытания опытного образца с применением вибростола (при частоте 50 Гц и ускорениях до 9g) показали отсутствие протечек. Эластичный уплотнитель успешно компенсировал микронеровности и динамические колебания.

Предложенный подход демонстрирует высокую перспективность применения двухкомпонентной FDM-печати для оперативного производства сложных функциональных уплотнений. Данный метод позволяет отказаться от дорогостоящего изготовления пресс-форм и этапа ручной сборки деталей, что особенно актуально для задач мелкосерийного производства и ремонта оборудования химических заводов.

Исследования проводились в рамках научно-технического проекта, выполняемого образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь. Тема: «Модель машинно-аналитического комплекса и ее реализация на базе цифровых технологий при решении задач управления и прогнозирования качества в производстве целлюлозных композиционных материалов». Финансовое обеспечение проекта организуют Комитет по науке и высшей школе Правительства Санкт Петербурга и Государственный комитет науки и технологии Республики Беларусь.

Список литературы / References

1. Kruth J. P., Leu M. C. and Nakagawa T. (1998) 'Progress in additive manufacturing and rapid prototyping', CIRP Annals — Manufacturing Technology, 47, pp. 525–540.
2. Gibson I., Rosen D. W. and Stucker B. (2010) 'The use of multiple materials in additive manufacturing', in Additive Manufacturing Technologies. Springer US, pp. 436–449.
3. Wozniak M., Krason J., Kosucki A., Rylski A. and Siczek K. (2025) 'The effect of 3D printer head extruder design on dynamics and print quality', Applied Sciences, 15, 131406 https://doi. org/10.3390/app152413140.
4. Kim H., Park E., Kim S., Park B., Kim N. and Lee S. (2017) 'Experimental study on mechanical properties of single- and

dual-material 3D printed products', Procedia Manufacturing, 10, pp. 887–897.
5. Cahyati S. and Satriawan B. (2019) 'Ketelitian dimensi produk hasil proses modifikasi mesin FDM dual extruder', Prosiding Seminar Nasional Pakar, pp. 1–7, DOI: 10.25105/pakar. v0i0.4185.
6. Harris C. G., Jursik N. J. S., Rochefort W. E. and Walker T. W. (2019) 'Additive manufacturing with soft TPU — adhesion strength in multimaterial flexible joints', Frontiers in Mechanical Engineering, 5, 37, https://doi. org/10.3389/fmech. 2019.00037.
7. Espalin D., Muse D. W., MacDonald E. and Wicker R. B. (2014) '3D printing multifunctionality: structures with electronics', The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 72, pp. 963–978.
8. Brancewicz-Steinmetz E., Valverde Vergara R., Buzalski V. H. and Sawicki J. (2022) 'Study of the adhesion between TPU and PLA in multi-material 3D printing', Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 115 (2), pp. 49–56.
9. Singh R., Kumar R., Farina I., Colangelo F., Feo L. and Fraternali F. (2019) 'Multi-material additive manufacturing of sustainable innovative materials and structures', Materials, 12 (1), 152.
10. Tarrés N., Garcia-Romeu M. L. and Ferrer I. (2025) 'On the interlaminar bonding adhesion of the PLA-TPU printed multimaterial', The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
11. Haryńska A., Gubanska I., Kucinska-Lipka J. and Janik H. (2018) 'Fabrication and characterization of flexible medical-grade TPU filament for fused deposition modeling 3DP technology', Polymers, 10 (12), 1304.
12. Lei I. M., Sheng Y., Lei C. L., Leow C. and Huang Y. Y. S. (2022) 'A hackable, multi-functional, and modular extrusion 3D printer for soft materials', Scientific Reports, 12, 20165.

Информация об авторах

Мидуков Николай Петрович, *доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SCOPUS Author ID: 56530759600, Researcher ID: H-2514-2019; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-код 1021–6266, e-mail: mnp83@mail.ru.*

Худницкий Дмитрий Владиславович, *студент, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0009-0004-2024-9222, SPIN-code (РИНЦ): 3086–9764.*

Портнягина Елизавета Артёмовна, *студентка, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, 198095, ORCID: 0009-0003-7018-348X, SPIN-code (РИНЦ): 6338–9305.*

Information about the authors

Nikolai Petrovich Midukov, *Dr. Sci in Engeering, Associate Professor, Head of the Department of Chemical Technology Processes and Apparatus, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SCOPUS Author ID: 56530759600, Researcher ID: H-2514-2019; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-code: 1021–6266, e-mail: mnp83@mail.ru.*

Dmitry Vladislavovich Khudnitsky, *student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0009-0004-2024-9222, SPIN-code: 3086–9764.*

Elizaveta Artemovna Portnyagina, *student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0009-0003-7018-348X, SPIN-code: 6338–9305.*

Оргинальное практическое исследование
УДК: 66.061.35
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_32–36

МАСШТАБНЫЙ ПЕРЕХОД КОМБИНИРОВАННОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОЦЕССА ЖИДКОСТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ

Юрий Васильевич Козин[1], Михаил Георгиевич Беренгартен[2]

[1]Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина, г. Рязань, Россия
[2]Московский политехнический университет, Москва, Россия

© Козин Ю. В., Беренгартен М. Г., 2026

Автор-корреспондент: Ю. В. Козин, e-mail: yura_kozin@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается проблема повышения эффективности жидкостной экстракции путём комбинирования в одном аппарате тарельчатых и насадочных контактных устройств. Цель работы — разработка метода расчёта основных массообменных и гидравлических параметров комбинированного контактного устройства (ККУ), позволяющего исключить масштабный эффект и ускорить внедрение передового оборудования.

В теоретической части обоснован выбор моделей структуры потоков: для тарельчатой секции используется ячеечная модель, для насадочной — диффузионная. Экспериментально определены параметры моделей: число Пекле для насадочной секции составляет 15–25, эффективный коэффициент продольного перемешивания $D_{эф} = (0{,}4 – 0{,}6) \cdot 10^{-3}$ м^2/с. Показано, что наличие тарелок снижает продольное перемешивание в насадке в два раза по сравнению с чисто насадочной колонной.

На основе моделей и регрессионных зависимостей разработан алгоритм инженерного расчёта экстрактора с ККУ, включающий семь этапов: от ввода исходных данных до технико-экономической оценки. Установлено, что при оптимальном соотношении подачи экстрагента (0,4:0,6) высота эквивалентной теоретической тарелки (ВЭТТ) составляет 0,35–0,55 м, что на 20–50 % ниже, чем для традиционных устройств.

Полученные зависимости и алгоритм могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих экстракционных колонн в нефтеперерабатывающей, химической и нефтехимической промышленности.

Ключевые слова: жидкостная экстракция, жидкость-жидкость, массообмен, комбинированные контактные устройства, экстракционная колонна

Для цитирования: Козин Ю. В., Беренгартен М. Г. Масштабный переход комбинированного контактного устройства для процесса жидкостной экстракции // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 32–36. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_32–36.

SCALE-UP OF A COMBINED CONTACT DEVICE FOR LIQUID EXTRACTION

Yuri Vasilievich Kozin[1], Mikhail Georgievich Berengarten[2]

[1]Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin, Ryazan, Russia
[2]Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Corresponding author: Yu. V. Kozin, e-mail: yura_kozin@mail.ru

ABSTRACT

The paper addresses the problem of enhancing liquid extraction efficiency by combining tray and packed contacting devices within a single apparatus. This work aims to develop a method for calculating the main mass-transfer and hydraulic parameters of a combined contact device (CCD) to eliminate the scale effect and speed up the adoption of advanced equipment.

In the theoretical part, the selection of flow structure models is substantiated. A cell model is employed for the tray section, whereas a diffusion model is employed for the packed section. The parameters of the models were determined experimentally: the Peclet number for the packed section is in the range of 15–25, and the effective longitudinal mixing

coefficient D_{eff}=(0.4–0.6) × 10^{-3} m^2/s. It is shown that the presence of trays reduces longitudinal mixing in the packing by half compared to a purely packed column.
Based on the models and regression dependencies, a seven-stage engineering calculation algorithm for an extractor with a CCD has been developed, from input data entry to technical and economic evaluation. It was found that at the optimal extractant feed ratio (0.4:0.6), the height equivalent to a theoretical plate (HETP) is 0.35–0.55 m, which is 20–50 % lower than in conventional devices.
The derived dependencies and the algorithm can be used to design new and upgrade existing extraction columns in refining, chemical, and petrochemical industries.

Keywords: liquid extraction, liquid-liquid, mass transfer, combined contact devices, extraction column

For citation: Kozin Yu. V., Berengarten M. G. (2026) 'Scale-up of a combined contact device for liquid extraction', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 32–36. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_32–36.

ВВЕДЕНИЕ

В промышленных установках экстракции систем жидкость—жидкость используются в основном аппараты с одним типом контактного устройства тарелки или насадка, для которых достаточно разработаны методики и алгоритмы расчетов [1]. Одним из направлений повышении эффективности существующих жидкостных экстракторов является комбинация в одном аппарате различных типов контактных устройств. Методики расчета основных массообменных и гидравлических характеристик комбинированных контактных устройств недостаточны [2, 3]. Существующие разработанные методы относятся к лабораторным образцам жидкостных экстракторов и описаны эмпирическими уравнениями. Данный недостаток не позволяет исключить масштабный эффект и переходить с лабораторных образцов оборудования к промышленным [4, 6]. Целью данной работы является разработка метода расчета основных массообменных и гидравлических параметров для комбинированных контактных устройств, исключение масштабного эффекта, ускорение внедрения передовых типов оборудования в промышленности.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

ВЭТТ — высота эквивалентной теоретической тарелки;
ВЭП — высота единицы переноса;
ККУ — комбинированное контактное устройство;
Pe — число Пекле;
M — коэффициент массопередачи;
n — число единиц переноса;
$N_{яч}$ — число ячеек;
$D_{эф}$ — эффективный коэффициент продольного перемешивания, $м^2/с$;
C — концентрация распределяемого компонента, $кг/м^3$;
W — скорость потока, м/с;
r — скорость массопереноса, $кг/ (м^3 \cdot с)$;
z — координата по высоте, м.
$n_{тар}$ — число тарелок, ед.;
L — расход исходного сырья (легкой фазы), кг/ч;
$X_н$ — начальная концентрация целевого компонента в сырье, мас. %;
$X_к$ — требуемая конечная концентрация в рафинате, мас. %;
T — температура процесса, К;
m — коэффициент распределения;
G_{min} — минимальный расход экстрагента, $м^3/ч$;
$N_т$ — число теоретических ступеней разделения, ед.;
Dэф — эффективный коэффициент продольного перемешивания, м/с;
R^2 — коэффициент детерминации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Эффективность работы массообменного аппарата в системе «жидкость—жидкость» в значительной степени определяется гидродинамической обстановкой, а именно — структурой потоков контактирующих фаз [6]. Отклонение от идеальной модели противотока (поршневого течения) приводит к снижению движущей силы массообмена и, как следствие, к уменьшению реальной эффективности разделения по сравнению с теоретически достижимой [7]. Поэтому при разработке методики расчёта комбинированного контактного устройства (ККУ) необходимо обоснованно выбрать математические модели, описывающие продольное перемешивание в тарельчатой и насадочной секциях.

Для количественного описания продольного перемешивания в насадочной секции ККУ используется диффузионная модель. Как показано в фундаментальных работах [8, 9], ключевыми параметрами этой модели являются:

- диффузионное число Пекле (Pe);
- коэффициент массопередачи (M);
- число единиц переноса (n);

Определены следующие диапазоны чисел Pe для разработанного ККУ:

- для насадочной секции: Pe = 15÷25;

– для тарельчатой секции (ячеечная модель): число ячеек $N_{яч}$ равно числу тарелок, что соответствует эффективному Pe = 10–15.

Сравнение полученных значений с данными для традиционных насадочных колонн (Pe = 8–12) показывает, что применение ККУ позволяет снизить продольное перемешивание на 30–40 %, что прямо коррелирует с повышением эффективности массообмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На основании экспериментальных исследований структуры потоков было установлено, что для ККУ в целом справедлива комбинированная модель: тарельчатая секция описывается ячеечной моделью, а насадочная — диффузионной. Параметры моделей структуры потоков для различных типов контактных устройств приведены в таблице.

Как следует из таблицы, наличие тарелок перед насадочной секцией приводит к «обнулению» профиля концентраций и снижению эффективного коэффициента продольного перемешивания в насадке примерно в два раза по сравнению с чисто насадочной колонной. Это объясняется тем, что тарелки выступают в роли перераспределителей потока, устраняя неравномерности, возникшие в нижележащих слоях насадки [10].

Для количественного описания продольного перемешивания в насадочной секции ККУ используется диффузионная модель, которая для стационарного противоточного течения записывается в виде [9]:

$$D_{эф}\frac{d^2C}{dz^2} - w\frac{dC}{dz} + r = 0, \qquad (1)$$

где $D_{эф}$ — эффективный коэффициент продольного перемешивания, м²/с;
C — концентрация распределяемого компонента, кг/м³;
w — скорость потока, м/с;
r — скорость массопереноса, кг/ (м³·с);
z — координата по высоте, м.

Экспериментально установлено, что для ККУ при оптимальном соотношении подачи экстрагента (0,4 : 0,6) число Пекле составляет 15–25, что свидетельствует о режиме, близком к идеальному вытеснению (Pe → ∞). Для сравнения: в чисто насадочной колонне того же диаметра Pe = 8–12.

Для тарельчатой секции ККУ используется ячеечная модель, в которой число ячеек полного смешения $N_{яч}$ приближённо равно числу тарелок $n_{тар}$.

Таким образом, предложенная комбинированная модель (ячеечная для тарельчатой секции + диффузионная для насадочной) адекватно описывает гидродинамическую обстановку в разработанном ККУ. Эта модель положена в основу расчетов ВЭТТ, ВЕП и гидравлического сопротивления

АЛГОРИТМ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ЭКСТРАКТОРА С ККУ

На основе разработанных моделей и полученных регрессионных зависимостей составлен алгоритм инженерного расчёта экстрактора с комбинированным контактным устройством. Алгоритм предназначен для определения основных геометрических размеров аппарата (диаметра, высоты) и режимных параметров (расходов фаз) при заданной производительности и требуемой степени извлечения целевого компонента [11].

Алгоритм включает следующие этапы:

Этап 1. Ввод исходных данных. Задаются: расход исходного сырья (легкой фазы) L, кг/ч; начальная концентрация целевого компонента в сырье $X_н$, мас. %; требуемая конечная концентрация в рафинате $X_к$, мас. %; физико-химические свойства фаз; температура процесса T, К.

Этап 2. Расчёт равновесия. По формуле рассчитывается коэффициент распределения $m = 0{,}00192T2 - -1{,}3078T + 232{,}56$. Определяется минимальный расход экстрагента G_{min} из материального баланса.

Этап 3. Выбор соотношения подачи экстрагента. На основании экспериментальных данных принимается

Таблица. Параметры моделей структуры потоков для различных типов контактных устройств
Table. Flow Structure Model Parameters for Various Contact Device Types

Тип контактного устройства	Модель	$N_{яч}$, ед.	$D_{эф}$, м²/с
Тарельчатый (5 тарелок)	Ячеечная	4,5 – 5,5	–
Насадочный (регулярная насадка, H=1 м)	Диффузионная	–	$(0{,}8 – 1{,}2)\cdot10^{-3}$
ККУ (5 тарелок+насадка 1 м)	Комбинированная	4,8 – 5,2 (в тарельч. секции)	$(0{,}4 – 0{,}6)\cdot10^{-3}$ (в нас. секции)

оптимальное соотношение подачи экстрагента: 40 % на тарелки, 60 % на насадку [12].

Этап 4. Расчёт числа теоретических ступеней. Построением рабочей и равновесной линий (или аналитическим методом) определяется число теоретических ступеней разделения $N_т$.

Этап 5. Расчёт ВЭТТ и высоты колонны. Рассчитывается значение ВЭТТ для ККУ с учётом режимных параметров. Высота массообменной зоны:

$$H = \text{ВЭТТ} \cdot N_т. \quad (2)$$

Общая высота колонны принимается с учётом отстойных зон и конструктивных запасов.

Этап 6. Проверка по гидравлическому сопротивлению. Рассчитывается суммарное гидравлическое сопротивление ККУ.

Этап 7. Технико-экономическая оценка. Рассчитываются капитальные затраты (металлоёмкость) и эксплуатационные расходы (энергопотребление на перекачивание фаз, расход экстрагента, затраты на регенерацию). Оценивается срок окупаемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована применимость комбинированной модели структуры потоков для разработанного ККУ: тарельчатая секция описывается ячеечной моделью, насадочная секция — диффузионной моделью (эффективный коэффициент продольного перемешивания Dэф = (0,4 – 0,6) · 10^{-3} м^2/с). Наличие тарелок снижает Dэф в насадке в 2 раза по сравнению с чисто насадочной колонной. Для количественного описания продольного перемешивания ключевыми параметрами этой модели являются: диффузионное число Пекле (Pe), коэффициент массопередачи (M), число единиц переноса (n).

2. Предложенная комбинированная модель (ячеечная для тарельчатой секции + диффузионная для насадочной) адекватно описывает гидродинамическую обстановку в разработанном ККУ. Эта модель положена в основу расчетов ВЭТТ, ВЕП и гидравлического сопротивления. Установлено, что при оптимальном соотношении подачи растворителя в экстрактор (0,4:0,6) ВЭТТ составляет 0,35–0,55 м, что на 20–50 % ниже, чем для традиционных контактных устройств.

3. В целях исключения масштабного эффекта впервые для жидкостных экстракторов с комбинированными контактными устройствами предложена методика инженерного расчета на основе разработанных моделей и полученных в результате экспериментов регрессионных зависимостей. Полученные зависимости и алгоритм могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих экстракционных колонн для систем «жидкость—жидкость» в нефтеперерабатывающей, химической и нефтехимической промышленности.

Список литературы

1. Карпеев С. В. Расчет процесса экстракции в системе жидкость—жидкость. Пат. 2020613676 РФ. 2020.
2. Карпов С. А., Брендаков В. Н., Иванов К. А., Журавлев А. А. Математическая модель пульсационной экстракционной колонны // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2021. Т. 10. № 2. С. 168.
3. Лаптев А. Г., Данилов В. А., Аюпов Л. Г. Модель процесса экстракции на ситчатой тарелке с учетом особенностей взаимодействия фаз // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38. № 5. С. 532.
4. Кошевой Е. П., Блягоз Х. Р., Сиюхов Х. Р., Схаляхов А. А., Чундышко В. Ю. Универсальная установка для экстракции двуокисью углерода // Изв. вузов. пищ. технология. 1999. № 4. С. 67.
5. Самаров А. А., Володина Н. Ю., Приходько И. В., Тойкка А. М. Фазовое равновесие в системах трет-бутанол-метил-трет-бутиловый эфир с глубокими эвтектическими растворителями на основе хлорида холина // Тонкие химические технологии. 2026. Т. 21. № 1. С. 7.
6. Романова В. В., Абиев Р. Ш. Исследование массопереноса в системе жидкость-жидкость в микроканалах: роль частоты циркуляции // Тез. докл. ПАХТ-2025. Материалы Международного научно-практического семинара, посвященного 100-летию со дня рождения Ю. И. Дытнерского. М.: Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2025. С. 471.
7. Романова В. В., Абиев Р. Ш. Исследование массообмена в двухфазном потоке при снарядном режиме течения системы жидкость-жидкость в микрореакторе // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2025. № 72. С. 73
8. Лаптев А. Г. Модели переноса и эффективность жидкостной экстракции. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2005.
9. Phillip C. Wankat. Separation process engineering: includes mass transfer analysis. 3rd. Edition. Westford: Pearson Education, 2012.
10. Беренгартен М. Г., Козин Ю. В.. Экспериментальное изучение структуры потоков в тарельчато-насадочных колонных экстракторах // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Том 84. № 2. С. 228.
11. Козин Ю. В., Беренгартен М. Г. Разработка новой конструкции жидкостного экстрактора колонного типа // Промышленные процессы и технологии. 2024. Том 4. № 1 (11). С. 77.

12. Беренгартен М. Г., Козин Ю. В. Жидкостный экстрактор колонного типа. Пат. 213134 РФ. 2022.

References

1. Karpeev S. V. (2020) Calculation of the extraction process in a liquid-liquid system. Patent 2020613676 RF.
2. Karpov S. A., Brendakov V. N., Ivanov K. A. and Zhuravlev A. A. (2021) 'Mathematical model of a pulsating extraction column', Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI, 10 (2), p. 168.
3. Laptev A. G., Danilov V. A. and Ayupov L. G. (2004) 'Model of the extraction process on a sieve plate taking into account the features of phase interaction', Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 38 (5), p. 532.
4. Koshevoi E. P., Blyagoz Kh. R., Siyukhov, Kh. R., Skhalyakhov A. A. and Chundyshko V. Yu. (1999) 'Universal unit for carbon dioxide extraction', Proceedings of Universities. Food Technology, (4), p. 67.
5. Samarov A. A., Volodina N. Yu., Prikhod'ko I. V. and Toikka A. M. (2026) 'Phase equilibrium in tert-butanol — methyl tert-butyl ether systems with deep eutectic solvents based on choline chloride', Fine Chemical Technologies, 21 (1), p. 7.
6. Romanova V. V. and Abiev R. Sh. (2025) 'Study of mass transfer in a liquid-liquid system in microchannels: the role of circulation frequency', in Abstracts of PAKhT-2025. Proceedings of the International Scientific and Practical Seminar dedicated to the 100th anniversary of the birth of Yu. I. Dytnersky. Moscow: Russian Chemical-Technological University named after D. I. Mendeleev, p. 471.
7. Romanova V. V. and Abiev R. Sh. (2025) 'Study of mass transfer in a two-phase flow under slug flow regime of a liquid-liquid system in a microreactor', Proceedings of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), (72), p.
8. Laptev A. G. (2005) Transport models and efficiency of liquid extraction. Kazan: Kazan State Power Engineering University.
9. Wankat P. C. (2012) Separation process engineering: includes mass transfer analysis. 3rd edn. Westford: Pearson Education.
10. Berengarten M. G. and Kozin Yu. V. (2022) 'Experimental study of flow structure in tray-packed column extractors', Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies, 84 (2), p. 228.
11. Kozin Yu. V. and Berengarten M. G. (2024) 'Development of a new design of a column-type liquid extractor', Industrial Processes and Technologies, 4 (1/11), p. 77.
12. Berengarten M. G. and Kozin Yu. V. (2022) Column-type liquid extractor. Patent 213134 RF.

Информация об авторах

Козин Юрий Васильевич, *соискатель, специалист по обеспечению образовательного процесса, кафедра химических технологий, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина; 390005, Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1; SPIN-код: 8863–6675, Author ID (РИНЦ): 1102297, ORCID: 0000-0002-8230-0503; e-mail: yura_kozin@mail.ru.*

Беренгартен Михаил Георгиевич, *кандидат химических наук, профессор кафедры аппаратурного оформления и автоматизации технологических производств, Московский политехнический университет (Московский Политех), 107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38; SPIN-код: 2986–5705, Author ID (РИНЦ): 52408, ORCID: 0000-0002-0282-8202; e-mail: berengarten@mail.ru.*

Information about the authors

Kozin Yuri Vasilyevich, *PhD Candidate, Specialist in Educational Process Support, Department of Chemical Technologies, Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin; 59/1 Gagarina St., Ryazan, 390005, Russia; SPIN-code: 8863–6675, Author ID (RSCI): 1102297, ORCID: 0000-0002-8230-0503; e-mail: yura_kozin@mail.ru.*

Berengarten Mikhail Georgievich, *PhD in Chemistry, Professor of the Department of Equipment Design and Automation of Technological Productions, Moscow Polytechnic University (Moscow Polytech), 38 Bolshaya Semenovskaya St., Moscow, 107023, Russia; SPIN-code: 2986–5705, Author ID (RSCI): 52408, ORCID: 0000-0002-0282-8202; e-mail: berengarten@mail.ru.*

Оригинальное практическое исследование
УДК 62-52, 681.516.42
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_37–43

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЛИНИИ ОБЕЗЖИРИВАНИЯ И ПРОМЫВКИ

Никита Александрович Гончаров, Александр Игоревич Кушнеров

Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Гончаров Н. А., Кушнеров А. И., 2026

Автор-корреспондент: Н. А. Гончаров, e-mail: goncharovnikitaspb@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты разработки системы управления автоматизацией линии обезжиривания и промывки алюминиевой ленты на прокатном производстве в контексте задачи ресурсной эффективности прокатных производств. В процессе холодной прокатки алюминиевых заготовок на их поверхности гарантированно оседают остатки технологических смазочно-охлаждающих жидкостей и мелкая металлическая пыль. Недостаточная автоматизация этапа химической подготовки поверхности приводит к перерасходу химических реагентов, выносу агрессивных компонентов в промывную воду и образованию токсичных стоков, а также повышает риск возникновения неисправимого брака продукции при последующих этапах обработки. Проведен детальный анализ существующей системы управления, выявивший ключевые недостатки: ручное дозирование моющих средств, ручной контроль температуры и отсутствие непрерывного мониторинга водородного показателя (pH) и электропроводности растворов. Для решения указанных проблем спроектирована двухуровневая система автоматизации на базе программируемого логического контроллера ОВЕН ПЛК210–01 и панели оператора ОВЕН СП310-Р. Программная часть реализована в среде CODESYS 3.5 с использованием языков стандарта МЭК 61131–3 (LD, FBD, ST). Разработан цифровой ПИД-регулятор с алгоритмами фильтрации сигналов и ограничения интегрального насыщения, обеспечивающий стабилизацию температуры и уровня жидкости в ваннах объемом 10 м³. Созданный HMI-интерфейс обеспечивает визуализацию мнемосхем, ведение трендов и журналов аварий. Внедрение предложенных решений позволило исключить человеческий фактор, снизить удельный расход пара, воды и моющих концентратов, а также свести к минимуму объемы образования жидких отходов.

Ключевые слова: автоматизация, прокатное производство, алюминиевая лента, обезжиривание и промывка, ПИД-регулятор, CODESYS 3.5, ОВЕН ПЛК210, HMI, импортозамещение

Для цитирования: Гончаров Н. А., Кушнеров А. И. Разработка системы управления для линии обезжиривания и промывки // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 37–43. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_37–43.

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR A DEGREASING AND RINSING PRODUCTION LINE

Nikita Alexandrovich Goncharov, Alexander Igorevich Kushnerov

Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: N. A. Goncharov, e-mail: goncharovnikitaspb@gmail.com

ABSTRACT

This article presents the results of the development of an automation control system for the aluminium strip degreasing and rinsing line in rolling production, in the context of resource efficiency in rolling operations. During cold rolling of aluminium stock, residual lubricating-cooling fluids and fine metal dust are deposited on its surface without fail. Inadequate automation of chemical surface preparation results in overconsumption of chemicals, the transfer of aggressive components into rinsing water, and the generation of toxic wastewater. It also raises the risk of irremediable product defects during downstream processing. A detailed review of the existing control system identified three key gaps: manual detergent dosing, manual temperature control, and no continuous pH or conductivity monitoring. To overcome these problems, we designed a two-level automation system using the OWEN PLC210–01 programmable logic

controller and the OWEN SP310-R operator panel. The software was implemented in the CODESYS 3.5 environment using IEC 61131–3 standard languages (LD, FBD, ST). A digital PID controller was developed with signal filtering and integral anti-windup algorithms, providing temperature and liquid level stabilization in 10 m³ baths. The HMI interface that was created provides for the visualization of mimic diagrams, the maintenance of trends, and alarm journals. The implementation of the proposed solutions eliminated the human factor, reduced the specific consumption of steam, water, and cleaning concentrates, and minimized the volume of liquid waste generated.

Keywords: automation, rolling production, aluminum strip, degreasing and washing, PID controller, CODESYS 3.5, OWEN PLC210, HMI, import substitution

For citation: Goncharov N. A. and Kushnerov A. I. (2026) 'Development of a control system for a degreasing and rinsing production line', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 37–43. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_37–43.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развитие тяжелой и цветной металлургии тесно связано с принципами рационального использования сырья и энергоносителей [1, 2]. В процессе холодной прокатки алюминиевых лент на их поверхности неизбежно остаются следы технологических смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и мелкодисперсная металлическая пыль [3]. Отсутствие глубокой и качественной очистки перед последующими технологическими переделами — в частности, перед отжигом, нанесением защитных лаков или покраской — приводит к образованию неисправимого брака (появлению пригорающих пятен нагара, отслаиванию лакокрасочных покрытий) [4].

Традиционно участки обезжиривания и промывки характеризуются высокой степенью инерционности, а также значительным потреблением тепловой энергии, чистой умягченной воды и агрессивных моющих концентратов. При ручном или полуавтоматическом управлении регулирование параметров (температуры, уровня и концентрации растворов) осуществляется дискретно или на основе периодических лабораторных анализов [5]. Это вызывает температурные колебания, перерасход пара и систематическое перерегулирование подающих клапанов [6]. Дополнительным вызовом является необходимость обеспечения технологического суверенитета промышленного сектора и отказ от зарубежных управляющих комплексов (например, Siemens) в пользу отечественных программно-аппаратных платформ [7, 8].

Целью работы является проектирование и разработка автоматизированной системы управления линией обезжиривания и промывки алюминиевой ленты на базе отечественного оборудования, обеспечивающей стабилизацию параметров очистки, снижение экологической нагрузки и экономию ресурсов [9, 10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступает технологический комплекс подготовки поверхности алюминиевых лент на прокатном производстве. Линия включает в себя секцию обезжиривания и последовательные ванны промывки. Рабочий объем каждой ванны составляет около 10 м³. Технологический регламент предусматривает запуск и наполнение ванн до уровня 600 мм, что соответствует объему 8 м³ (80% от полного заполнения) [1, 3].

Для подогрева растворов до рабочих температур используются встроенные теплообменники с подачей греющего пара через регулирующие клапаны. В таблице приведены основные технологические параметры процесса обезжиривания и промывки.

В рамках модернизации разработана двухуровневая структура АСУ ТП:

1. Нижний и средний уровни: первичные датчики уровня (LT), давления (PI, PE), температуры (TE), кондуктометры (QT) и pH-метры. В качестве головного контроллера выбран отечественный ПЛК210–01 компании «ОВЕН» (Master сети), работающий в связке с модулями расширения

Таблица. Технологические параметры и контролируемые величины линии обезжиривания и промывки
Table. Process parameters and controlled variables of the degreasing and rinsing line

Технологическая зона	Рабочий диапазон температур, °C	Рекомендуемая (уставка), °C	Контролируемые параметры
Ванна обезжиривания	55–75	65	Уровень (LT), температура (TE), pH, проводимость (QT)
Ванна промывки	60–80	70	Уровень (LT), температура (TE), давление подачи (PI)

ввода-вывода MB210 (Slave) по протоколу Modbus TCP (Ethernet).

2. Верхний уровень (HMI): сенсорная панель оператора ОВЕН СП310-Р, запрограммированная в среде «Конфигуратор СП300».

Программное обеспечение контроллера разработано в среде CODESYS 3.5. Для построения алгоритмов использована комбинация языков стандарта МЭК 61131–3: дискретная логика, аварийные блокировки и режимы работы реализованы на языке лестничных диаграмм (LD) и Structured Text (ST), а непрерывное ПИД-регулирование — на языке функциональных блоковых диаграмм (FBD) [11, 12]. Ниже на рисунках 1 и 2 представлены функционально-технологическая схема системы, а также структурная схема из визуализации HMI.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполнения работы в среде CODESYS 3.5 на языке функциональных блоковых диаграмм (FBD) и Structured Text (ST) была разработана программная структура контроллера ОВЕН ПЛК210–01 [13, 14]. Ключевым модулем программного обеспечения является дискретный ПИД-регулятор с встроенным алгоритмом скользящего среднего для фильтрации аналоговых сигналов с датчиков температуры. Блок-схема управляющего алгоритма представлена на рисунке 3.

Разработанный алгоритм обеспечивает плавный выход температуры технологических растворов в ваннах обезжиривания (65 °С) и промывки (70 °С) на заданные уставки без существенного перерегулирования и с точностью поддержания ±0,5 °С.

Для обеспечения оперативного управления и контроля технологического процесса в среде «Конфигуратор СП300» создан человеко-машинный интерфейс (HMI) для сенсорной панели ОВЕН СП310-Р. На рисунках 4 и 5 представлены ключевые экраны, на которых отображаются в реальном времени текущие значения уровней, температур, показания pH-метров и других, а также анимация работы насосного оборудования и положение регулирующих клапанов подачи пара.

Информационный блок верхнего уровня включает также подсистемы архивирования данных и аварийной сигнализации. На рисунке 6 представлен экран

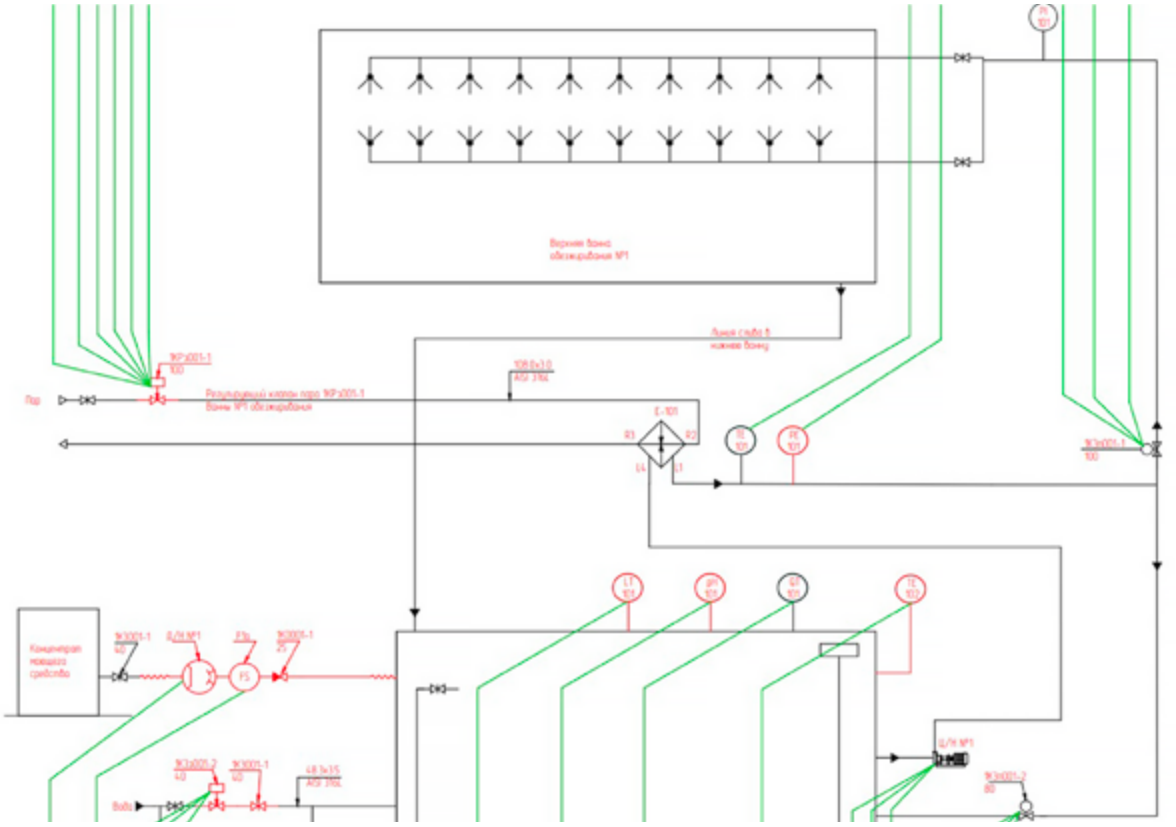


Рисунок 1. Функционально-технологическая схема системы
Figure 1. Functional and technological scheme of the system

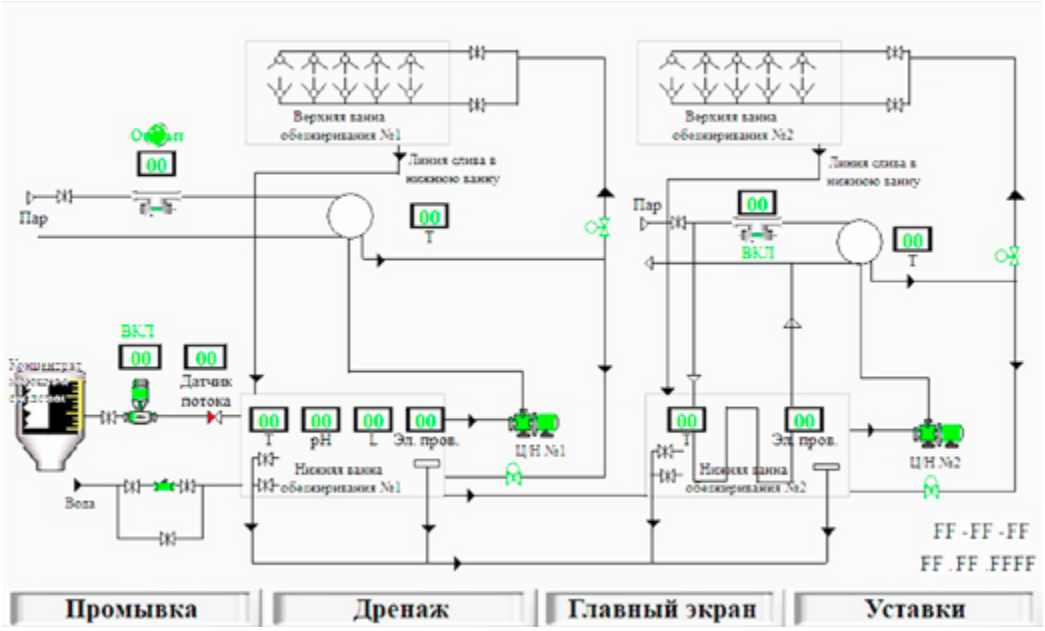


Рисунок 2. Структурная схема системы
Figure 2. Block diagram of the system

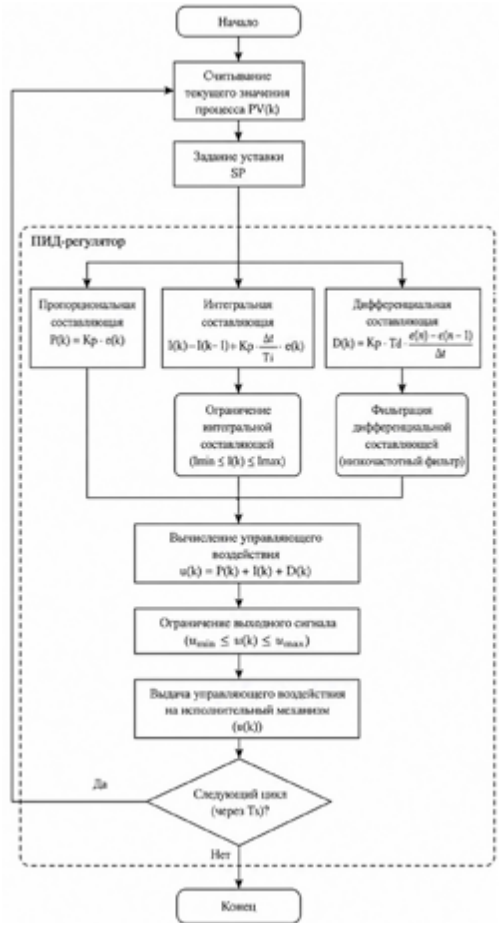


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма ПИД-регулирования
Figure 3. Flowchart of the PID control algorithm

мониторинга трендов и журнала событий. Ведение непрерывного графического анализа параметров pH и электропроводности позволило своевременно корректировать дозирование моющих реагентов и объемы подпитки свежей умягченной водой, что сократило образование токсичных жидких стоков.

Внедрение разработанного программно-аппаратного комплекса на базе отечественного оборудования позволило полностью исключить влияние человеческого фактора при регулировании параметров, снизить удельный расход греющего пара на 12–15 % и оптимизировать расход химических концентратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была разработана двухуровневая автоматизированная система управления линией обезжиривания и промывки алюминиевой ленты на базе отечественного аппаратного и программного обеспечения.

Ключевыми результатами проведенного исследования и разработки стали: проектирование функциональной структуры и комплекса технических средств нижнего и среднего уровней на базе ПЛК ОВЕН ПЛК210–01 и модулей ввода-вывода серии МВ210, связанных по протоколу Modbus TCP, а также создание программного обеспечения в среде CODESYS 3.5 с использованием языков МЭК 61131–3 (ST, FBD, LD), включающего алгоритмы цифровой фильтрации сигналов, дискретного



Рисунок 4. Главный экран
Figure 4. Main screen

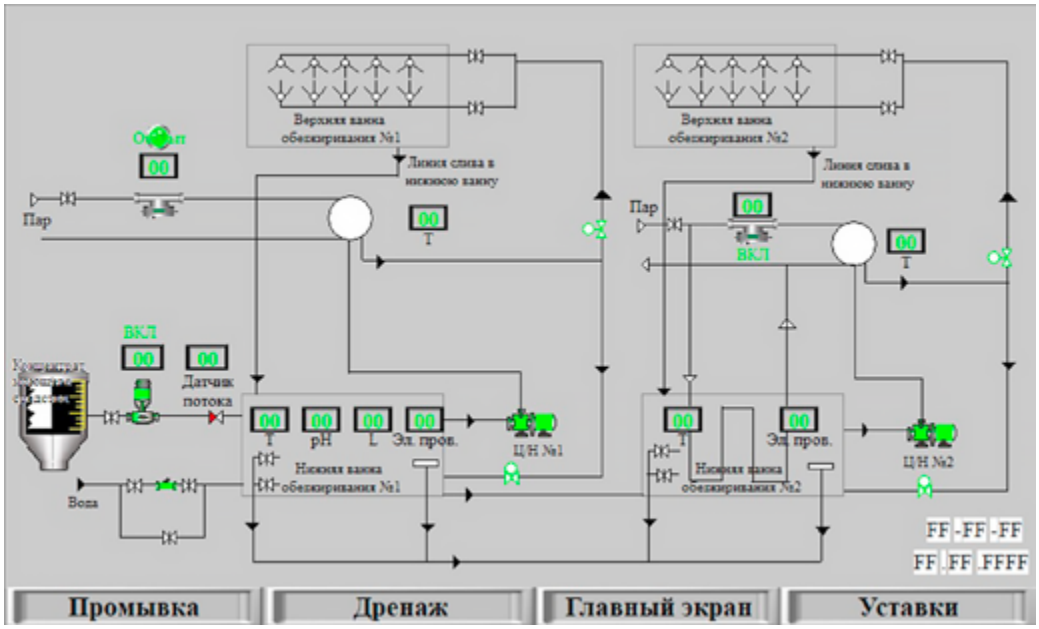


Рисунок 5. Экран визуализации линии обезжиривания
Figure 5. Visualization screen of the degreasing line

ПИД-регулирования и защиты от интегрального насыщения (anti-windup). Разработанный алгоритм обеспечивает поддержание заданной температуры растворов с точностью до ±0,5 °С.

Кроме того, в среде «Конфигуратор СП300» был разработан человеко-машинный интерфейс (HMI) для сенсорной панели ОВЕН СП310-Р, обеспечивающий наглядное отображение мнемосхем, ведение непрерывных трендов и функционирование подсистемы аварийных сообщений. Переход на непрерывный контроль pH и электропроводности растворов позволил оптимизировать дозирование моющих реагентов, исключить влияние человеческого фактора, снизить удельный расход греющего пара на 12–15% и минимизировать объем образования токсичных сточных вод.

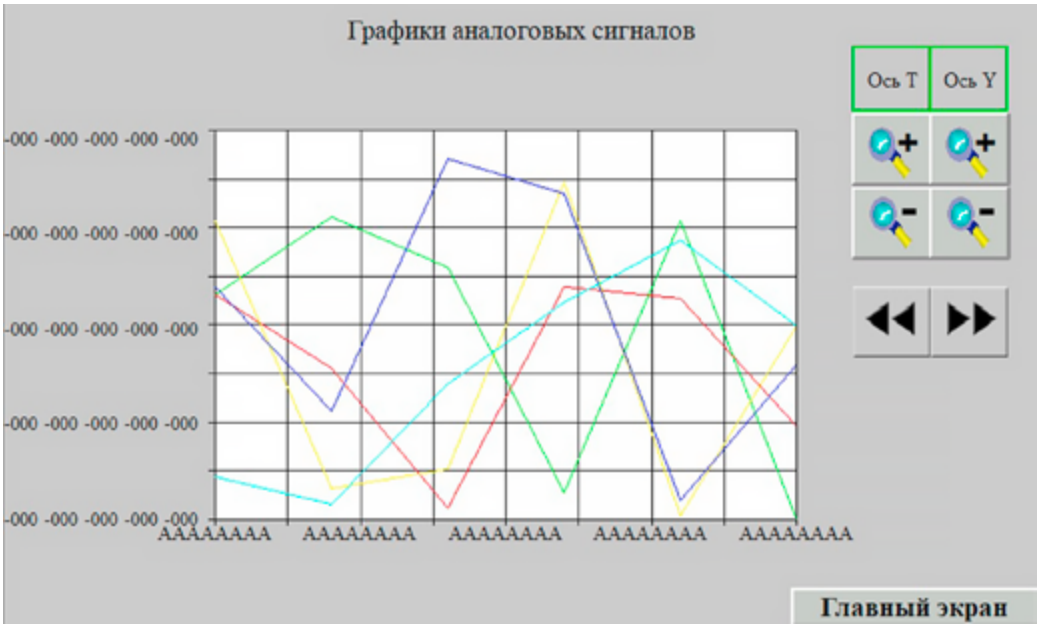


Рисунок 6. Экран трендов технологических параметров
Figure 6. Trend screen of technological parameters

Реализованные технические решения полностью соответствуют требованиям импортозамещения, обеспечивая ресурсосбережение и высокую надежность технологического процесса прокатного производства.

Список литературы

1. Лахтин Ю. М., Металловедение и термическая обработка металлов: 5-е изд., перераб. и доп. Москва.: АльянсС, 2015. 448 с.
2. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП. Проектирование и разработка / Ю. Н. Федоров. 3-е изд. М.: Инфра-Инженерия, 2022. 929 с.
3. ГОСТ 34.601–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. — Взамен ГОСТ 24.601–86; введ. 1992-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 9 с.
4. Деменков Н. П., Васильев Г. Н. Управление техническими системами: учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 577 с.
5. Шишов О. В. Программируемые логические контроллеры: учеб. пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2026. 461 с.
6. Контроллеры программируемые логические серии ПЛК210: каталог продукции / Компания ОВЕН. Москва. URL: https://owen. ru/catalog_pdf (дата обращения: 23.03.2026).
7. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И. В. Петров. М.: СОЛОН-Пресс, 2016. 255 с.
8. МЭК 61131–3. Программируемые контроллеры. Часть 3. Языки программирования. Международный стандарт. 2013.
9. Денисенко В. В. Пид регуляторы: принципы построения и модификации. URL: https://www. reallab. ru/images/editor/downloads/articles/Denisenko_PID_07.pdf (дата обращения 11.04.2026).
10. Костров Б. В., Кистрин А. В., Ефимов А. И. Технологии физического уровня передачи данных. Москва: Курс, 2020. С. 218.
11. Соловьев А. ПИД-регулятор: принцип работы, сферы применения, преимущества и недостатки / А. Соловьев. URL: https://kedrsolutions. ru/blog/pid-regulyatory-principy-raboty (дата обращения: 01.04.2026).
12. Денисенко В. В. Пид регуляторы: принципы построения и модификации. URL: https://www. reallab. ru/images/editor/downloads/articles/Denisenko_PID_07.pdf (дата обращения 11.04.2026).
13. Локтев Д. А., Локтев А. А. Возможность определения усталости оператора путем обработки серии его изображений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 6. С. 29–36.
14. Истомин А. Л., Кобозев В. Ю., Кривов М. В., Колмогоров А. Г. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, 2025. С. 7–16.

References

1. Lakhtin Yu. M. (2015) Metal Science and Heat Treatment of Metals: 5th edn., revised and enlarged. Moscow: Al'yansS. 448 p.
2. Fedorov Yu. N. (2022) Handbook of the Automation and Control Systems Engineer. Design and Development. 3rd edn. Moscow: Infra-Inzheneriya. 929 p.
3. GOST 34.601–90 (1990) Information Technology. Set of Standards for Automated Systems. Automated Systems. Stages of Creation. Instead of GOST 24.601–86; introduced 1992-01-01. Moscow: Izd-vo standartov. 9 p.
4. Demenkov N. P. and Vasil'ev G. N. (2013) Control of Technical Systems: Textbook. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana. 577 p.
5. Shishov O. V. (2026) Programmable Logic Controllers: Textbook. Moscow: NITs INFRA-M. 461 p.
6. OVEN Company (2026) Programmable Logic Controllers of the PLK210 Series: Product Catalogue. Moscow. Available at: https://owen. ru/catalog_pdf (Accessed: 23 March 2026).
7. Petrov I. V. (2016) Programmable Controllers. Standard Languages and Techniques of Applied Design. Moscow: SOLON-Press. 255 p.
8. IEC 61131–3 (2013) Programmable Controllers. Part 3. Programming Languages. International Standard.
9. Denisenko V. V. PID Controllers: Principles of Construction and Modifications. Available at: https://www. reallab. ru/images/editor/downloads/articles/Denisenko_PID_07.pdf (Accessed: 11 April 2026).
10. Kostrov B. V., Kristrin A. V. and Efimov A. I. (2020) Technologies of the Physical Layer of Data Transmission. Moscow: Kurs. P. 218.
11. Solov'ev A. P. ID Controller: Principle of Operation, Fields of Application, Advantages and Disadvantages. Available at: https://kedrsolutions. ru/blog/pid-regulyatory-princ ipy-raboty (Accessed: 1 April 2026).
12. Denisenko V. V. PID Controllers: Principles of Construction and Modifications. Available at: https://www. reallab. ru/images/editor/downloads/articles/Denisenko_PID_07.pdf (Accessed: 11 April 2026).
13. Loktev D. A. and Loktev A. A. (2021) 'The ability to determine operator fatigue by processing a series of their images', Instruments and systems. Control, monitoring, diagnostics, no. 6, pp. 29–36.
14. Istomin A. L., Kobozev V. Yu., Krivov M. V. and Kolmogorov A. G. (2025) Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics, pp. 7–16.

Информация об авторах

Гончаров Никита Александрович, *студент, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: goncharovnikitaspb@gmail.com.*

Кушнеров Александр Игоревич, *старший преподаватель кафедры прикладной математики и информатики, начальник экологического компьютерного центра, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 1281–6294, Author ID: 674824, ORCID: 0000-0001-5891-5172; e-mail: kushnerov.a.i@yandex.ru.*

Information about the authors

Goncharov Nikita Alexandrovich, *student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; e-mail: goncharovnikitaspb@gmail.com.*

Kushnerov Alexander Igorevich, *Senior Lecturer at the Department of Applied Mathematics and Informatics, Head of the Ecological Computer Center, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN code: 1281–6294, Author ID: 674824, ORCID: 0000-0001-5891-5172; e-mail: kushnerov.a.i@yandex.ru.*

Научная статья
УДК 551.583, 338.24
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_44–52

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИМИ РИСКАМИ ДЛЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Иван Владимирович Антонов, Арина Алексеевна Образцова

Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Антонов И. В., Образцова А. А., 2026

Автор-корреспондент: И. В. Антонов, e-mail: signalsb@yandex. ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты разработки структуры информационной системы управления климатическими рисками для территориально-производственных комплексов на примере Санкт-Петербурга. Первоначально были рассмотрены существующие тенденции в вопросе изучения изменения климата и возникающие последствия этого явления. Далее выделены и изучены климатические риски, причины появления и последствия их развития на территории Санкт-Петербурга. Сделан обзор материалов, в которых отражены последствия, произошедшие из-за изменения климата. Обобщены подходы и модели описания процессов развития и прогнозирования климатических рисков. Для управления данными процессами предложена информационная система управления климатическими рисками в Санкт-Петербурге, как возможного раздела государственной информационной системы в сфере охраны окружающей среды и природопользования «Экологический паспорт территории Санкт-Петербурга». Система состоит из двух блоков: информационный и моделирующий. Информационный блок системы реализуется на базе Microsoft Access и является реляционной базой геоданных. Моделирующий блок представляет собой набор математических моделей, описывающих те или иные процессы развития климатических рисков. При апробации системы рассмотрены результаты многолетних наблюдений за процессами изменения береговой линии Финского залива, и представлен процесс работы с информационной системой. Разработанная структура информационной системы управления климатическими рисками в Санкт-Петербурге может быть гармонично встроена в существующую ГИС и позволит накапливать, обобщать, анализировать и представлять в требуемом формате информацию о климатических рисках при принятии управленческих решений. Данная структура системы может быть использована для управления климатическими рисками при реализации мероприятий для любых рассматриваемых территориально-производственных комплексов.

Ключевые слова: климатические риски, информационная система управления, Санкт-Петербург, изменение климата, абразия

Для цитирования: Антонов И. В., Образцова А. А. Разработка структуры информационной системы управления климатическими рисками для территориально-производственных комплексов // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 44–52. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_44–52.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF AN INFORMATION SYSTEM FOR CLIMATE RISK MANAGEMENT FOR TERRITORIAL PRODUCTION COMPLEXES

Ivan Vladimirovich Antonov, Arina Alekseevna Obraztsova

Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: I. V. Antonov, e-mail: signalsb@yandex. ru

ABSTRACT

The article presents the results of developing the structure of an information system for managing climate risks for territorial and production complexes, using the city of Saint Petersburg as an example. Initially, existing trends in the study of climate change and the resulting consequences of this phenomenon were examined. Subsequently, climate risks, the causes of their emergence, and the consequences of their development in the territory of Saint Petersburg were identified and studied. A review of materials reflecting the consequences resulting from climate change was carried out. Approaches and models describing the processes of development and forecasting of climate risks have been summarized. To manage these processes, an information system for managing climate risks in the city of St. Petersburg has been proposed as a possible component of the state information system in the field of environmental protection and natural resource management — the "Environmental Passport of the St. Petersburg Territory". The system consists of two blocks: an information block and a modeling block. The information block of the system is implemented on the basis of Microsoft Access and represents a relational geodatabase. The modeling block is a set of mathematical models describing various processes related to the development of climate risks. During the testing of the system, the results of long-term observations of the processes of changes in the coastline of the Gulf of Finland were examined, and the process of working with the information system was presented. The developed structure of the information system for managing climate risks in the city of Saint Petersburg can be seamlessly integrated into the existing GIS and will make it possible to accumulate, generalize, analyze, and present information about climate risks in the required format when making management decisions. This system structure can be used to manage climate risks when implementing measures for any considered territorial and production complexes.

Keywords: climate risks, information management system, Saint Petersburg, climate change, abrasion

For citation: Antonov I. V., Obraztsova A. A. (2026) 'Development of the structure of an information system for climate risk management for territorial production complexes', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 44–52. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_44–52.

ВВЕДЕНИЕ

Антропогенное влияние приводит к истощению природных ресурсов, перемене ландшафтов, сокращению биологического разнообразия и изменению климата — все эти процессы необратимы [1, 2]. Если не снизить негативное воздействие на окружающую среду и не предусмотреть на территориях мероприятий для адаптации к грядущим изменениям, то человечество рискует лишиться многих природных ценностей. Основная причина изменения климата — быстрый рост среднегодовой температуры атмосферы Земли и Мирового океана, который ведёт к глобальному потеплению. В последнее время из-за стремительного развития экономики и промышленности количество парниковых газов стало очень высоким [3–5]. С целью адаптации к изменениям климата и минимизации антропогенного воздействия в Российской Федерации на федеральном и региональном уровнях принимаются оперативные и долгосрочные меры по реализации адаптационных мероприятий в соответствии с планами адаптации отрасли и/или субъекта. Особенно остро изменение климата проявляется в прибрежных районах, в частности, на территории Санкт-Петербурга.

Необходим новый способ адаптации территории Санкт-Петербурга к климатическим изменениям, который расширит область действия и наблюдений и поможет при решении управленческих задач и принятии важных конструкторских решений. При решении данного актуального вопроса ключевым становится создание информационной системы управления климатическими рисками в Санкт-Петербурге как возможного раздела государственной информационной системы в сфере охраны окружающей среды и природопользования «Экологический паспорт территории Санкт-Петербурга».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время в Санкт-Петербурге Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности используется государственная информационная система в сфере охраны окружающей среды и природопользования «Экологический паспорт территории Санкт-Петербурга». Данная система предназначена для хранения и представления органам исполнительной власти, конкретным организациям, гражданам информации: о состоянии окружающей среды и природно-ресурсном потенциале территории; об уровне техногенного воздействия на окружающую среду; о потенциально экологически опасных объектах; об объектах, подлежащих государственному экологическому контролю, осуществляемому исполнительными органами государственной власти Санкт-Петербурга; о природных и антропогенных процессах, представляющих потенциальную угрозу для жизни людей и хозяйственной деятельности на данной территории; о территориях, на которых действуют экологические ограничения на какие-либо виды хозяйственной деятельности [6].

В виду того, что Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности эксплуатирует данную систему, а с другой стороны, принимает участие в разработке регионального плана адаптации Санкт-Петербурга, то актуальной задачей является внедрение в существующую ГИС в сфере охраны окружающей среды и природопользования «Экологический паспорт территории Санкт-Петербурга» блока «Информационная система управления климатическими рисками в городе Санкт-Петербурге» [7, 8].

В исследовании была разработана структура блока «Информационная система управления климатическими рисками в городе Санкт-Петербурге». Данная система состоит из двух блоков: информационный и моделирующий. Общий вид ГИС в сфере охраны окружающей среды и природопользования «Экологический паспорт территории Санкт-Петербурга» с разработанным блоком показан на рисунке 1.

Информационный блок реализуется как база геоданных и включает различные связанные наборы классов объектов об антропогенном воздействии, информацию о водных объектах, подвергающихся негативному воздействию, и информационную часть о погодных условиях, требованиях законодательства, перечне мероприятий по адаптации к изменению климата. При проработке архитектуры моделирующего блока были изучены существующие модели, описывающие развитие тех или иных рисков. Рассматривались только те модели, которые уже реализованы в виде программных продуктов или описаны таким образом, чтобы можно было внедрить в информационную систему [9–12].

Моделирующий блок основан на десяти климатических рисках, которым присвоен определённый уровень опасности (рисунок 2). В данном блоке собран перечень, существующих на данный момент программ и математических моделей, по которым производят расчёт того или иного опасного явления.



Рисунок 1. Структура информационной системы управления климатическими рисками в Санкт-Петербурге (затонирована разработанная в исследовании система управления климатическими рисками в Санкт-Петербурге)

Figure 1. Structure of the climate risk management information system in Saint Petersburg (the climate risk management system for Saint Petersburg developed in this work is shaded)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На территории Санкт-Петербурга наиболее значимыми считаются 10 климатических рисков. У каждого риска есть свой класс опасности, который присваивается исходя из последствий, которые остаются после его проявления, чем сильнее влияние на человека, тем риск опаснее. Есть риск, который не имеет прямого влияния на людей, и по этой причине он не считается опасным, однако для окружающей среды он имеет огромное значение. Риск абразии — разрушение береговой линии, для Санкт-Петербурга как для города с большим количеством водоёмов и водотоков, а также береговой линией Финского залива, как раз и является значимым.

Если пренебрегать мерами по укреплению береговой полосы, то прибрежные территории будут отступать, а вместе с ними будет сокращаться разнообразие живых организмов прибрежной зоны, возникать аварийные случаи с разрушением ландшафтов, строений и инфраструктуры.

Как описывалось выше, информационный блок системы реализуется на базе Microsoft Access и представляет собой реляционную базу геоданных. Часть системы для описания риска абразии и планирования мероприятий по данному риску представляет собой набор из пяти классов объектов: водные объекты, точки контроля, данные мониторинга, перечень мероприятий, реализуемые

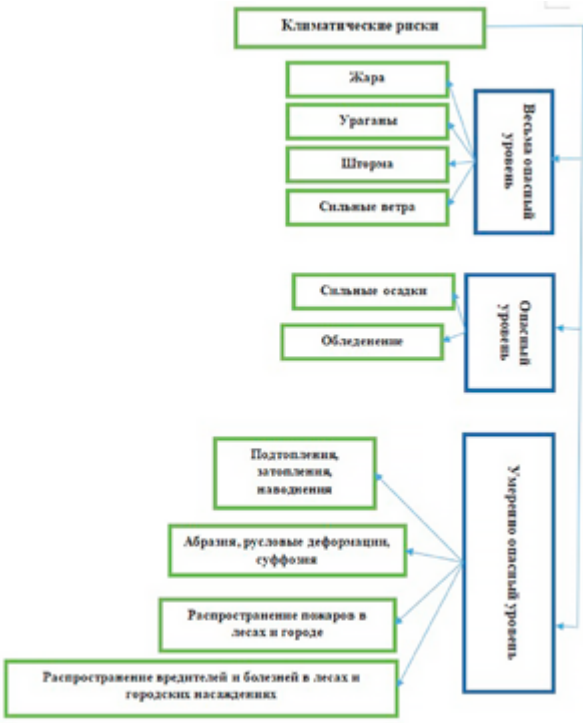


Рисунок 2. Часть блок-схемы. Основа таблицы База данных
Figure 2. Part of the flowchart. Basis of the Database table

мероприятия (рисунок 3). В качестве информации для наполнения базы геоданных использовались материалы

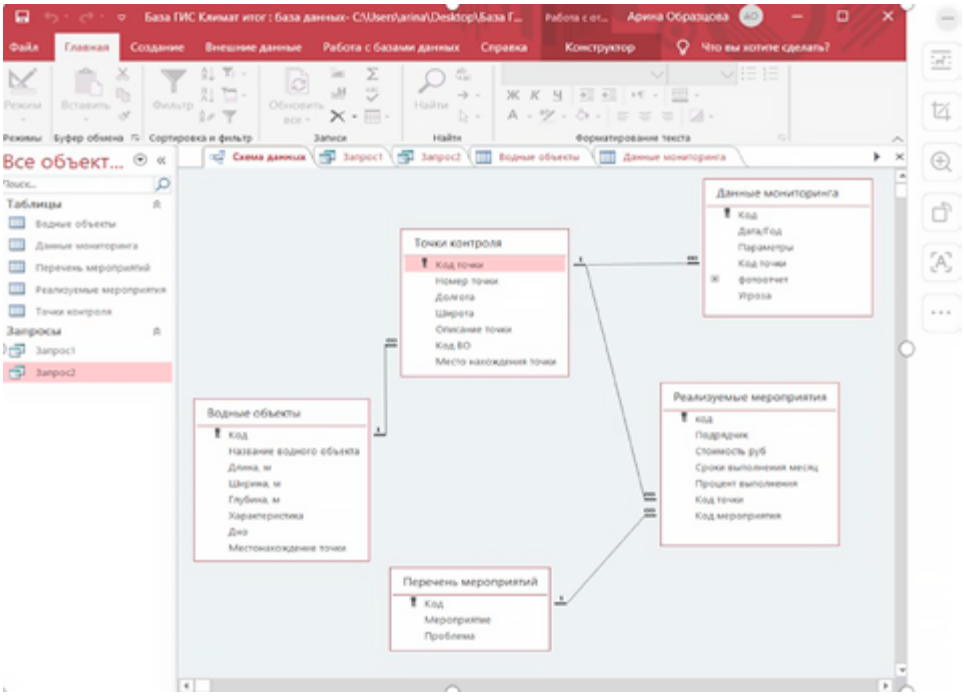


Рисунок 3. Фрагмент базы геоданных информационного блока по климатическому риску
Figure 3. Fragment of the geodatabase of the information block on climate risk

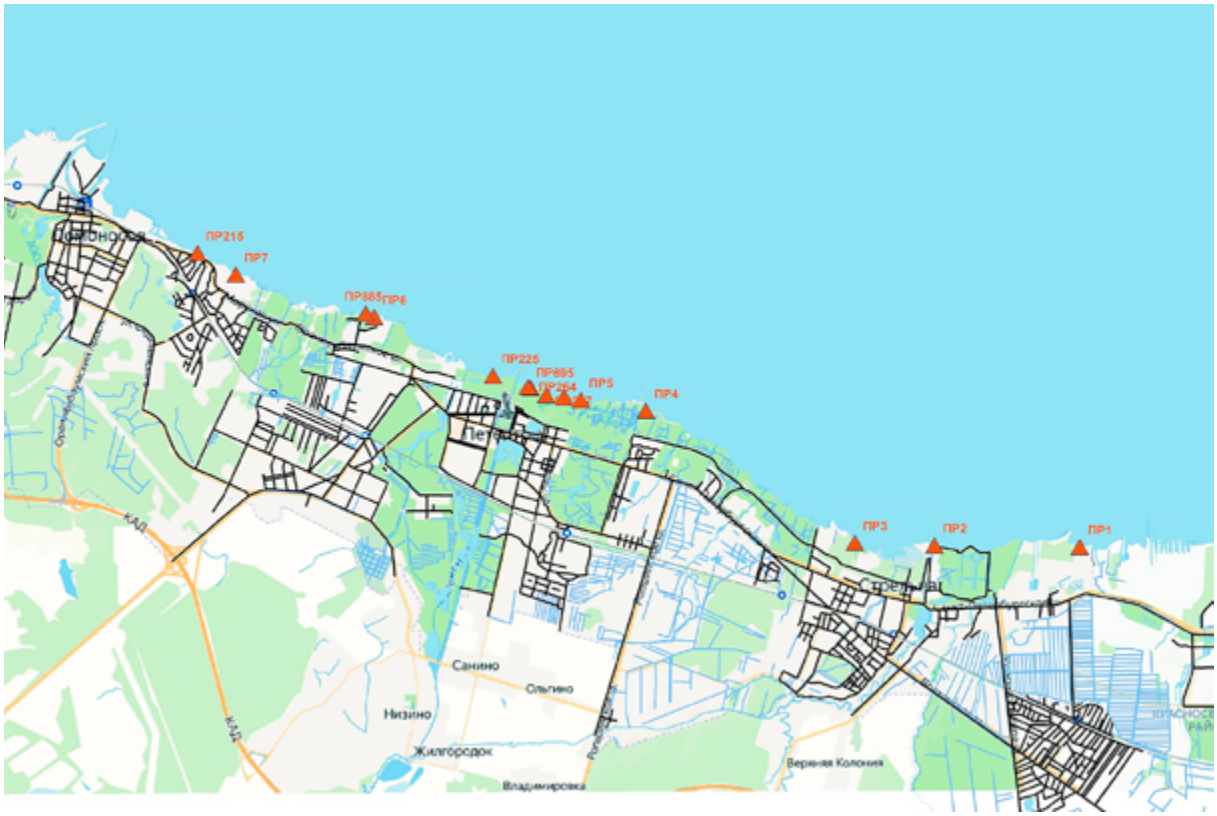


Рисунок 4. Точки, на основе которых составлена таблица «Точки контроля»
Figure 4. Points on the basis of which the "Control Points" table was compiled

из отчёта по мониторингу состояния береговой полосы, осуществленного СПб ГБУ «Минерал».

Первый класс объектов «Водные объекты» содержит перечень названий водных объектов, их гидрологические характеристики (длина, ширина, глубина, характер дна), описание места отбора проб и непосредственное нахождение точки отбора.

Второй класс объектов «Точки контроля» включает наименование точки, её координаты и описание конкретного места на водном объекте. Всего для анализа выбрано 14 точек, расположенных в Ломоносовском и Петродворцовом районе Санкт-Петербурга. Нанесённые точки контроля в системе ГИС приведены на рисунке 4.

По точке ПР4 указаны следующие данные: координаты 59.883206° с. ш. 29.953093° в. д.; местонахождение: государственный природный заказник, южное побережье Невской губы; описание точки: берег низменный, зарастающий, полого переходящий в береговую террасу, точного положения линии уреза воды не наблюдается, аккумулятивных форм в береговой зоне не отмечено, следов переработки берегов не наблюдается.

Третий класс объектов «Данные мониторинга» включает информацию о дате отбора проб, исследуемые параметры, фотофиксацию непосредственного фактического положения в месте исследования и возможное негативное воздействие, которое приводит к разрушению береговой линии.

Для точки контроля ПР5: дата контроля — 11.06.2024; контролируемые параметры: степень осыпания склона и контроль за абразивными процессами, нужно отметить, что место, где отбирается проба, в особой степени подвержено экзогенным геологическим процессам (рисунок 5).

Четвёртый класс объектов «Перечень мероприятий» включает перечень из 41-го мероприятия по предотвращению негативного влияния, которое приводит к изменению рельефа.

При анализе существующего положения и происходящим изменениям во времени в каждой конкретной точке контроля данного климатического риска формируется перечень мероприятий, которые могут быть применены для ликвидации последствий для территории.

Для точек ПР1, ПР225, ПР885 и ПР7 одним из негативных факторов, влияющих на изменение береговой



Рисунок 5. Фотографии береговой зоны в точке наблюдения ПР5 и космоснимок места отбора точки ПР5
Figure 5. Photographs of the coastal zone at observation point PR5 and a satellite image of the sampling location of point PR5

линии, является сильно заросшая тростником прибрежная территория и для каждой точки можно выбрать одно или несколько мероприятий из предложенного перечня. Наиболее оптимальным и эффективным является постоянное изучение растительности и контроль эффективности проведённых раннее мероприятий. Перечень мероприятий приведён в таблице.

Общий вид участка береговой линии Финского залива в созданной информационной системе приведён на рисунке 6.

Создание программы, как эффективного и удобного инструмента для управления климатическими рисками необходимо обществу и будет популярно для разных сфер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

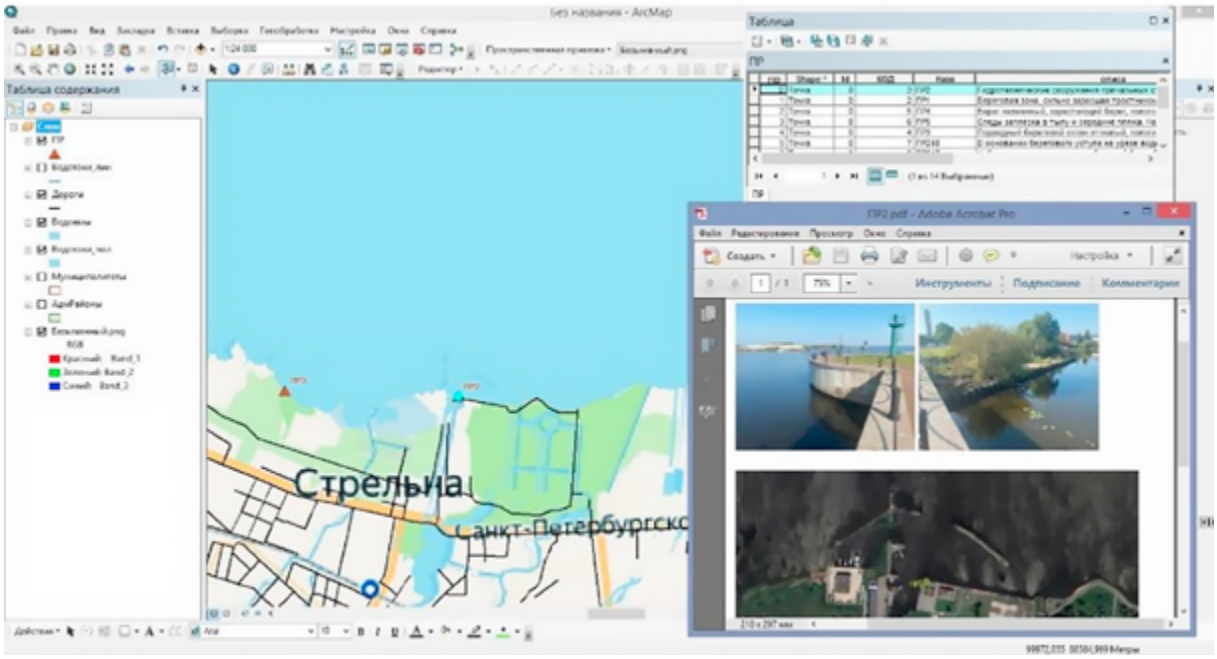
В рамках работы были рассмотрены вопросы, связанные с изменением климата как глобально, так и локально, изучены климатические риски, причины появления и последствия их развития на территории Санкт-Петербурга, разработана структура информационной системы управления климатическими рисками в Санкт-Петербурге, как возможного раздела государственной информационной системы в сфере охраны окружающей среды и природопользования «Экологический паспорт территории Санкт-Петербурга». Разработанный раздел информационной системы состоит из двух блоков: информационного и моделирующего.

Информационный блок подразделяется на секции: атмосфера, гидросфера и литосфера и реализуется как база геоданных. Он включает различные связанные наборы классов объектов об антропогенном воздействии, информацию о водных объектах, подвергающихся негативному воздействию, информационную часть о погодных условиях и требованиях законодательства, перечень мероприятий по адаптации к изменению климата. В моделирующем блоке собран перечень, существующих на данный момент программ и математических моделей, по которым производят расчёт того или иного опасного явления.

Разработанная система обеспечит надёжное хранение информации, актуализацию данных по мере их обновления, быструю визуализацию возможных изменений и мероприятия по предотвращению опасности проявления рисков. Разработанная система представляет собой надежный инструмент при стратегическом и экологическом планировании в аспекте адаптации к изменению климата любой территории. Спроектированная схема внесёт весомый вклад в выполнение указа Президента РФ от 4 ноября 2020 года № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» и распоряжения Правительства РФ от 11 марта 2023 года № 559-р. В нём утверждён национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года.

Таблица. Перечень мероприятий для решения конкретной проблемы
Table. List of measures to solve a specific problem

Мероприятия	Негативный фактор
1. Регулярная механическая или ручная очистка от тростника	Сильно заросшая тростником береговая зона
2. Поддержание стабильного уровня воды для предотвращения распространения тростника	
3. Реализация программ по созданию широкой полосы растительности вдоль берегов	
4. Снижение загрязнения водоёма, путём контроля за сточными водами, в которых содержатся удобрения	
5. Посадка местных видов растений, способствующих борьбе с тростником	
6. Постоянное изучение состояния растительности и эффективности проведённых мер	



Рисунке 6. Общий вид геоинформационной системы Петродворцового и Ломоносовского районов Санкт-Петербурга
Figure 6. General view of the geographic information system of the Petrodvortsovy and Lomonosovsky districts of Saint Petersburg

Список литературы

1. Пердаева А. Антропогенное воздействие на биоразнообразие // Вестник науки. 2025. № 5 (86). URL: https://cyberleninka. ru/article/n/antropogennoe-vozdeystvie-na-bioraznoobrazie (дата обращения: 15.08.2026).
2. Keck F., Peller T., Alther R., Barouillet C., Blackman R., Capo E., Chonova T., Couton M., Fehlinger L., Kirschner D., Knüsel M., Muneret L., Oester R., Tapolczai K., Zhang H., Altermatt F. The global human impact on biodiversity. Nature. 2025 May; 641 (8062): 395–400. DOI: 10.1038/s41586-025-08752-2 (дата обращения: 14.07.2026).
3. Глазкова И. Н., Иванова А. А., Клюева А. А., Пьянова О. С. Анализ воздействия парниковых газов на окружающую среду: отечественный и зарубежный опыт // Вестник Академии знаний. 2024. № 4 (63). URL: https://cyberleninka. ru/article/n/analiz-vozdeystviya-parnikovyh-gazov-na-okruzhayuschuyu-sredu-otechestvennyy-i-zarubezhnyy-opyt (дата обращения: 10.08.2026).
4. Sand M., Ocko I. B., Sun T., Skeie R. B., Hauglustaine D. A., Warwick N. J., Stevenson D. S., Paulot F., Myhre G., Archibald A. T. et al. Climate impacts of hydrogen emissions. Nat. Rev. Earth Environ. 2026, 7, 359–373, https://doi. org/10.1038/s43017-026-00792-0 (дата обращения: 14.06.2026).
5. Reji L., Bertagni M. B., Paulot F. et al. Global implications of a low soil moisture threshold for microbial hydrogen uptake. Nat. Commun. 17, 515 (2026). https://doi. org/10.1038/s41467-025-67208-3 (дата обращения: 14.06.2026).
6. Главное управление специальных программ Президента Российской Федерации. Приказ от 14 апреля 2025 года № 101 Об утверждении Служебного распорядка Главного управления специальных программ Президента Российской Федерации: [зарегистрирован в Минюсте России 26 мая 2025 года]. Москва. URL: https://docs. cntd. ru/document/891841020? marker (дата обращения: 14.06.2026).
7. Экологический портал Санкт-Петербурга. Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности // Официальный сайт. URL: https://comitet. ecopass. adc. spb. ru/map (дата обращения: 14.06.2026).
8. Реестр Государственных информационных систем // Официальный сайт. URL: https://reestr-gis. gov. spb. ru/gis/222794/basic_info_main (дата обращения: 14.06.2026).
9. Яковлева Е. Ю., Барабошкина А. В., Парусимова А. А. Реализация глобальной климатической повестки на уровне регионов России: климатический профиль регионов и обеспокоенность климатическими рисками // Государственное управление. Электронный вестник. 2026. № 116. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/realizatsiya-globalnoy-klimaticheskoy-povestki-na-urovne-regionov-rossii-klimaticheskiy-profil-regionov-i-obespokoennost (дата обращения: 14.06.2026).
10. Свиязов Е. М., Ветров А. Л. Численное моделирование сильных летних осадков при различных вариантах шага регулярной сетки // Географический вестник. 2021. № 4 (59). URL: https://cyberleninka. ru/article/n/chislennoemodelirovanie-silnyh-letnih-osadkov-pri-

razlichnyh-variantah-shaga-regulyarnoysetki (дата обращения: 14.03.2026).
11. Sáez-Sandino T., Maestre F. T., Berdugo M. et al. Increasing numbers of global change stressors reduce soil carbon worldwide. Nat. Clim. Chang. 14, 740–745 (2024). https://doi.org/10.1038/s41558-024-02019-w (дата обращения: 14.03.2026).
12. Tufek A., Aktas M. S. (2022). A Systematic Literature Review on Numerical Weather Prediction Models and Provenance Data. In: Gervasi O., Murgante B., Misra S., Rocha A. M. A. C., Garau C. (eds) Computational Science and Its Applications — ICCSA 2022 Workshops. ICCSA 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol. 13380. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10542-5_42 (дата обращения: 14.06.2026).

References

1. Perdaeva A. (2025) Anthropogenic impact on biodiversity, Vestnik Nauki, No. 5 (86). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/antropogennoe-vozdeystvie-na-bioraznoobrazie (Accessed: 15.08.2026).
2. Keck F., Peller T., Alther R., Barouillet C., Blackman R., Capo E., Chonova T., Couton M., Fehlinger L., Kirschner D., Knüsel M., Muneret L., Oester R., Tapolczai K., Zhang H., Altermatt F. (2025) The global human impact on biodiversity. Nature; Vol. 641 (8062), pp. 395–400. DOI: 10.1038/s41586-025-08752-2 (Accessed: 14.07.2026).
3. Glazkova I. N., Ivanova A. A., Klyueva A. A., Pyanova O. S. (2024) Analysis of the impact of greenhouse gases on the environment: domestic and foreign experience. Vestnik Akademii Znanij, No. 4 (63). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vozdeystviya-parnikovyh-gazov-na-okruzhayuschuyu-sredu-otechestvennyy-i-zarubezhnyy-opyt (Accessed: 10.08.2026).
4. Sand M., Ocko I. B., Sun T., Skeie R. B., Hauglustaine D. A., Warwick N. J., Stevenson D. S., Paulot F., Myhre G., Archibald A. T. et al. (2026) Climate impacts of hydrogen emissions. Nat. Rev. Earth Environ., Vol. 7, pp. 359–373. DOI: 10.1038/s43017-026-00792-0 (Accessed: 14.06.2026).
5. Reji L., Bertagni M. B., Paulot F. et al. (2026) Global implications of a low soil moisture threshold for microbial hydrogen uptake. Nat. Commun., Vol. 17, p. 515. DOI: 10.1038/s41467-025-67208-3 (Accessed: 14.06.2026).
6. Main Directorate of Special Programs of the President of the Russian Federation. Order No. 101 of 14 April 2025 on the approval of the Internal Regulations of the Main Directorate of Special Programs of the President of the Russian Federation: [registered with the Ministry of Justice of Russia on 26 May 2025]. Moscow. Available at: https://docs. cntd. ru/document/891841020? marker (Accessed: 14.06.2026).
7. Environmental Portal of Saint Petersburg. Committee for Nature Management, Environmental Protection and Environmental Safety. Official website. Available at: https://comitet. ecopass. adc. spb. ru/map (Accessed: 14.06.2026).
8. Register of State Information Systems. Official website. Available at: https://reestr-gis. gov. spb. ru/gis/222794/basic_info_main (Accessed: 14.06.2026).
9. Yakovleva E. Yu., Baraboshkina A. V., Parusimova A. A. (2026) Implementation of the global climate agenda at the level of Russian regions: climate profile of the regions and concern about climate risks. Gosudarstvennoe Upravlenie. Elektronnyj Vestnik, No. 116. Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/realizatsiya-globalnoy-klimaticheskoy-povestki-na-urovne-regionov-rossii-klimaticheskiy-profil-regionov-i-obespokoennost (Accessed: 14.06.2026).
10. Sviyazov E. M., Vetrov A. L. (2021) Numerical modeling of heavy summer precipitation under various variants of the regular grid step. Geograficheskij Vestnik, No. 4 (59). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-silnyh-letnih-osadkov-pri-razlichnyh-variantah-shaga-regulyarnoysetki (Accessed: 14.03.2026).
11. Sáez-Sandino T., Maestre F. T., Berdugo M. et al. (2024) Increasing numbers of global change stressors reduce soil carbon worldwide. Nat. Clim. Chang., Vol. 14, pp. 740–745. DOI: 10.1038/s41558-024-02019-w (Accessed: 14.03.2026).
12. Tufek A., Aktas M. S. (2022). A Systematic Literature Review on Numerical Weather Prediction Models and Provenance Data. In: Gervasi O., Murgante B., Misra S., Rocha A. M. A. C., Garau C. (eds) Computational Science and Its Applications — ICCSA 2022 Workshops. ICCSA 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol. 13380. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-10542-5_42 (Accessed: 14.06.2026).

Информация об авторах

Антонов Иван Владимирович, *кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 5432–3424, Author ID (РИНЦ): 652506, ORCID: 0000-0002-6737-5945; e-mail: signalsb@yandex.ru.*

Образцова Арина Алексеевна, *студентка, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна»; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID 0009-0008-5413-4027; e-mail: arinaobraztsova@yandex.ru.*

Information about the authors

Antonov Ivan Vladimirovich, *PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 5432–3424, Author ID (RSCI): 652506, ORCID: 0000-0002-6737-5945; e-mail: signalsb@yandex.ru.*

Obraztsova Arina Alekseevna, *student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0009-0008-5413-4027; e-mail: arinaobraztsova@yandex.ru.*

Научная статья
УДК 504.4, 574.5
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_53–59

ВЫЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СОДЕРЖАНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТРОФИЧЕСКИМ СТАТУСОМ ВОДОХРАНИЛИЩА СЕСТРОРЕЦКИЙ РАЗЛИВ

Анастасия Александровна Алефирова[1], Иван Владимирович Антонов[1], Асель Жумагалиевна Адылова[2]

[1]Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

[2]Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение «Пожарно-спасательный колледж „Санкт-Петербургский центр подготовки спасателей“», Санкт-Петербург, Россия

© Алефирова А. А., Антонов И. В., Адылова А. Ж., 2026

Автор-корреспондент: А. А. Алефирова, e-mail: anastasiaalefirova3@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты пятилетнего гидрохимического мониторинга (с 2021 по 2025 г.) водохранилища Сестрорецкий Разлив, расположенного в зоне интенсивной рекреационной нагрузки. Цель исследования — установление взаимосвязи между концентрациями биогенных элементов (аммоний-ион, нитрит-ион, нитрат-ион и фосфат-ион) и трофическим статусом водного объекта. Отбор проб производился в 9 постоянных точках с учетом сезонной динамики. Определение концентраций азотсодержащих веществ выполнено фотометрическим методом (реактивы Несслера и Грисса), фосфатов — колориметрическим методом с молибдатом аммония, нитратов — ионометрическим методом. При анализе сезонной динамики индекса трофического состояния (ИТС) за 2021–2025 гг. выявлена устойчивая закономерность: минимальные значения отмечаются весной (6,4–7,9) из-за низких температур воды, несмотря на поступление биогенов с половодьем; летом фиксируются пиковые показатели (8,1–8,7) вследствие оптимальных термических условий и стратификации водных масс; осенью значения остаются высокими (7,3–10,2) за счёт минерализации отмершей биомассы и вторичного высвобождения биогенов. Анализ средних значений индекса загрязненности воды (ИЗВ) по сезонам 2021–2025 гг. показал устойчивое повышение показателя в осенний период по сравнению с весной и летом. Выявленная динамика согласуется с механизмом: летняя стратификация и прогрев вод способствуют развитию водорослей, а осенняя минерализация отмершей биомассы и перемешивание водных масс обусловливают вторичное повышение трофности. Исследуемая часть водохранилища классифицирована как эвтрофный водоем с тенденцией к дальнейшему ухудшению качества воды. Установлен коэффициент корреляции Пирсона $R = 0{,}789$, подтверждающий прямую связь между ростом биогенной нагрузки и эвтрофикацией водоема. Также в работе получено уравнение линейной регрессии, позволяющее прогнозировать трофность при изменении концентраций биогенов.

Ключевые слова: эвтрофикация, биогенные элементы, трофический статус, индекс загрязнения воды, гидрохимический мониторинг, водохранилище Сестрорецкий Разлив, фосфаты, азот, качество воды

Для цитирования: Алефирова А. А., Антонов И. В., Адылова А. Ж. Выявление взаимосвязи содержания биогенных элементов с трофическим статусом водохранилища Сестрорецкий Разлив // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 53–59. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_53–59.

RELATIONSHIP BETWEEN BIOGENIC ELEMENT CONTENT AND TROPHIC STATUS OF THE SESTRORETSKY RAZLIV RESERVOIR

Anastasia Alexandrovna Alefirova[1], Ivan Vladimirovich Antonov[1], Asel' Zhumagalievna Adylova[2]

[1]Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia

[2]St. Petersburg State Budgetary Professional Educational Institution «Fire and Rescue College "St. Petersburg Rescue Training Center"», St. Petersburg, Russia

Corresponding author: A. A. Alefirova, e-mail: anastasiaalefirova3@gmail.com

ABSTRACT

The paper presents the results of five-year hydrochemical monitoring (from 2021 to 2025) of the Sestroretsky Razliv Reservoir located in the zone of intensive recreational load. The purpose of this study is to determine the relationship between the concentrations of biogenic elements (ammonium, nitrite, nitrate and phosphate ions) and the trophic status of the water body. Sampling was performed at nine permanent stations, taking into account seasonal dynamics. The concentrations of nitrogen-containing substances were determined using the photometric method (Nessler's and Griess reagents), phosphate — using the colorimetric method with ammonium molybdate, and nitrate — using the ionometric method. An analysis of the seasonal dynamics of the trophic state index (TSI) over 2021–2025 revealed a consistent pattern: minimum values occur in spring (6.4–7.9) owing to low water temperatures, despite nutrient input during the flood period; peak values are recorded in summer (8.1–8.7) due to optimal thermal conditions and stratification of the water masses; in autumn, values remain high (7.3–10.2) because of the dead biomass mineralisation and secondary release of nutrients. An analysis of the average water pollution index (WPI) values by season over 2021–2025 showed a consistent increase in the parameter in autumn compared with spring and summer. The revealed dynamics is consistent with the mechanism whereby summer stratification and warming favour algal growth, while autumn mineralisation of dead biomass and water mixing cause a secondary increase in trophic statu. The investigated part of the reservoir is classified as a eutrophic water body with a tendency to further water quality deterioration. A Pearson correlation coefficient of R = 0.789 was calculated, which confirms a direct relationship between the growth of biogenic load and the eutrophication of the water body. A linear regression equation was also derived in this study, making it possible to predict trophic status from changes in biogenic element concentrations.

Keywords: eutrophication, biogenic elements, trophic status, water pollution index, hydrochemical monitoring, Sestroretsky Razliv Reservoir, phosphates, nitrogen, water quality

For citation: Alefirova A. A., Antonov I. V., Adylova A. Zh. (2026) 'Relationship between biogenic element content and trophic status of the Sestroretsky Razliv reservoir', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 53–59. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_53–59.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение устойчивого состояния пресноводных экосистем является одной из приоритетных задач в настоящее время. Водохранилища, выполняющие функции регулирования стока, водоснабжения, поддержки биоразнообразия и рекреации, испытывают значительную антропогенную нагрузку. Среди наиболее распространенных негативных процессов выделяется эвтрофикация, приводящая к неконтролируемому развитию фитопланктона, снижению прозрачности воды, дефициту кислорода в придонных слоях [1–3].

Ключевую роль в процессах эвтрофикации играют соединения азота и фосфора, которые поступают в водные объекты с поверхностным стоком с сельскохозяйственных угодий, неочищенными или недостаточно очищенными сточными водами, поверхностным стоком и в результате рекреационной нагрузки [4–6]. Поступление биогенных элементов в водные экосистемы и изменение трофического статуса осуществляется через механизмы как внешнего, так и внутреннего питания водоема. Внутренние источники связаны с высвобождением питательных веществ из донных отложений в условиях кислородного дефицита, что может значительно усиливать негативные последствия [7, 8].

Объектом исследования являлось водохранилище Сестрорецкий Разлив, расположенное в Курортном

районе Санкт-Петербурга. В настоящее время оно выполняет важную рекреационную функцию, ежегодно принимая тысячи отдыхающих.

В работе определены закономерности в динамике содержания биогенных элементов в воде и трофическим статусом для участка акватории водохранилища Сестрорецкий Разлив. При этом решался ряд задач:

1) Провести отбор проб воды в соответствии с нормативными требованиями.
2) Определить концентрации биогенных элементов физико-химическими методами.
3) Рассчитать индексы трофического состояния (ИТС) и загрязненности воды (ИЗВ) за период с 2021–2025 гг.
4) Выявить корреляционные связи между показателями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водохранилище Сестрорецкий Разлив — водоем озерного типа, расположенный в восточной части города Сестрорецк. Площадь водного зеркала составляет 1,7 км^2, средняя глубина — 2,5–3,0 м, длина береговой линии — около 23 км. Питание водоема осуществляется за счет рек Сестра и Черная.

Отбор проб воды проводился в соответствии с рекомендациями [9] на 9 постоянных станциях, местоположение которых показано на рисунке 1, охватывающих основные участки акватории водохранилища, которые подвержены наибольшему антропогенному воздействию. Отбор проб осуществлялся весной, летом и осенью в период с 2021–2025 гг.

Местонахождение точек отбора проб:
46 — Сестрорецкое водохранилище, у берега, перед плотиной Гаусмана;
46/1 — Водосливной канал, у берега, в нижнем бьефе плотины Гаусмана;
47 — река Малая Сестра, исток;
47/1 — река Малая Сестра, напротив здания администрации Курортного района;
48 — Сестрорецкое водохранилище, перед мостом Приморского шоссе;
48/2 — Сестрорецкое водохранилище, у берега, Офицерский пляж;
49/1 — Сестрорецкое водохранилище, у фонтана;
49/5 — Сестрорецкое водохранилище, причал у Храма святых первоверховных апостолов Петра и Павла;
50 — Сестрорецкое водохранилище, центральный участок.

Оценка трофического статуса проводилась по индексу трофического состояния [10–11], разработанному для водоемов с учетом pH и содержания кислорода. Расчет производился по формуле (1):

$$ИТС = \frac{\sum_{i=n}^{n} pH_i}{n} + a\left(100 - \frac{\sum_{i=n}^{n}[O_2]}{n}\right), \qquad (1)$$

где pH_i — значение pH, измеренное за определённый период;
$[O_2]$ — O_2, в процентах насыщения, %;
n — количество измерений;
a — коэффициент, определяемый по формуле (2):

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(pH_i \cdot [O_2]\right) - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(pH_i \cdot [O_2]\right)}{n}}{\sum_{i=1}^{n}[O_2]^2 - \frac{\sum_{i=1}^{n}[O_2]^2}{n}}, \qquad (2)$$

где pH_i — значение pH, измеренное за определённый период;
$[O_2]$ — O_2, в процентах насыщения, %;
n — количество измерений.



Рисунок 1. Карта-схема водохранилища Сестрорецкий Разлив с указанием точек отбора проб

Figure 1. Schematic map of the Sestroretsky Razliv reservoir with sampling points indicated

Интерпретация значений ИТС представлена в таблице 1.

Таблица 1. Классификация водных объектов по индексу трофического состояния

Table 1. Classification of water bodies according to the trophic state index

Продукционно-деструкционный баланс	Экологическое состояние	ИТС
Отрицательный П<Д	Дистрофное	< 5,7 ± 0,3
	Ультраолиготрофное	6,3 ± 0,3
Нулевой П=Д	Олиготрофное	7,0 ± 0,3
Положительный П>Д	Мезотрофное	7,7 ± 0,3
	Эвтрофное	> 8,3 ± 0,3

Для оценки биогенной загрязненности воды использовался индекс загрязнения воды (ИЗВ), рассчитываемый по формуле (3) [12]:

$$ИЗВ = \sum\left(\frac{Ci}{ПДКi}\right)\Big/6, \qquad (3)$$

где *Ci* — измеренная концентрация i-го показателя, мг/л; ПДК*i* — предельно допустимая концентрация для водных объектов рыбохозяйственного назначения.

Класс качества и диапазоны ИЗВ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения класса качества и диапазона индекса загрязнения воды

Table 2. Water quality grade values and water pollution index ranges

Класс качества вод		Диапазон значений ИЗВ
Очень чистые	I	ИЗВ < 0,3
Чистые	II	0,3 < ИЗВ < 1
Умеренно загрязненные	III	1 < ИЗВ < 2,5
Загрязненные	IV	2,5 < ИЗВ <4,00
Грязные	V	4,00 < ИЗВ < 6,00
Очень грязные	VI	6,00 < ИЗВ < 10,00
Чрезвычайно грязные	VII	ИЗВ > 10,00

Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета MS Excel. Для оценки силы связи между показателями применялся коэффициент корреляции Пирсона (R) [13]. Достоверность различий оценивалась при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе пятилетнего мониторинга было проанализировано 224 пробы воды. На рисунке 2 представлена динамика средних годовых значений ИТС и ИЗВ за период с 2021 по 2025 г., которая демонстрирует устойчивую тенденцию к увеличению показателей.

Среднее значение ИТС за весь период составило 8,04, что соответствует эвтрофному типу водоема. Минимальное значение зафиксировано в 2022 г. (ИТС = 7,7), максимальное — 2025 г. (ИТС = 8,3). Сезонная динамика ИТС представлена в таблице 3. По показателю ИЗВ среднее значение в 2021–2025 гг. составило 1,24, что соответствует умеренно загрязненному качеству воды. Минимальное значение зафиксировано в 2022 г. (ИЗВ = 0,8), максимальное — 2025 г. (ИЗВ = 1,9). Сезонная динамика ИЗВ представлена в таблице 4.

Таблица 3. Сезонная динамика индекса трофического состояния (ИТС) в 2021–2025 гг.

Table 3. Seasonal dynamics of the trophic state index (TSI) over 2021–2025

Год	Весна	Лето	Осень
2021	7,1	8,7	7,9
2022	–	8,1	7,3
2023	7,9	8,3	8,0
2024	6,4	8,1	10,2
2025	–	8,3	–

Анализ сезонной динамики индекса трофического состояния (ИТС) за 2021–2025 гг. показывает устойчивую закономерность: минимальные значения отмечаются весной (6,4–7,9) из-за низких температур воды, несмотря на поступление биогенов с половодьем; летом фиксируются пиковые показатели (8,1–8,7) вследствие оптимальных термических условий и стратификации водных масс; осенью значения остаются высокими (7,3–10,2) за счёт минерализации отмершей биомассы и вторичного высвобождения биогенов.

Таблица 4. Средние значения ИЗВ по сезонам в 2021–2025 гг.

Table 4. Average WPI values by season in 2021–2025

Год	Весна	Лето	Осень
2021	0,8	0,9	1,1
2022	–	0,6	1,0
2023	0,6	0,7	2,6
2024	1,1	0,9	1,8
2025	–	1,9	–

Анализ средних значений ИЗВ по сезонам 2021–2025 гг. показал устойчивое повышение показателя в осенний период по сравнению с весной и летом во все годы с полными данными (осенние максимумы: 1,1–2,6 против летних 0,6–1,9 и весенних 0,6–1,1). Наиболее выраженный пик зафиксирован в 2023 г. (2,6), а в 2025 г. аномально высокое летнее значение (1,9) может указывать на вероятный рост осенней

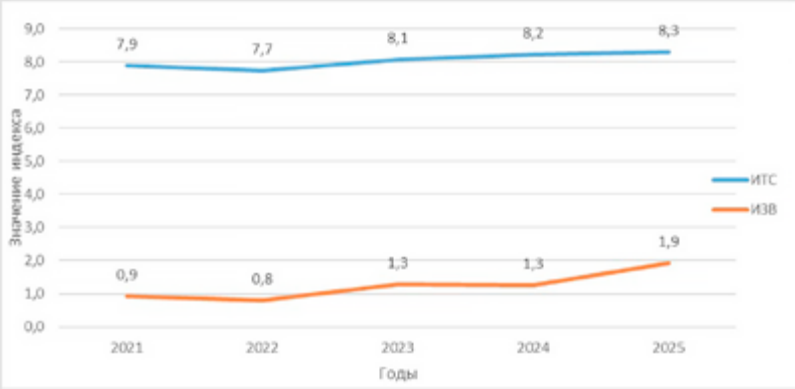


Рисунок 2. Динамика средних годовых значений индекса трофического состояния (ИТС) и индекса загрязненности воды (ИЗВ) за 2021–2025 гг.

Figure 2. Dynamics of mean annual trophic state index (TSI) and water pollution index (WPI) values over 2021–2025

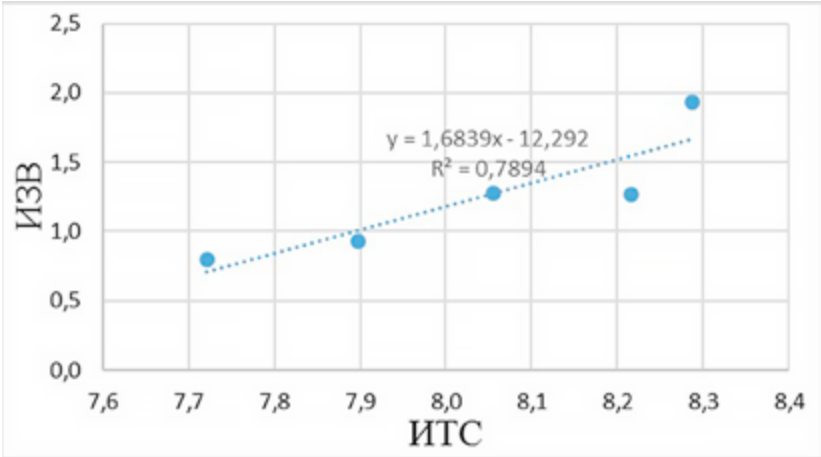


Рисунок 3. Зависимость трофности от биогенных элементов

Figure 3. Dependence of trophic level on biogenic elements

нагрузки. Выявленная динамика согласуется с описанным механизмом: летняя стратификация и прогрев вод способствуют развитию водорослей, а осенняя минерализация отмершей биомассы и перемешивание водных масс обусловливают вторичное повышение трофности.

Для количественной оценки связи между биогенной нагрузкой и трофностью был проведен корреляционно-регрессионный анализ. На рисунке 3 представлена диаграмма, отражающая зависимость между значениями ИТС и ИЗВ.

Коэффициент корреляции Пирсона составил $R = 0{,}789$ ($p < 0{,}001$), что свидетельствует о сильной прямой связи. Полученное уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$ИТС = 1{,}6839 \times ИЗВ - 12{,}292.$$

Данная модель позволяет с достоверностью 78,9 % прогнозировать изменение трофического статуса водоема при изменении уровня загрязнения биогенными элементами. Например, увеличение ИЗВ на 1,0 единицу приводит к росту ИТС на 1,68 единицы, что соответствует переходу водоема в более высокий трофический класс.

Вместе с тем, анализ регрессионной модели показал, что точность прогноза снижается в периоды экстремальных температур и паводков, что требует дальнейшей развитии модели по сезонам года.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что биогенные элементы, поступающие в водохранилище, являются ключевым фактором эвтрофикации, а выявленная корреляционная зависимость может быть использована для оперативного прогнозирования состояния водоема при мониторинговых наблюдениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе пятилетнего гидрохимического мониторинга водохранилища Сестрорецкий Разлив установлено, что водоем находится в эвтрофном состоянии (средний ИТС = 8,04) с выраженной тенденцией к дальнейшей деградации качества воды.

Выявлена устойчивая прямая корреляционная связь (R = 0,789) между индексом загрязнения воды, рассчитываемым по биогенным элементам, и индексом трофического состояния. Полученное уравнение регрессии ИТС = 1,6839 × ИЗВ — 12,292 позволяет количественно оценивать влияние изменения биогенной нагрузки на трофический статус водоема.

Список литературы

1. Подлипенская Л. Е., Бакуменко Ю. С. Исследование процессов эвтрофикации и самоочищения водоемов // Экологический вестник Донбасса. 2021. № 1. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/issledovanie-protsessov-evtrofikatsii-i-samoochischeniya-vodoemov (дата обращения: 11.08.2026).
2. Савкин В. М., Двуреченская С. Я. Влияние многолетнего комплексного использования водных ресурсов на экосистему Новосибирского водохранилища // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 1 (73). URL: https://cyberleninka. ru/article/n/vliyanie-mnogoletnego-kompleksnogo-ispolzovaniya-vodnyh-resursov-na-ekosistemu-novosibirskogo-vodohranilischa (дата обращения: 01.09.2026).
3. Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 2. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/sovremennye-tendentsii-izmeneniy-presnovodnyh-ekosistem-evro-arkticheskogo-regiona (дата обращения: 01.09.2026).
4. Нишонов Б. Эр., Саттарова Ф. Ю., Саидмахмудова Л. А., Бабажанова С. Ю. Оценка экологического состояния озер по гидробиологическим показателям // Universum: химия и биология. 2026. № 4 (142). URL: https://cyberleninka. ru/article/n/otsenka-ekologicheskogo-sostoyaniya-ozer-po-gidrobiologicheskim-pokazatelyam (дата обращения: 01.09.2026).
5. Шестеркин В. П. Фосфаты в воде малых рек юга Хабаровского края // Региональные проблемы. 2026. № 2. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/fosfaty-v-vode-malyh-rek-yuga-habarovskogo-kraya (дата обращения: 21.08.2026).
6. Farizan A., Norfatimah M. Y., Aili Z. N., Lyena W. Z. A., Indah M. A. Use of cytological and molecular biological method for water pollution monitoring // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 674. Art. 012108. DOI: 10.1088/1755–1315/674/1/012108.
7. Barathan B. P., Chen W., Su Y. et al. The effects of nutrient loading from different sources on eutrophication in a large shallow lake in Southeast China. Environ Geochem Health 45, 7603–7620 (2023). https://doi. org/10.1007/s10653-023-01641-5 (дата обращения: 25.08.2026).
8. Zhang X., Yi Y., Yang Y., Liu H. & Yang Z. (2021). Modelling phosphorus loading to the largest shallow lake in northern China in different shared socioeconomic pathways. Journal of Cleaner Production, 297, 1–10. https://doi. org/10.1016/j.jclepro. 2021.12653.
9. Рекомендации Р 52.24.353–2012 «Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод» (утв. Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 10 мая 2012 г.) (с изменениями и дополнениями).
10. Филатов Н. Н., Лукина Ю. Н., Галахина Н. Е., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Молчанова Я. П. К вопросу оценки состояния и прогнозирования изменений системы «озеро — водосбор» как природного капитала // Труды КарНЦ РАН. 2025. № 6. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/k-voprosu-otsenki-sostoyaniya-i-prognozirovaniya-izmeneniy-sistemy-ozero-vodosbor-kak-prirodnogo-kapitala (дата обращения: 02.09.2026).
11. Чуйкина Д. И. и др. Химический состав поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки (на примере малых водоемов Томского района). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 75–89. DOI: https://doi. org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-75-89.
12. Постевая М. А., Даувальтер В. А., Слуковский З. И. Оценка качества вод городских озер по гидрохимическим индексам (на примере г. Мурманска) // Российский журнал прикладной экологии. 2025. № 1. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/otsenka-kachestva-vod-gorodskih-ozer-po-gidrohimicheskim-indeksam-na-primere-g-murmanska (дата обращения: 01.09.2026).
13. Гржибовский А. М. Корреляционный анализ // Экология человека. 2008. № 9. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/korrelyatsionnyy-analiz (дата обращения: 01.09.2026).

References

1. Podlipenskaya L. E. and Bakumenko Yu. S. (2021) 'Study of the processes of eutrophication and self-purification of water bodies', Ecological Bulletin of Donbass, (1). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/issledovanie-protsessov-evtrofikatsii-i-samoochischeniya-vodoemov (accessed: 11.08.2026).
2. Savkin V. M. and Dvurechenskaya S. Ya. (2018) 'The impact of long-term integrated use of water resources on the ecosystem of the Novosibirsk reservoir', Water and Ecology: Problems and Solutions, (1 (73)). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/vliyanie-mnogoletnego-kompleksnogo-ispolzovaniya-vodnyh-resursov-na-ekosistemu-novosibirskogo-vodohranilischa (accessed: 01.09.2026).
3. Kashulin N. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I. and Terentyev P. M. (2012) 'Current trends in changes of freshwater ecosystems of the Euro-Arctic region', Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, (2). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/

sovremennye-tendentsii-izmeneniy-presnovodnyh-ekosistem-evro-arkticheskogo-regiona (accessed: 01.09.2026).
4. Nishonov B. Er., Sattarova F. Yu., Saidmakhmudova L. A. and Babazhanova S. Yu. (2026) 'Assessment of the ecological state of lakes by hydrobiological indicators', Universum: Chemistry and Biology, (4 (142)). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/otsenka-ekologicheskogo-sostoyaniya-ozer-po-gidrobiologicheskim-pokazatelyam (accessed: 01.09.2026).
5. Shesterkin V. P. (2026) 'Phosphates in the water of small rivers of the south of Khabarovsk Krai', Regional Problems, (2). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/fosfaty-v-vode-malyh-rek-yuga-habarovskogo-kraya (accessed: 21.08.2026).
6. Farizan A., Norfatimah M. Y., Aili Z. N., Lyena W. Z. A. and Indah M. A. (2021) 'Use of cytological and molecular biological method for water pollution monitoring', IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 674, art. 012108. DOI: 10.1088/1755–1315/674/1/012108.
7. Barathan B. P., Chen, W., Su, Y. et al. (2023) 'The effects of nutrient loading from different sources on eutrophication in a large shallow lake in Southeast China', Environmental Geochemistry and Health, 45, pp. 7603–7620. https://doi. org/10.1007/s10653-023-01641-5 (accessed: 25.08.2026).
8. Zhang, X., Yi, Y., Yang, Y., Liu, H. and Yang, Z. (2021) 'Modelling phosphorus loading to the largest shallow lake in northern China in different shared socioeconomic pathways', Journal of Cleaner Production, 297, pp. 1–10. https://doi. org/10.1016/j. jclepro. 2021.12653.
9. Recommendations R 52.24.353–2012 'Sampling of surface land waters and treated wastewater' (approved by the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring on 10 May 2012) (with amendments and additions).
10. Filatov N. N., Lukina, Yu. N., Galakhina N. E., Kalinkina N. M., Tekanova E. V. and Molchanova Ya. P. (2025) 'On the issue of assessing the state and forecasting changes in the "lake — catchment" system as natural capital', Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, (6). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/k-voprosu-otsenki-sostoyaniya-i-prognozirovaniya-izmeneniy-sistemy-ozero-vodosbor-kak-prirodnogo-kapitala (accessed: 02.09.2026).
11. Chuykina D. I. et al. (2026) 'Chemical composition of surface waters under anthropogenic load (on the example of small water bodies of the Tomsk region) ', Vestnik of MSTU, 29 (1), pp. 75–89. DOI: https://doi. org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-75-89.
12. Postevaya M. A., Dauvalter V. A. and Slukovskiy Z. I. (2025) 'Assessment of water quality of urban lakes by hydrochemical indices (on the example of Murmansk) ', Russian Journal of Applied Ecology, (1). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/otsenka-kachestva-vod-gorodskih-ozer-po-gidrohimicheskim-indeksam-na-primere-g-murmanska (accessed: 01.09.2026).
13. Grzhibovskiy A. M. (2008) 'Correlation analysis', Human Ecology, (9). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/korrelyatsionnyy-analiz (accessed: 01.09.2026).

Информация об авторах

Алефирова Анастасия Александровна, *студентка, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: anastasiaalefirova3@gmail.com.*

Антонов Иван Владимирович, *кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 5432–3424, Author ID: 652506, ORCID: 0000-0002-6737-5945; e-mail: signalsb@yandex.ru.*

Адылова Асель Жумагалиевна, *преподаватель Санкт-Петербургского Пожарно-спасательного колледжа «Санкт-Петербургский центр подготовки спасателей»; 193168, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 52, к. 1, лит. К; SPIN-код: 5468–7463, AuthorID: 1078480; e-mail: adylova97@mail.ru.*

Information about the authors

Alefirova Anastasia Aleksandrovna, *student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; e-mail: anastasiaalefirova3@gmail.com.*

Antonov Ivan Vladimirovich, *PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 5432–3424, Author ID (RSCI): 652506, ORCID: 0000-0002-6737-5945; e-mail: signalsb@yandex.ru.*

Adylova Asel Zhumagalievna, *Lecturer, Saint Petersburg State Budgetary Professional Educational Institution "Fire and Rescue College 'Saint Petersburg Center for Rescuer Training'"; 52, Bldg. 1, Lit. K Bolshevikov Ave., Saint Petersburg, 193168, Russia; SPIN-code: 5468–7463, Author ID (RSCI): 1078480; e-mail: adylova97@mail.ru.*

Оригинальное практическое исследование
УДК 536.24:628.32
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_60–70

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ БЕРЕГОВОГО ВЫПУСКА СТОЧНЫХ ВОД МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Илья Александрович Шишкин[1], Лидия Владимировна Романова[2], Халид Османович Барххуев[2]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербург, Россия

© Шишкин И. А., Романова Л. В., Барххуев Х. О., 2026

Автор-корреспондент: Х. О. Барххуев, e-mail: axado111@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Цель работы — экспериментально оценить тепловую нагрузку берегового выпуска сточных вод после локальных очистных сооружений и параметры формирования температурного поля в малом водотоке. Натурные исследования выполнены 15 марта 2026 г. на Смолячковом ручье в посёлке Молодёжное Ленинградской области. Измерительная схема включала контактный анализатор BLE-C600, наземный радиометрический тепловизор FLIR ThermaCAM E300 и установленную на беспилотной платформе камеру Seek CompactXR. Съёмку проводили до восхода солнца при температуре воздуха от –0,8 до –0,6 °C и скорости ветра 1,1–1,3 м/с. Зону смешения выделяли по превышению температуры поверхности воды над фоновым уровнем; порог контраста составил 0,6 °C. Сопоставление результатов в шести контрольных точках дало для FLIR среднее смещение +0,43 °C и RMSE 0,51 °C, для Seek — +0,23 и 0,42 °C соответственно. Контактная температура уменьшалась от 6,5 °C на срезе выпуска до 2,0 °C на расстоянии 6 м при фоне 1,0 °C. Площадь поверхностной аномалии равнялась 10,6 м^2, максимальные длина и ширина — 6,8 и 2,4 м. Эмпирическая аппроксимация нормированного контраста экспонентой дала эффективный коэффициент затухания 0,27 м$^{-1}$ и характерную длину 3,7 м. При оценочном расходе 1,0 м^3/ч начальная тепловая мощность потока составила 6,4 кВт. Показано, что совместное применение контактных и тепловизионных измерений позволяет оперативно локализовать температурно возмущённую зону и получить параметры, необходимые для инженерной оценки теплового воздействия. Результаты относятся к одной зимней серии наблюдений и не заменяют расходометрических, гидродинамических и гидрохимических исследований.

Ключевые слова: тепловая нагрузка, сточные воды, инфракрасная термография, температурное поле, зона смешения, беспилотный летательный аппарат, малый водоток

Для цитирования: Шишкин И. А., Романова Л. В., Барххуев Х. О. Экспериментальная оценка тепловой нагрузки берегового выпуска сточных вод методом инфракрасной термографии // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 60–70. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_60–70.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THERMAL LOAD FROM A SHORE WASTEWATER OUTFALL BY INFRARED THERMOGRAPHY

Ilya Alexandrovich Shishkin[1], Lidia Vladimirovna Romanova[2], Khalid Osmanovich Barkhhuev[2]

[1]Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A Bolshaya Morskaya St., Saint Petersburg, 190000, Russia
[2]Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia

Corresponding Author: Kh. O. Barkhhuev, e-mail: axado111@gmail.com

ABSTRACT

The study aims to experimentally assess the thermal load from a shore wastewater outfall after local treatment facilities and the parameters of temperature field formation in a small watercourse. Field investigations were conducted on 15 March 2026 at the Smolyachkov Creek located in the village of Molodyozhnoye, Leningrad Region. The measurement configuration comprised a BLE-C600 contact analyzer, a FLIR ThermaCAM E300 ground-based radiometric thermal imaging system, and a Seek CompactXR camera mounted on an unmanned aerial platform. The survey was conducted before sunrise at –0.8 to –0.6 °C and 1.1–1.3 m/s wind speed. The mixing zone was delineated by the excess of surface water temperature above the background level. The contrast threshold was 0.6 °C. Comparison of the results at six control points gave for FLIR an average bias of +0.43 °C and an RMSE of 0.51 °C, for Seek — +0.23 and 0.42 °C, respectively. The contact temperature decreased from 6.5 °C at the outfall cross-section to 2.0 °C at a distance of 6 m, while the background temperature was 1.0 °C. The surface anomaly area was 10.6 m², with a maximum length and width of 6.8 and 2.4 m, respectively. Empirical approximation of the normalized contrast with an exponential yielded an effective attenuation coefficient of 0.27 m^{-1} and a characteristic length of 3.7 m. The study demonstrates that the combined application of contact and thermal imaging measurements allows the thermally disturbed zone to be rapidly localized and yields the parameters required for an engineering assessment of thermal impact. The results are based on a single winter observation series and are not intended to replace discharge, hydrodynamic or hydrochemical studies.

Keywords: thermal load, wastewater, infrared thermography, temperature field, mixing zone, unmanned aerial vehicle, small watercourse

For citation: Shishkin I. A., Romanova L. V., Barkhuev Kh. O. (2026) 'Experimental assessment of thermal load from a shore wastewater outfall by infrared thermography', Technology and Energy, vol. 3, no. 3, pp. 60–70. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_60–70.

ВВЕДЕНИЕ

Температурное воздействие выпусков сточных вод представляет собой перенос в водный объект не только вещества, но и энтальпии. Даже при нормативном химическом составе локальная тепловая нагрузка изменяет плотностную стратификацию, интенсивность турбулентного перемешивания и кислородный режим приёмника. Для малых водотоков особенно существенны кратковременные и малорасходные выпуски: их вклад трудно характеризовать редкой сетью точечных проб, тогда как пространственная форма температурного возмущения меняется на масштабе нескольких метров. Инфракрасная термография рассматривается как средство быстрого поиска подобных участков; современная полевая апробация показала её применимость для выявления сбросов с обязательной наземной верификацией [1]. Российские исследования беспилотного мониторинга водных объектов также подчёркивают необходимость объединения оптических, тепловых и контактных каналов [2].

Высокое пространственное разрешение беспилотной тепловой съёмки позволяет заполнить масштабный разрыв между контактной точкой и спутниковым пикселем. Для тепловых стоков в ручьях и прибрежных акваториях продемонстрирована возможность картирования градиентов после полевой радиометрической калибровки [3]. Совмещение тепловизионного изображения с сетью погружных датчиков выявляет как локальную поверхностную структуру факела, так и ограничения интерпретации поверхностной температуры в качестве температуры всего водного столба [4]. Поэтому с теплотехнической точки зрения информативен не только факт наличия аномалии, но и её начальный температурный напор, закономерность затухания контраста, геометрические параметры и оценка переносимой тепловой мощности.

Главным метрологическим затруднением является различие между радиационной температурой тонкого поверхностного слоя и контактной температурой воды. Показания неохлаждаемых микроболометрических камер зависят от собственного нагрева корпуса, угла визирования, излучательной способности воды, отражения холодного неба и атмосферного пути. Снижение внешнего нагрева датчика и полевая привязка повышают точность определения температуры воды [5], а сравнительные испытания разных беспилотных тепловизоров показывают, что абсолютная погрешность конкретного канала должна быть установлена в условиях съёмки [6]. Из этого следует практический принцип: для локализации зоны смешения первичным показателем является контраст внутри одного кадра, а абсолютные значения должны контролироваться погружным датчиком.

Тепловые изображения применяются для обнаружения воды в малых руслах [7], картирования выходов грунтовых вод [8], поиска наземных и прибрежных источников тепла с беспилотных платформ [9]

и по космическим данным [10]. Дистанционные методы расширяют охват мониторинга водных объектов [11], а видимый диапазон дополняет тепловой канал при распознавании береговой линии и поверхностных загрязнений [12]. Вместе с тем опубликованные результаты недостаточно описывают малые зимние береговые выпуски с расходом порядка единиц кубических метров в час, для которых температурный контраст велик, а пространственный размер возмущённой зоны мал.

Цель работы — экспериментально оценить тепловую нагрузку берегового выпуска сточных вод после локальных очистных сооружений и параметры зоны смешения по совместным контактным, наземным и аэротепловизионным данным. Для достижения цели решались задачи: (1) сформировать согласованную измерительную схему и условия съёмки, снижающие влияние инсоляции; (2) сопоставить температуры, полученные тремя каналами; (3) определить порог, площадь и линейные размеры поверхностной термоаномалии; (4) рассчитать эффективный коэффициент затухания температурного контраста и оценочную тепловую мощность выпуска. Объект исследования — температурное поле ручья в зоне берегового выпуска; предмет — измеряемые и расчётные параметры переноса теплоты на начальном участке смешения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследован береговой выпуск сточных вод после локальных очистных сооружений «Молодёжное» в Смолячков ручей (пос. Молодёжное, Курортный район Санкт-Петербурга; 60,191703° с. ш., 29,526627° в. д.). Выпуск выполнен трубой, внутренний диаметр которой по визуальной оценке составлял около 0,30 м; глубина потока на срезе — около 0,08 м. Поступление воды имело периодический характер. Общий вид участка приведён на рисунке 1. Вода, прошедшая заглублённые участки сети и сооружения, была теплее почти замерзающего водотока, что формировало положительную поверхностную температурную аномалию.



Рисунок 1. Общий вид берегового выпуска в Смолячков ручей
Figure 1. General view of the coastal discharge into the Smolyachkov Stream

Наблюдения выполнены 15 марта 2026 г. в интервале 06:30–07:10 местного времени во время активной фазы выпуска. Съёмка до восхода солнца исключала прямой солнечный нагрев поверхности. Снежный покров на берегах повышал визуальный тепловой контраст, однако одновременно создавал резкие границы «вода — берег», поэтому при обработке применяли маску водной поверхности. Метеорологические параметры и геометрия измерений приведены в таблице 1. Изменение температуры воздуха за серию не превышало 0,2 °C, а скорость ветра оставалась в диапазоне 1,1–1,3 м/с, что позволяет рассматривать серию как квазистационарную в пределах 40 мин.

Расход выпуска определяли ориентировочно по геометрии видимой струи и скорости её движения; получено $q \approx 1{,}0$ м³/ч (0,278 л/с). Это значение использовано только для оценки порядка тепловой мощности. Поскольку расходомер и профиль скоростей в трубе не применялись, результат не рассматривается как аттестованное измерение расхода и не используется для расчёта массы загрязняющих веществ.

Измерительные каналы и размещение точек. Контактную температуру измеряли многопараметрическим анализатором BLE-C600 с погружным датчиком. Датчик располагали на глубине 0,05 м, выдерживали в точке не менее 60 с и фиксировали среднее трёх последовательных показаний. Дискретность регистрации составляла 0,1 °C; расширенная неопределённость контактного канала принята равной 0,2 °C при коэффициенте охвата $k = 2$.

Таблица 1. Условия выполнения измерительных серий
Table 1. Conditions of the measurement series

Канал	Время	Метеоусловия	Геометрия / режим
Контактный	06:30–06:52	t_a=−0,8 °C; φ=86%; v=1,1 м/с	глубина датчика 0,05 м
Наземный FLIR	06:35–06:55	t_a=−0,7 °C; φ=85%; v=1,2 м/с	дистанция 2 м; высота 1,4 м
Беспилотный Seek	06:56–07:08	t_a=−0,6 °C; φ=84%; v=1,3 м/с	высота 30 м; скорость 2 м/с

Обозначения: t_a — температура воздуха; φ — относительная влажность; v — скорость ветра.

Таблица 2. Характеристики тепловизионных каналов
Table 2. Characteristics of the thermal imaging channels

Параметр	FLIR ThermaCAM E300	Seek CompactXR
Приёмник	неохлаждаемый микроболометр	VOx-микроболометр
Разрешение	320 × 240 пикс.	206 × 156 пикс.
Спектральный диапазон	7,5–13 мкм	7,5–14 мкм
Температурная чувствительность	0,10 °C при 30 °C	не заявлена
Паспортная точность	±2 °C или ±2%	не заявлена
Поле зрения	15° (установленный объектив)	20°
Частота кадров	до 50/60 Гц	менее 9 Гц
Фокусировка	ручная	ручная
Формат данных	радиометрический JPEG	фото/видео смартфона

Наземную радиометрическую серию регистрировали тепловизором FLIR ThermaCAM E300. Аэросъёмку выполняли камерой Seek CompactXR, установленной вместе с двумя оптическими камерами на беспилотной платформе (см. рисунок 2). Основные паспортные характеристики двух тепловых каналов систематизированы в таблице 2 по материалам изготовителей [13, 14]. Поскольку для Seek CompactXR не заявлена метрологическая точность абсолютного измерения температуры и записывался не полноценный радиометрический массив, этот канал использован для пространственной реконструкции и приведён к контактным точкам; независимым радиометрическим каналом считался FLIR.

Паспортные данные приведены для идентификации измерительных каналов; фактическая сопоставимость с контактным каналом оценивалась по полевым данным.

FLIR располагали на расстоянии около 2 м от поверхности при высоте 1,4 м и угле визирования 35–45°. В настройках камеры использовали коэффициент излучения ε=1,00. Для воды реальное значение обычно несколько ниже; поэтому возможное систематическое смещение абсолютной температуры не корректировали по одному предположительному значению ε, а оценили по контактным точкам. При таком подходе диагностическим признаком служит разность температур внутри кадра, полученного при неизменных настройках.

Беспилотный маршрут выполняли на высоте 30 м со скоростью около 2 м/с, продольным перекрытием

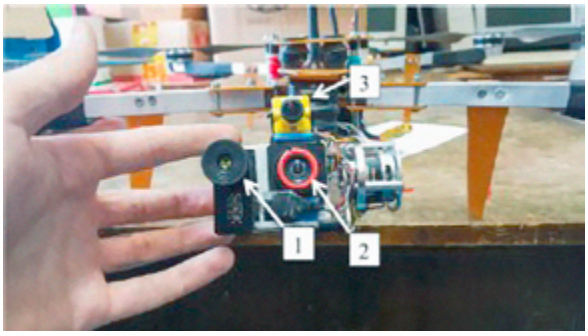


Рисунок 2. Компоновка полезной нагрузки беспилотной платформы
Figure 2. Payload layout of the unmanned platform

80% и поперечным 70%. При поле зрения 20° расчётная ширина полосы составляла 10,6 м, а проекция пикселя на местность — около 0,051 м. Два взаимно перпендикулярных прохода покрывали выпуск и участок русла длиной около 40 м. Точки измерения показаны на рисунке 3: Ф-1 — фон в 30 м выше выпуска; С-1 — срез выпуска; А-1 — центр аномалии; А-2 — её граница; Д-1 — точка на 6 м ниже выпуска; К-1 — контрольная точка без визуально выраженного влияния струи.

Обработка температурных данных. Из радиометрических JPEG-файлов FLIR извлекали 16-битную матрицу сигнала и встроенные параметры преобразования Планка. Для каждого из четырёх кадров анализировали прямоугольную область 106 × 80 пикселей после



Рисунок 3. Схема размещения контрольных точек у берегового выпуска
Figure 3. Layout of control points at the coastal discharge

исключения пикселей берега, снега и растительности. Рассчитывали минимум, среднее, медиану, 95-й процентиль и максимум. Использование процентиля наряду с максимумом уменьшает влияние одиночных горячих пикселей.

Температурный контраст в i-й точке определяли относительно фоновой точки Ф-1:

$$\Delta T_i = T - T_F, \qquad (1)$$

где T_i — температура поверхности или контактная температура в исследуемой точке;
T_F — фоновая температура выше выпуска.

Порог выделения аномалии задавали консервативно как

$$\Delta T_{thr} = max\,(3s_F,\, u_{\Delta T}), \qquad (2)$$

где s_F — стандартное отклонение температуры фоновой области кадра;
$u_{\Delta T}$ — оценка неопределённости разности температур.

Для рассматриваемой серии по исходным матрицам принят $\Delta T_{thr} = 0{,}6$ °C. Связная область водной маски, удовлетворяющая $\Delta T \geq \Delta T_{thr}$ и начинающаяся у среза выпуска, интерпретировалась как поверхностная зона температурного возмущения. Её площадь и максимальные линейные размеры определяли по масштабу беспилотного изображения.

Согласованность дистанционных каналов с контактным оценивали для шести точек. Рассчитывали среднее смещение b, среднюю абсолютную ошибку MAE, среднеквадратическую ошибку RMSE и коэффициент корреляции Пирсона r:

$$b = (1/n)\,\Sigma(T_{IR,\,i} - T_{C,\,i}). \qquad (3)$$

$$MAE = (1/n)\,\Sigma|T_{IR,\,i} - T_{C,\,i}|;$$
$$RMSE = \sqrt{\,[(1/n)\,\Sigma(T_{IR,\,i} - T_{C,\,i})^2]}. \qquad (4)$$

Для теплотехнического описания затухания возмущения использовали нормированный контактный температурный контраст $\theta(x)$ и его экспоненциальную аппроксимацию:

$$\theta(x) = [T\,(x) - T_F] \,/\, [T_S - T_F] \approx exp(-k_{eff}\,x), \qquad (5)$$

где T_S — температура на срезе выпуска;
x — расстояние вниз по течению;
k_{eff} — эффективный коэффициент затухания.

Коэффициент определяли методом наименьших квадратов для $\ln\theta$ при нулевом интерсепте по четырём точкам С-1, А-1, А-2 и Д-1. Характерную длину вычисляли как $L_T = 1/k_{eff}$. Аппроксимация является описательной и не заменяет решение уравнений конвективно-диффузионного теплопереноса, поскольку скорости, глубины и поперечное распределение температуры не измерялись.

Начальную тепловую мощность выпуска относительно фоновой воды оценивали по выражению 6:

$$\dot{Q}_T = \rho c_p q (T_S - T_F) \qquad (6)$$

при $\rho = 1000$ кг/м^3 и $c_p = 4180$ Дж/ (кг·К).

В расчёт подставляли оценочный расход q; поэтому $\dot{Q}_T$ используется как инженерная оценка порядка величины, а не как метрологически подтверждённая энергетическая характеристика выпуска.

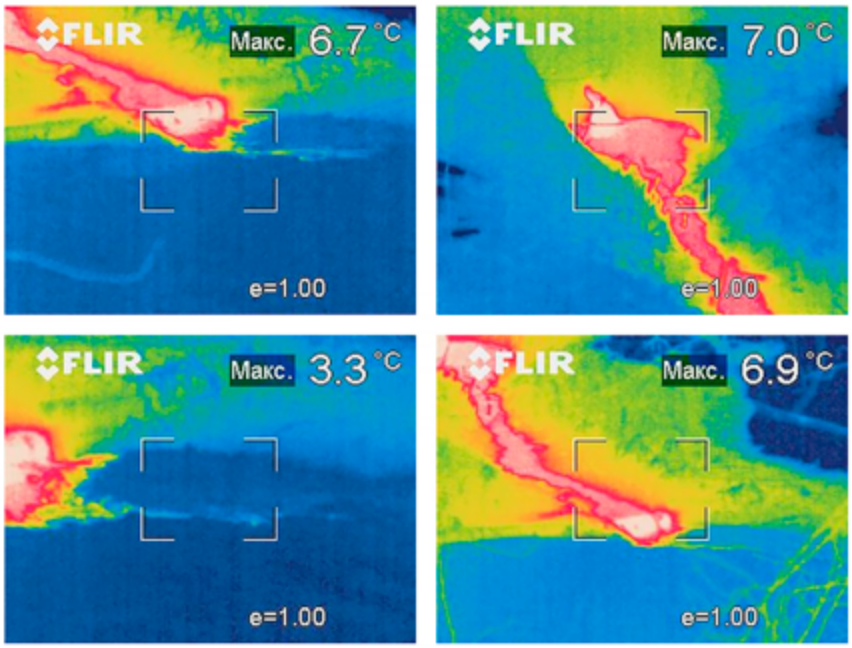


Рисунок 4. Репрезентативные термограммы берегового выпуска: вверху слева — IR_{0070}; вверху справа — IR_{0072}; внизу слева — IR_{0076}; внизу справа — IR_{0079}

Figure 4. Representative thermograms of the coastal discharge: top left — IR_{0070}; top right — IR_{0072}; bottom left — IR_{0076}; bottom right — IR_{0079}

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На всех четырёх радиометрических кадрах FLIR тёплая струя отделялась от более холодной поверхности ручья (рисунок 4). Максимальная температура была локализована у среза сооружения и вдоль начального участка зоны смешения. Кадр IR_{0076} имел иной ракурс и включал меньшую долю горячей области, чем остальные кадры; поэтому его максимум 3,35 °C нельзя интерпретировать как достоверное кратковременное снижение температуры выпуска без синхронного расходометрического наблюдения.

Статистики выбранной измерительной области приведены в таблице 3. Максимумы изменялись от 3,35 до 7,05 °C, а медиана четырёх максимальных значений составляла 6,81 °C. Для трёх кадров с полным охватом струи 95-й процентиль находился в узком диапазоне 6,11–6,24 °C, что устойчивее единичного максимума и согласуется с контактной температурой 6,5 °C у выпуска. Среднее и медиана кадра изменялись сильнее, поскольку зависели от доли фоновой воды внутри фиксированной прямоугольной области.

Сопоставление измерительных каналов. Результаты синхронизированного сопоставления в контрольных точках представлены в таблице 4. На срезе выпуска контактный канал зарегистрировал 6,5 °C при фоне 1,0 °C, то есть исходный температурный напор относительно фоновой воды равнялся 5,5 °C. На расстоянии 6 м контактная температура снизилась до 2,0 °C, однако оставалась на 1,0 °C выше фоновой. Все три канала воспроизводили одинаковую последовательность точек по температуре.

Таблица 3. Статистики радиометрических кадров FLIR в измерительной области, °C

Table 3. Statistics of FLIR radiometric frames in the measurement region, °C

Кадр	Минимум	Среднее	Медиана	P95	Максимум
IR_{0070}	1,05	2,47	1,59	6,24	6,72
IR_{0072}	2,04	4,39	4,39	6,16	7,05
IR_{0076}	1,56	2,12	2,08	2,61	3,35
IR_{0079}	1,65	3,67	3,30	6,11	6,89

P95 – 95-й процентиль распределения температуры пикселей после применения водной маски.

Таблица 4. Температура в контрольных точках по трём измерительным каналам
Table 4. Temperature at control points across three measurement channels

Точка	Положение	Контактный канал, °C	FLIR E300, °C	Seek CompactXR, °C
Ф-1	фон, 30 м выше	1,0 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,7 ± 0,2
С-1	срез, 0 м	6,5 ± 0,1	6,7 ± 0,1	6,3 ± 0,2
А-1	центр, 0,8 м	6,1 ± 0,1	6,5 ± 0,1	6,2 ± 0,2
А-2	граница, 2,5 м	4,2 ± 0,1	4,5 ± 0,2	4,3 ± 0,2
Д-1	ниже, 6,0 м	2,0 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,0 ± 0,2
К-1	контроль, 8,0 м	1,1 ± 0,1	1,9 ± 0,1	1,8 ± 0,2

Значения после знака ± воспроизводят разброс повторных показаний исходной серии и не являются доверительными интервалами. Для контактного канала расширенная неопределённость U=0,2 °C (k=2).

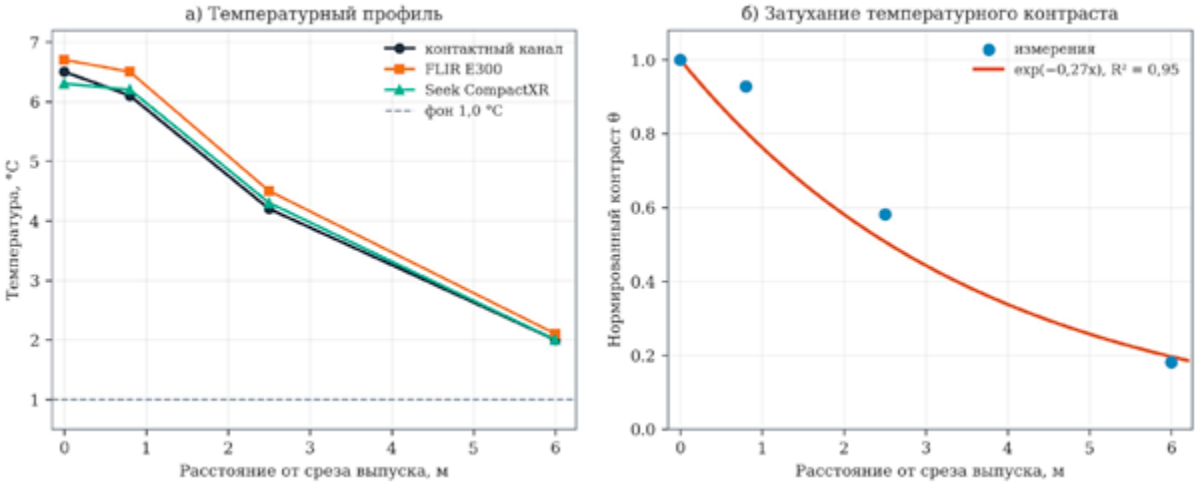


Рисунок 5. Изменение температуры и нормированного температурного контраста вниз по течению. Источник: расчёт автора по данным таблицы 4

Figure 5. Variation of temperature and normalized temperature contrast downstream. Source: calculated by the author from Table 4 data

Продольные профили на рисунке 5а показывают близость трёх каналов в тёплой части диапазона и положительное смещение бесконтактных измерений в холодных фоновых точках. Для FLIR получены $b = +0{,}43$ °C, MAE = 0,43 °C, RMSE = 0,51 °C и $r = 0{,}994$; для Seek — $b = +0{,}23$ °C, MAE = 0,30 °C, RMSE = 0,42 °C и $r = 0{,}994$. Диаграмма согласования приведена на рисунке 6. Высокий коэффициент корреляции обусловлен широким диапазоном 1,0–6,5 °C и малым объёмом выборки $n = 6$; он подтверждает совпадение пространственного тренда, но не является самостоятельной полной метрологической валидацией.

Наибольшие расхождения обоих бесконтактных каналов наблюдались в точках Ф-1 и К-1 с низкой температурой. Для FLIR разность с контактным датчиком там составляла +0,8 °C, для Seek — +0,7 °C. Это согласуется с влиянием отражённого излучения, угла наблюдения, доли береговых пикселей и температурного состояния корпуса неохлаждаемого детектора [5, 6]. В тёплой зоне С-1 — Д-1 расхождения FLIR с контактом не превышали 0,4 °C, Seek — 0,2 °C. Полученная RMSE Seek не должна трактоваться как паспортная точность: значения этого канала были полево привязаны, а выборка содержала те же контрольные точки.

Геометрия зоны смешения и теплотехнические параметры. При пороге $\Delta T_{thr} = 0{,}6$ °C на аэротепловизионной реконструкции выделена одна связная область, начинавшаяся у среза трубы и вытянутая вниз по течению (рисунок 7). Площадь области составила 10,6 м², максимальная длина — 6,8 м, ширина — 2,4 м. Связность с выпуском и монотонное снижение температуры отличают эту область от локальных тёплых фрагментов берега и растительности. Исходные аэроматериалы участка режимного объекта не публикуются; рисунок представляет пространственную реконструкцию по обработанным данным.

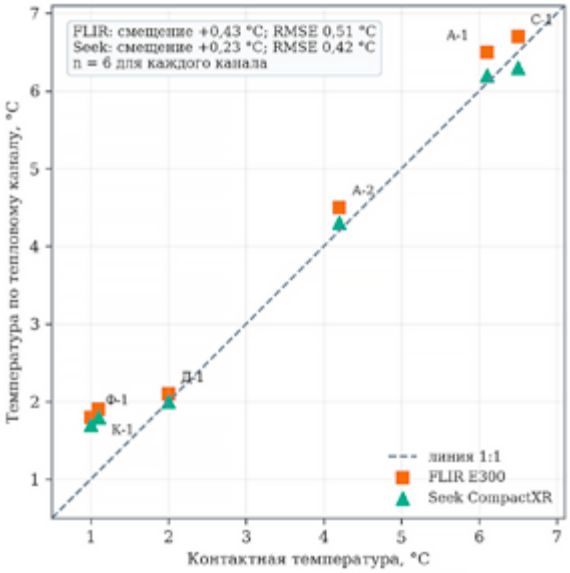


Рисунок 6. Согласование тепловизионных каналов с контактными измерениями в 6 точках. Источник: расчёт автора по данным таблицы 4

Figure 6. Agreement of thermal imaging channels with contact measurements at 6 points. Source: calculated by the author from Table 4 data



Рисунок 7. Реконструкция температурной аномалии в зоне выпуска сточных вод по данным аэротепловизионной съёмки

Figure 7. Reconstruction of the temperature anomaly in the wastewater discharge zone from aerial thermal imaging data

Таблица 5. Итоговые характеристики температурного воздействия выпуска

Table 5. Final characteristics of the thermal impact of the discharge

Показатель	Значение	Статус / основание
Фоновая температура	1,0 °C	контактное измерение, Ф-1
Температура на срезе	6,5 °C	контактное измерение, С-1
Начальный контраст	5,5 °C	расчёт по формуле (1)
Порог аномалии	0,6 °C	расчёт по формуле (2)
Площадь / длина / ширина	10,6 м² / 6,8 м / 2,4 м	обработка аэросъёмки
Эффективный коэффициент затухания	0,27 м$^{-1}$	аппроксимация, n=4
Характерная длина	3,7 м	обратная величина коэффициента
Расход	≈1,0 м³/ч	визуально-геометрическая оценка
Тепловая мощность	≈6,4 кВт	оценка по формуле (6)

Нормированный контактный контраст θ уменьшился от 1,00 на срезе до 0,93 в точке А-1, 0,58 в точке А-2 и 0,18 в точке Д-1. Следовательно, на расстоянии 6 м утрачено около 82% исходного поверхностного температурного контраста. Экспоненциальная аппроксимация четырёх точек дала k_{eff}=0,27 м$^{-1}$, L_T=3,7 м и R^2=0,95 (рисунок 5б). Параметр k_{eff} интегрально отражает совместное действие разбавления, турбулентного переноса и теплообмена с атмосферой и руслом только для данной серии; разделить вклады этих механизмов по имеющимся данным нельзя.

При q=1,0 м³/ч и ΔT_S=5,5 °C по формуле (6) получено $\dot{Q}_T$=6,39 кВт, округлённо 6,4 кВт. Даже небольшая по абсолютной величине мощность создаёт выраженный локальный сигнал из-за малого расхода и низкой фоновой температуры ручья. Основные измеренные и расчётные характеристики сведены в таблице 5. Разделение статуса показателей принципиально: геометрия аномалии получена из обработанного изображения, температуры — измерены, тогда как тепловая мощность и коэффициент затухания рассчитаны с указанными допущениями.

Обсуждение применимости и ограничений. Полученные ошибки дистанционных каналов сопоставимы с опубликованными результатами полевой калибровки недорогих беспилотных тепловизоров. В работе [3]

после линейной привязки к контактным измерениям для ручья и прибрежной акватории получены RMSE 0,43 и 0,42 °C. В настоящей серии RMSE составила 0,51 °C для радиометрического FLIR и 0,42 °C для полево приведённого Seek. Сходство величин подтверждает реалистичность порядка ошибки, но прямое сравнение ограничено различиями камер, диапазонов температур, высоты и процедуры калибровки.

Комбинация поверхности и погружного датчика важна не только для коррекции смещения. Исследования трёхмерного температурного поля показали, что тепловизор регистрирует «кожу» воды и может недооценивать максимум подводной струи [4]. В рассматриваемом случае датчик погружали лишь на 0,05 м, поэтому результаты характеризуют приповерхностный слой и начальный участок смешения. Нельзя утверждать, что выделенный контур совпадает со всей трёхмерной зоной воздействия. Для такого вывода необходимы вертикальные профили, батиметрия и измерение скорости течения.

Выбор предрассветного зимнего окна оказался методически оправдан: он усилил контраст между тёплой водой сети и холодным приёмником и снизил неоднородность от солнечного прогрева. Подобные условия используют при картировании водных выходов [8], а российские беспилотные наблюдения также демонстрируют сильную зависимость температурного изображения от времени суток, поверхности и высоты [9]. Однако зимний контраст нельзя переносить на тёплый сезон: при близких температурах стока и приёмника чувствительность метода снизится, а мелководье и нагретые берега могут давать ложные положительные области.

Практическое назначение предложенной измерительной схемы — инженерное экспресс-обследование: локализация выпуска, выделение приоритетной зоны для пробоотбора и получение исходных параметров для последующего расчёта теплопереноса. Температурная аномалия сама по себе не доказывает превышение нормативов по составу сточных вод и не раскрывает химическую природу загрязнения. Она также может быть вызвана грунтовым притоком, мелководьем или локальным теплообменом с сооружениями, поэтому обязательны проверка связности аномалии с выпуском, контрольная точка выше по течению и подтверждение контактными измерениями.

К ограничениям исследования относятся одна дата наблюдений, четыре радиометрических кадра, шесть контрольных точек, отсутствие независимой контрольной серии для калибровки Seek, оценочный расход, отсутствие профилей скорости и температуры по глубине, а также непубликация исходной беспилотной мозаики. Поэтому k_{eff} и $\dot{Q}_T$ не следует использовать как нормативные или годовые характеристики объекта. Для дальнейшей верификации необходимы повторные съёмки в разные сезоны и при разных расходах, радиометрический беспилотный тепловизор, измеритель расхода, несколько погружных логгеров по глубине, термостабильные наземные реперы и независимое разделение точек калибровки и проверки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным одной зимней натурной серии установлено, что береговой выпуск сточных вод после локальных очистных сооружений формировал устойчивое положительное температурное возмущение поверхности Смолячкова ручья. При фоне 1,0 °C температура на срезе выпуска составляла 6,5 °C, а на расстоянии 6 м — 2,0 °C. При пороге контраста 0,6 °C площадь связной аномалии равнялась 10,6 м², её длина и ширина — 6,8 и 2,4 м.

Сопоставление шести точек подтвердило воспроизводимость пространственного тренда: для FLIR получены смещение +0,43 °C и RMSE 0,51 °C, для полево приведённого Seek — +0,23 и 0,42 °C. Максимальные систематические расхождения наблюдались на холодном фоне, поэтому для абсолютной термометрии требуется контактная привязка, а для оперативного выделения зоны смешения целесообразно использовать внутрикадровый температурный контраст.

Нормированный контраст на участке 0–6 м описан экспонентой с эффективным коэффициентом 0,27 м$^{-1}$ и характерной длиной 3,7 м ($R^2 = 0{,}95$; $n = 4$). При оценочном расходе 1,0 м³/ч начальная тепловая мощность выпуска составила около 6,4 кВт. Эти расчётные параметры пригодны для постановки последующих гидротеплотехнических измерений и выбора границ детального обследования, но из-за ограниченного объёма данных не являются нормативными характеристиками объекта.

Таким образом, совместная контактная, наземная радиометрическая и беспилотная тепловая съёмка может применяться в экологическом инжиниринге как этап экспресс-оценки теплового воздействия малых выпусков. Для перехода от поверхностной диагностики к полному балансу теплоты методика должна быть дополнена прямым измерением расхода, скоростей и вертикального распределения температуры.

Список литературы

1. Калюжин А. С., Морозова М. А., Замараев В. С., Синицына О. О. Обнаружение несанкционированного сброса сточных вод в поверхностный водный объект методом

инфракрасной термографии // Гигиена и санитария. 2025. Т. 104, № 10. С. 1257–1262. DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-10-1257-1262.
2. Шишкин И. А., Бархуев Х. О., Жильникова Н. А., Березина А. А., Смирнова В. О. Методы и средства дистанционной идентификации показателей качества воды в водном объекте с применением беспилотных летательных аппаратов // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 1 (55). С. 62–70. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-62-70.
3. Baek S., Jung J., Jung H.-S. High-Resolution Mapping of Thermal Effluents in Inland Streams and Coastal Seas Using UAV-Based Thermal Infrared Imagery // Remote Sensing. 2026. Vol. 18, No. 8. Art. 1121. DOI: 10.3390/rs18081121.
4. Loerke E., Wilkinson M., Pohle I., Daalmans R., Addy S., Geris J. Integration of Thermal Infrared Imagery With an In Situ Sensor System Reveals Effects of Thermal Discharge Against Natural Background Variations in Water Temperature // River Research and Applications. 2025. Vol. 41, No. 10. P. 2092–2106. DOI: 10.1002/rra. 70021.
5. O'Sullivan A. M., Kurylyk B. L. Limiting External Absorptivity of UAV-Based Uncooled Thermal Infrared Sensors Increases Water Temperature Measurement Accuracy // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No. 24. Art. 6356. DOI: 10.3390/rs14246356.
6. Niwa H. Comparison of the Accuracy of Two UAV–Mounted Uncooled Thermal Infrared Sensors in Predicting River Water Temperature // River Research and Applications. 2022. Vol. 38, No. 9. Pp. 1660–1667. DOI: 10.1002/rra. 4027.
7. Micieli M., Botter G., Mendicino G., Senatore A. UAV Thermal Images for Water Presence Detection in a Mediterranean Headwater Catchment // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No. 1. Art. 108. DOI: 10.3390/rs14010108.
8. Watts C. L., Hatch C. E., Wicks R. Mapping Groundwater Discharge Seeps by Thermal UAS Imaging on a Wetland Restoration Site // Frontiers in Environmental Science. 2023. Vol. 10. Art. 946565. DOI: 10.3389/fenvs. 2022.946565.
9. Лунина О. В., Гладков А. А. Первые результаты тепловизионной съёмки геологических объектов на Байкале с использованием квадрокоптера // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506, № 1. С. 73–78. DOI: 10.31857/S2686739722600771.
10. Гурулев А. А., Замана Л. В., Куклин А. П., Казанцев В. А. Выявление термальных источников с использованием космических методов исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 2. С. 131–140. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-131-140.
11. Мустафин М. Г., Вальков В. А., Павлов Н. С., Виноградов К. П., Боголюбова А. А. Мониторинг водных объектов дистанционными методами // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 2. С. 67–75. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75.
12. Барабанова Е. А., Вытовтов К. А., Гладких Т. Я., Мигачев А. Н. Экологический мониторинг загрязнений водной поверхности в видимом диапазоне с использованием БПЛА // Физические основы приборостроения. 2022. Т. 11, № 4 (46). С. 60–67. EDN: JEVQFL.
13. FLIR Systems AB. ThermaCAM E300: Technical Specifications. Danderyd, Sweden, 2006. URL: https://www. grimas. hu/wp-content/uploads/2014/02/SiteCollectionImages/700_FLIR/ThermaCAM_E300_hokamera/ThermaCAM_E300_infra_hokamera_EN.pdf (дата обращения: 11.04.2026).
14. Seek Thermal, Inc. Seek CompactXR: Technical Summary and Key Specifications. Santa Barbara, USA, 2015. URL: https://www. thermal. com/uploads/1/0/1/3/101388544/compactxr-sellsheet-usa_web.pdf (дата обращения: 11.04.2026).

References

1. Kalyuzhin A. S., Morozova M. A., Zamaraev V. S. and Sinitsyna O. O. (2025) 'Detection of unauthorized wastewater discharge into a surface water body by infrared thermography', Hygiene and Sanitation, 104 (10), pp. 1257–1262. DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-10-1257-1262.
2. Shishkin I. A., Barkhkhuev Kh. O., Zhilnikova N. A., Berezina A. A. and Smirnova V. O. (2024) 'Methods and means of remote identification of water quality indicators in a water body using unmanned aerial vehicles', Environmental Control Systems, 1 (55), pp. 62–70. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-62-70.
3. Baek S., Jung J. and Jung H.-S. (2026) 'High-resolution mapping of thermal effluents in inland streams and coastal seas using UAV-based thermal infrared imagery', Remote Sensing, 18 (8), art. 1121. DOI: 10.3390/rs18081121.
4. Loerke E., Wilkinson M., Pohle I., Daalmans R., Addy S. and Geris J. (2025) 'Integration of thermal infrared imagery with an in situ sensor system reveals effects of thermal discharge against natural background variations in water temperature', River Research and Applications, 41 (10), pp. 2092–2106. DOI: 10.1002/rra. 70021.
5. O'Sullivan A. M. and Kurylyk B. L. (2022) 'Limiting external absorptivity of UAV-based uncooled thermal infrared sensors increases water temperature measurement accuracy', Remote Sensing, 14 (24), art. 6356. DOI: 10.3390/rs14246356.
6. Niwa H. (2022) 'Comparison of the accuracy of two UAV-mounted uncooled thermal infrared sensors in predicting river water temperature', River Research and Applications, 38 (9), pp. 1660–1667. DOI: 10.1002/rra. 4027.
7. Micieli M., Botter G., Mendicino G. and Senatore A. (2022) 'UAV thermal images for water presence detection in a Mediterranean headwater catchment', Remote Sensing, 14 (1), art. 108. DOI: 10.3390/rs14010108.
8. Watts C. L., Hatch C. E. and Wicks R. (2023) 'Mapping groundwater discharge seeps by thermal UAS imaging

on a wetland restoration site', Frontiers in Environmental Science, 10, art. 946565. DOI: 10.3389/fenvs. 2022.946565.
9. Lunina O. V. and Gladkov A. A. (2022) 'First results of thermal imaging of geological objects on Lake Baikal using a quadcopter', Doklady of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences, 506 (1), pp. 73–78. DOI: 10.31857/S2686739722600771.
10. Gurulev A. A., Zamana L. V., Kuklin A. P. and Kazantsev V. A. (2024) 'Identification of thermal springs using space research methods', Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 21 (2), pp. 131–140. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-131-140.
11. Mustafin M. G., Valkov V. A., Pavlov N. S., Vinogradov K. P. and Bogolyubova A. A. (2023) 'Monitoring of water bodies by remote methods', Vestnik SGUGiT, 28 (2), pp. 67–75. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75.
12. Barabanova E. A., Vytovtov K. A., Gladkikh T. Ya. and Migachev A. N. (2022) 'Ecological monitoring of water surface pollution in the visible range using UAVs', Physical Foundations of Instrument Engineering, 11, 4 (46), pp. 60–67. EDN: JEVQFL.
13. FLIR Systems AB (2006) ThermaCAM E300: Technical Specifications. Danderyd, Sweden. Available at: https://www. grimas. hu/wp-content/uploads/2014/02/SiteCollectionImages/700_FLIR/ThermaCAM_E300_hokamera/ThermaCAM_E300_infra_hokamera_EN.pdf (Accessed: 11 April 2026).
14. Seek Thermal, Inc. (2015) Seek CompactXR: Technical Summary and Key Specifications. Santa Barbara, USA. Available at: https://www. thermal. com/uploads/1/0/1/3/101388544/compactxr-sellsheet-usa_web.pdf (Accessed: 11 April 2026).

Информация об авторах

Шишкин Илья Александрович, *кандидат технических наук, доцент, Институт фундаментальной подготовки и технологических инноваций (Институт ФПТИ), Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 190000, Россия, Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д. 67, лит. А; ORCID: 0000-0001-9220-1181; SPIN-код: 7628–5712; AuthorID РИНЦ: 964677; e-mail: _ilya@mail.ru.*

Романова Лидия Владимировна, *кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 7810–2141; AuthorID РИНЦ: 151370; e-mail: lv_romanova@mail.ru*

Бархуев Халид Османович, *инженер экологического компьютерного центра СПбГУПТД, заведующий лабораторией, ассистент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0000-0001-5415-7108; SPIN-код: 7626–1362; AuthorID РИНЦ: 1141753; e-mail: axado111@gmail.com.*

Information about the authors

Shishkin Ilya Aleksandrovich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Fundamental Training and Technological Innovations (Institute of FPTI), St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 67, lit. A Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg, 190000, Russia; ORCID: 0000-0001-9220-1181; SPIN code: 7628–5712; RSCI AuthorID: 964677; e-mail: _ilya@mail.ru.*

Romanova Lidiya Vladimirovna, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN code: 7810–2141; RSCI AuthorID: 151370; e-mail: lv_romanova@mail.ru.*

Barkhhuev Khalid Osmanovich, *Engineer of the Environmental Computer Center of SPbGUPTD, Head of the Laboratory, Assistant of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0000-0001-5415-7108; SPIN code: 7626–1362; RSCI AuthorID: 1141753; e-mail: axado111@gmail.com.*

Научная статья
УДК 004.932.2:502.175:574.5
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_71–79

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Илья Александрович Шишкин[1], Александр Игоревич Кушнеров[2], Халид Османович Барххуев[2], Ирина Александровна Сашнина[3]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербург, Россия
[3] Государственное областное автономное учреждение «Новгородский Кванториум», г. Великий Новгород, Россия

© Шишкин И. А., Кушнеров А. И., Барххуев Х. О., Сашнина И. А., 2026

Автор-корреспондент: Х. О. Барххуев, e-mail: axado111@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Разработан и апробирован подход к модернизации программно-технического комплекса автоматизированного распознавания зоопланктонных организмов для задач экологического мониторинга водных объектов. Актуальность работы обусловлена высокой трудоемкостью традиционного гидробиологического анализа в камере Богорова и зависимостью результата от квалификации оператора. В модернизированном комплексе совмещены цифровая микроскопия, управляемое позиционирование пробы, нейросетевая детекция объектов и программный учет уникальных организмов. Аппаратная часть включает микроконтроллер ESP32, драйверы TMC2209, линейные актуаторы, USB-микроскоп, камеру Богорова и персональный компьютер, выполняющий инференс модели. Для расширения предметной области сформирована и переразмечена обучающая выборка по девяти таксонам пресноводного зоопланктона; применялись отбраковка некачественных кадров, разметка ограничивающими рамками и аугментация изображений. В программной части реализовано присвоение объектам уникальных идентификаторов, что предотвращает повторный учет одного организма при последовательном просмотре видеопотока; введен порог доверия 0,15 для исключения низкоуверенных срабатываний. На контрольном видеоматериале система сформировала итоговую статистику по 54 уникальным объектам шести распознанных классов, а зарегистрированное время инференса отдельных кадров находилось примерно в диапазоне 98–103 мс. Показано, что предложенная архитектура обеспечивает переход от визуального обнаружения к воспроизводимому машинному подсчету и формированию структурированных данных. Ограничением текущего этапа является отсутствие в материалах проекта полной метрической валидации по precision, recall и mAP на независимой тестовой выборке; такая валидация определена как обязательный следующий этап перед применением комплекса в регулярном экологическом мониторинге. Предложена последовательность дальнейшей метрической валидации и подготовки комплекса к практическому применению.

Ключевые слова: экологический мониторинг, зоопланктон, компьютерное зрение, нейронные сети, YOLO, автоматизация, гидробиологический анализ, камера Богорова, распознавание изображений

Для цитирования: Шишкин И. А., Кушнеров А. И., Барххуев Х. О., Сашнина И. А. Модернизация программно-технического комплекса автоматизированного гидробиологического мониторинга водных объектов на основе компьютерного зрения // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 71–79. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_71–79.

MODERNIZATION OF THE SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR AUTOMATED HYDROBIOLOGICAL MONITORING OF WATER BODIES BASED ON COMPUTER VISION

Ilya Alexandrovich Shishkin[1], Alexander Igorevich Kushnerov[2], Khalid Osmanovich Barkhhuev[2], Irina Alexandrovna Sashnina[3]

[1]Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia
[2]Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia
[3]State Regional Autonomous Institution "Novgorod Quantorium", Veliky Novgorod, Russia

Corresponding Author: Kh. O. Barkhhuev, e-mail: axado111@gmail.com

ABSTRACT

An approach to the modernization of a software and hardware system for the automated recognition of zooplankton organisms for aquatic environmental monitoring has been developed and tested. The relevance of the study is associated with the high labor intensity of conventional hydrobiological analysis using a Bogorov counting chamber and the dependence of the results on the operator's qualifications. The upgraded system integrates digital microscopy, controlled sample positioning, neural-network-based object detection, and software-based tracking and counting of unique organisms. The hardware configuration includes an ESP32 microcontroller, TMC2209 drivers, linear actuators, a USB microscope, a Bogorov counting chamber, and a personal computer performing model inference.

To expand the range of recognizable organisms, a training dataset covering nine freshwater zooplankton taxa was compiled and re-annotated. The dataset preparation procedure included rejection of low-quality images, bounding-box annotation, and image augmentation. The software implements the assignment of unique identifiers to detected objects, thereby preventing repeated counting of the same organism during sequential video-stream analysis. A confidence threshold of 0.15 was introduced to exclude low-confidence detections.

During testing on control video data, the system generated final statistics for 54 unique objects belonging to six recognized classes, while the recorded inference time for individual frames was approximately 98–103 ms. The proposed architecture was shown to enable a transition from visual detection to reproducible machine-based counting and the generation of structured data.

A limitation of the current stage of the study is the absence of complete metric-based validation in terms of precision, recall, and mAP using an independent test dataset. Such validation has therefore been identified as a mandatory next step prior to the implementation of the system in routine environmental monitoring. A sequence of further metric validation procedures and measures required to prepare the system for practical application is proposed.

Keywords: environmental monitoring, zooplankton, computer vision, neural networks, YOLO, automation, hydrobiological analysis, Bogorov counting chamber, image recognition

For citation: Shishkin I. A., Kushnerov A. I., Barkhhuev Kh. O. and Sashnina I. A. (2026) 'Modernization of the software and hardware complex for automated hydrobiological monitoring of water bodies based on computer vision', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 71–79. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_71–79.

ВВЕДЕНИЕ

Зоопланктон является чувствительным компонентом водных экосистем: изменения его численности, таксономического состава и пространственно-временной структуры используются для оценки состояния водной среды. При этом классическая микроскопическая идентификация и подсчет требуют значительных затрат времени и участия подготовленного специалиста. Современные исследования показывают, что сочетание цифровой съемки, нейросетевой детекции и трекинга позволяет переводить такой анализ в полуавтоматический или автоматический режим и получать данные с существенно более высокой временной частотой [1].

Переход к автоматизированному мониторингу не означает простую замену специалиста алгоритмом. Для надежного применения необходимы контролируемые условия съемки, репрезентативная обучающая база, проверка переносимости модели на реальные пробы и сопоставление с традиционными методами. В обзорной работе по перспективам in situ визуализации отмечается необходимость периода параллельного использования цифровых систем

и классической таксономии до накопления достаточной доказательной базы [2]. Показано также, что современные сверточные сети способны обеспечивать высокую точность распознавания планктона при работе с независимыми природными пробами [3], однако качество классификации определяется не только архитектурой сети, но и циклом адаптации набора классов и обучающих данных [4].

Машинное извлечение признаков из изображений планктона открывает возможности не только для подсчета, но и для оценки размеров, морфологических и функциональных характеристик организмов [5]. В прикладных системах особое значение приобретает локальная обработка данных: программные комплексы DeepLOKI и другие решения показали возможность выполнять классификацию непосредственно на месте наблюдения без постоянной передачи исходных изображений во внешние сервисы [6]. Для ресурсоограниченных вычислителей развиваются методы компрессии и облегчения нейросетей, позволяющие сохранять приемлемое качество при повышении скорости обработки [7].

Обобщение современных методов компьютерного зрения для планктонных изображений показывает, что ключевыми задачами остаются корректная детекция мелких объектов, устойчивость к вариативности фонового изображения, межклассовое морфологическое сходство и переносимость моделей между разными оптическими системами [8]. В экологии планктона глубокое обучение рассматривается как инструмент снижения субъективности и повышения воспроизводимости анализа, но требует прозрачной валидации и контроля ошибок [9]. Систематические обзоры подчеркивают, что операционное внедрение таких решений отстает от исследовательских демонстраций именно из-за проблем качества данных, доменного сдвига и требований к интерпретируемости [10].

Для зоопланктона дополнительно важны размерные признаки и стабильность геометрических измерений: глубокие сети позволяют автоматизировать оценку размеров при разных ориентациях организмов, что расширяет экологическую информативность машинного анализа [11]. Пример систем реального времени RAPID показывает практическую ценность Edge AI для оперативной визуализации и адаптивного мониторинга, одновременно выявляя ограничение по пропускной способности вычислительной части при массовом потоке изображений [12].

Цель настоящей работы — модернизировать программно-технический комплекс (ПТК) автоматического распознавания зоопланктона методами компьютерного зрения и нейронных сетей для мониторинга водных объектов. В соответствии с материалами проекта решались четыре задачи: масштабирование обучающей выборки; рефакторинг и доработка инференс-кода; повышение надежности детекции и учета объектов; валидация функционального результата на контрольном материале. Научно-практическая новизна текущего этапа состоит в объединении управляемого сканирования камеры Богорова с нейросетевой детекцией и ID-ориентированным подсчетом уникальных организмов в едином цикле обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходной экспериментальной основой являлся проект модернизации ПТК, включающий автоматическое позиционирование пробы, цифровое получение изображения и нейросетевой анализ. Общая логика комплекса представлена на рисунке 1. В отличие от полностью ручной схемы, оператор после подготовки пробы получает последовательность кадров, формируемых при управляемом перемещении зоны анализа, а программная часть выполняет обнаружение, классификацию и накопление статистики.

Аппаратная часть прототипа (рисунок 2) построена вокруг микроконтроллера ESP32. Управление линейными актуаторами осуществляется через драйверы TMC2209; актуаторы обеспечивают позиционирование камеры Богорова относительно оптической зоны. Изображение формируется USB-микроскопом и передается на персональный компьютер, где выполняется нейросетевой инференс. Такое разделение функций позволяет оставить точное управление движением на микроконтроллерном уровне, а вычислительно более тяжелые операции компьютерного зрения — на ПК.

Функциональная последовательность обработки включает: размещение гидробиологической пробы; позиционирование зоны просмотра; получение кадра; предварительную обработку; нейросетевую детекцию; присвоение обнаруженному объекту класса и идентификатора; отслеживание объекта в последовательных кадрах; исключение повторного подсчета; накопление количества уникальных объектов по классам; формирование итоговой статистики. В текущей версии комплекса порог доверия детектора установлен на уровне 0,15. Значения ниже порога не включаются в итоговый подсчет, что уменьшает влияние слабых срабатываний на статистику.



Рисунок 1. Схема автоматизации экологического мониторинга водных объектов в проекте ПТК
Figure 1. Scheme of automation of environmental monitoring of water bodies in the hardware-software complex project



Рисунок 2. Аппаратная часть комплекса: ESP32, TMC2209, линейные актуаторы, USB-микроскоп, камера Богорова и ПК
Figure 2. Hardware part of the complex: ESP32, TMC2209, linear actuators, USB microscope, Bogorov camera, and PC

Обучающая база формировалась из микроскопических изображений гидробиологических проб. Согласно материалам проекта, в расширенный перечень вошли девять таксонов, приведенных в таблице 1. Снимки проходили сортировку и удаление кадров с низкой резкостью, неравномерным освещением, выраженными артефактами и шумом. Для разметки использовались LabelImg и Roboflow; объекты обозначались ограничивающими рамками с присвоением класса. Для увеличения вариативности применялись повороты, отражения, масштабирование, изменение яркости и добавление шумов. Иллюстрация процесса расширения базы приведена на рисунке 3.



Рисунок 3. Расширение и разметка базы изображений зоопланктона
Figure 3. Expansion and labeling of the zooplankton image dataset

Таблица 1. Состав расширенной обучающей базы
Table 1. Composition of the extended training dataset

№	Таксон (как указан в материалах проекта)	Функциональная группа
1	Senecella calanoides	веслоногие ракообразные
2	Bosmina longirostris	ветвистоусые ракообразные
3	Limnocalanus macrurus	веслоногие ракообразные
4	Eucyclop sseratulus	веслоногие ракообразные
5	Epischura lacustris	веслоногие ракообразные
6	Daphnia rosea	ветвистоусые ракообразные
7	Ceriodaphnia lacustris	ветвистоусые ракообразные
8	Diaphnosoma	ветвистоусые ракообразные
9	Holopedium gibberum	ветвистоусые ракообразные

Для программной валидации использовался контрольный видеоматериал, на котором система выполняла детекцию и трекинг объектов. Ключевым изменением инференс-кода стало присвоение уникального ID отслеживаемому объекту. Если один организм присутствовал в нескольких последовательных кадрах, он продолжал учитываться как единый объект, а не как серия новых детекций. Это принципиально важно для сканирующей системы, поскольку без трекинга итоговая численность зависит от частоты кадров и времени пребывания организма в поле зрения.

В материалах проекта отсутствуют сведения о размере итоговых train/validation/test-подвыборок, версии нейросетевой архитектуры, параметрах обучения, аппаратной конфигурации ПК и значениях precision, recall, F1 и mAP на независимой тестовой выборке. Поэтому в настоящей статье не вводятся искусственно рассчитанные показатели точности. В качестве результатов текущего этапа рассматриваются подтвержденные функциональные характеристики: расширение классов, работоспособность полного контура, ID-ориентированный подсчет, пороговая фильтрация и статистика контрольного запуска. Для публикационной версии после экспериментальной валидации рекомендуется дополнить методику формальным протоколом метрик, представленным в таблице 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модернизация комплекса привела к переходу от одиночной классификации кадров к обработке видеопоследовательности с учетом идентичности объектов. Результат работы инференс-модуля представлен на рисунке 4: на кадрах отображаются рамки детекции, идентификаторы и значения уверенности, а в итоговом отчете — количество уникальных объектов по классам. На приведенном контрольном запуске сформирована статистика по 54 уникальным объектам.

Распределение распознанных объектов контрольного запуска приведено в таблице 3. Наибольшая доля

Таблица 2. Рекомендуемый протокол количественной валидации перед серийным применением
Table 2. Recommended protocol for quantitative validation before serial application

Показатель	Назначение	Рекомендуемый способ оценки
Precision	доля корректных детекций среди всех срабатываний	по каждому классу и macro-average
Recall	доля найденных объектов среди размеченных	по каждому классу и macro-average
mAP@0.5 / mAP@0.5:0.95	интегральное качество объектной детекции	на независимой тестовой выборке
IDF1 / число ID-switch	качество трекинга и устойчивость уникального учета	на видеопоследовательностях с ручной разметкой траекторий
Ошибка подсчета, %	практическое соответствие ручному анализу	|Nавт–Nруч|/Nруч×100%
Время инференса	оценка производительности	мс/кадр и кадров/с на фиксированном ПК

Таблица 3. Итог контрольного запуска системы распознавания
Table 3. Results of the test run of the recognition system

Класс	Уникальные объекты, шт.	Доля, %	Примечание
Ceriodaphnia	10	18,5	учтено по уникальным ID
Bosmina longirostris	12	22,2	учтено по уникальным ID
Diaphnosoma	3	5,6	учтено по уникальным ID
Senecella	23	42,6	учтено по уникальным ID
Epischura	1	1,9	учтено по уникальным ID
Eucyclop	5	9,3	учтено по уникальным ID
Итого	54	100,0	контрольный видеоматериал

пришлась на класс Senecella — 23 объекта (42,6%), далее следовали Bosmina longirostris — 12 (22,2%) и Ceriodaphnia — 10 (18,5%). Для Diaphnosoma обнаружено 3 объекта, для Epischura — 1, для Eucyclop — 5. Сумма классов соответствует общему числу 54, что подтверждает согласованность итогового отчета. Эти значения следует интерпретировать как демонстрацию работы программного контура, а не как характеристику реальной структуры конкретного водоема, поскольку в исходных материалах не приведены условия отбора пробы, объем анализируемой воды и репрезентативность контрольного видеоматериала.

По экранному журналу инференса на демонстрационном материале время обработки отдельных кадров составляло примерно 98–103 мс, то есть порядок производительности находился около 10 кадров/с без учета возможных задержек ввода-вывода и позиционирования. Для лабораторного комплекса с управляемым сканированием такой уровень потенциально достаточен для квазиреального анализа, но его нельзя напрямую переносить на непрерывные высокопроизводительные системы. В работах по Edge AI показано, что при массовых потоках данных вычислительная пропускная способность становится самостоятельным ограничивающим фактором [12].

Порог доверия 0,15 выбран в проекте как фильтр слабых детекций. Низкий порог обычно увеличивает полноту обнаружения, но может повышать число ложноположительных срабатываний, поэтому его оптимальное значение должно определяться по precision — recall-кривой на независимой выборке. В текущих материалах такой анализ отсутствует. Следовательно, порог следует считать инженерной настройкой прототипа, а не статистически оптимизированным параметром. Аналогично высокая доля одного класса в контрольной последовательности не свидетельствует о смещении модели без сопоставления с истинной ручной разметкой.

Существенным результатом является реализация уникального учета объектов. При последовательном сканировании один организм может многократно попадать в поле зрения. Простое суммирование детекций систематически завышает численность, тогда как трекинг с ID позволяет связывать наблюдения между кадрами. Подобная логика соответствует современному направлению автоматизированного видеоориентированного мониторинга, где этапы detection — tracking — correction — statistics рассматриваются как единый рабочий процесс [1]. Для гидробиологического анализа это особенно важно, поскольку итоговые индексы зависят от корректной оценки численности и долей таксономических групп.

Расширение базы до девяти классов повышает содержательность анализа по сравнению с укрупненной классификацией, однако одновременно увеличивает риск

ошибок между морфологически сходными таксонами. Обзоры автоматического распознавания планктона указывают на высокую внутриклассовую вариативность и межклассовое сходство как на основные причины ошибок [8, 10]. Поэтому дальнейшее наращивание базы должно сопровождаться не только увеличением числа изображений, но и контролем баланса классов, разнообразия ориентаций, стадий развития, освещения и качества фона. В проекте обозначена целевая перспектива порядка 5 тыс. объектов; это направление обоснованно, но число изображений само по себе не гарантирует переносимость модели между водоемами.

Для экологического инжиниринга ценность комплекса определяется возможностью переводить микроскопические наблюдения в воспроизводимый цифровой поток данных. После метрической валидации система может быть дополнена автоматическим расчетом индекса Шеннона, сапробности и других показателей, если классы модели и методика пробоотбора соответствуют требованиям выбранного индекса. В материалах проекта расчет этих индексов заявлен как перспектива, поэтому в настоящей работе они не вычислялись. Правильная последовательность развития — сначала доказать точность детекции и счета, затем валидировать таксономическую пригодность и только после этого автоматизировать экологическую интерпретацию.

С точки зрения применимости к тематике «Экологический инжиниринг» разработанный ПТК представляет собой измерительно-информационный элемент системы контроля состояния водных объектов. Он может использоваться как инструмент раннего выявления изменений биотического компонента при воздействии сточных вод и иных антропогенных факторов, но для установления причинно-следственной связи необходимо совместное измерение физико-химических параметров, реплицированный пробоотбор и статистический дизайн наблюдений. Таким образом, нейросетевой модуль не заменяет комплексный экологический контроль, а повышает его оперативность и плотность наблюдений.

Основные ограничения исследования связаны с неполнотой экспериментального протокола в исходных материалах: не приведены точный объем размеченной базы, разделение на выборки, версия YOLO, гиперпараметры обучения, матрица ошибок, сравнение с ручным подсчетом и повторяемость результатов на независимых пробах. Эти ограничения принципиальны для журнальной публикации и должны быть устранены при подготовке окончательной редакции после проведения дополнительной серии экспериментов. При этом уже реализованная аппаратно-программная архитектура и ID-ориентированный учет формируют необходимую основу для такой валидации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена модернизация программно-технического комплекса автоматизированного распознавания зоопланктонных организмов, объединяющего камеру Богорова, цифровой USB-микроскоп, управляемые линейные актуаторы на базе ESP32/TMC2209 и нейросетевой модуль на персональном компьютере. Расширена предметная база до девяти таксонов, предусмотрены фильтрация некачественных изображений, разметка ограничивающими рамками и аугментация данных.

Ключевым программным результатом является переход к трекингу с присвоением уникальных ID, предотвращающему повторный учет организма в последовательных кадрах. При пороге доверия 0,15 контрольный запуск сформировал согласованную статистику по 54 уникальным объектам шести распознанных классов; по журналу обработки время инференса отдельных кадров составляло примерно 98–103 мс.

Полученные данные подтверждают функциональную работоспособность полного контура «позиционирование — изображение — детекция — трекинг — подсчет — отчет». Вместе с тем исходные материалы не содержат достаточной информации для доказательства заявляемого повышения точности детекции в метрическом смысле. Перед использованием ПТК в регулярном экологическом мониторинге необходимо провести независимую валидацию с расчетом precision, recall, F1, mAP, метрик трекинга и ошибки автоматического подсчета относительно ручной микроскопии.

Дальнейшее развитие целесообразно направить на увеличение и балансировку базы примерно до 5 тыс. размеченных объектов, формирование отдельных доменных наборов для разных водоемов, создание пользовательского интерфейса и последующий автоматический расчет экологических индексов после верификации таксономической и количественной точности. Такой подход позволяет рассматривать разработанный ПТК как перспективный компонент интеллектуальной системы экологического инжиниринга для оперативного гидробиологического контроля водных объектов.

Список литературы / References

1. Chen Z., Du M., Yang X.-D., Chen W., Li Y.-S., Qian C. and Yu H.-Q. (2023) 'Deep-learning-based automated tracking and counting of living plankton in natural aquatic environments', Environmental Science & Technology, 57 (46), pp. 18048–18057. DOI: 10.1021/acs. est. 3 c00253.
2. Giering S. L. C., Culverhouse P. F., Johns D. G., McQuatters-Gollop A. and Pitois S. G. (2022) 'Are plankton nets a thing

of the past? An assessment of in situ imaging of zooplankton for large-scale ecosystem assessment and policy decision-making', Frontiers in Marine Science, 9, art. 986206. DOI: 10.3389/fmars. 2022.986206.
3. Le K. T., Yuan Z., Syed A., Ratelle D., Orenstein E. C., Carter M. L., Strang S., Kenitz K. M., Morgado P., Franks P. J. S., Vasconcelos N. and Jaffe J. S. (2022) 'Benchmarking and automating the image recognition capability of an in situ plankton imaging system', Frontiers in Marine Science, 9, art. 869088. DOI: 10.3389/fmars. 2022.869088.
4. Conradt J., Börner G., López-Urrutia Á., Möllmann C. and Moyano M. (2022) 'Automated plankton classification with a dynamic optimization and adaptation cycle', Frontiers in Marine Science, 9, art. 868420. DOI: 10.3389/fmars. 2022.868420.
5. Orenstein E. C., Ayata S.-D., Maps F. et al. (2022) 'Machine learning techniques to characterize functional traits of plankton from image data', Limnology and Oceanography, 67 (8), pp. 1647–1669. DOI: 10.1002/lno. 12101.
6. Oldenburg E., Kronberg R. M., Niehoff B., Ebenhöh O. and Popa O. (2023) 'DeepLOKI — a deep learning based approach to identify zooplankton taxa on high-resolution images from the optical plankton recorder LOKI', Frontiers in Marine Science, 10, art. 1280510. DOI: 10.3389/fmars. 2023.1280510.
7. Yue J., Chen Z., Long Y., Cheng K., Bi H. and Cheng X. (2023) 'Toward efficient deep learning system for in-situ plankton image recognition', Frontiers in Marine Science, 10, art. 1186343. DOI: 10.3389/fmars. 2023.1186343.
8. Ciranni M., Murino V., Odone F. and Pastore V. P. (2024) 'Computer vision and deep learning meet plankton: Milestones and future directions', Image and Vision Computing, 143, art. 104934. DOI: 10.1016/j. imavis. 2024.104934.
9. Bachimanchi H., Pinder M. I. M., Robert C. et al. (2024) 'Deep-learning-powered data analysis in plankton ecology', Limnology and Oceanography Letters. DOI: 10.1002/lol2.10392.
10. Eerola T., Batrakhanov D., Vatankhah Barazandeh N. et al. (2024) 'Survey of automatic plankton image recognition: challenges, existing solutions and future perspectives', Artificial Intelligence Review, 57, art. 114. DOI: 10.1007/s10462-024-10745-y.
11. Zhang W., Bi H., Wang D., Cheng X., Cai Z. and Ying K. (2024) 'Automated zooplankton size measurement using deep learning: Overcoming the limitations of traditional methods', Frontiers in Marine Science, 11, art. 1341191. DOI: 10.3389/fmars. 2024.1341191.
12. Pitois S. G., Blackwell R., Close H., Eftekhari N., Giering S. L. C., Masoudi M., Payne E., Ribeiro J. and Scott J. D. (2025) 'RAPID: real-time automated plankton identification dashboard using Edge AI at sea', Frontiers in Marine Science, 11, art. 1513463. DOI: 10.3389/fmars. 2024.1513463.

Информация об авторах

Шишкин Илья Александрович, *кандидат технических наук, доцент, Институт фундаментальной подготовки и технологических инноваций (Институт ФПТИ), Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 190000, Россия, Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д. 67, лит. А; ORCID: 0000-0001-9220-1181; SPIN-код: 7628–5712; AuthorID (РИНЦ): 964677; e-mail: ilya@mail.ru.*

Кушнеров Александр Игоревич, *старший преподаватель кафедры прикладной математики и информатики, начальник экологического компьютерного центра, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 1281–6294, Author ID (РИНЦ): 674824, ORCID: 0000-0001-5891-5172; e-mail: kushnerov.a.i@yandex.ru.*

Барххуев Халид Османович, *инженер экологического компьютерного центра СПбГУПТД, заведующий лабораторией, ассистент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0000-0001-5415-7108; SPIN-код: 7626–1362; AuthorID (РИНЦ): 1141753; e-mail: axado111@gmail.com.*

Сашнина Ирина Александровна, *Государственное областное автономное учреждение «Новгородский Кванториум»; 173004, Россия, Великий Новгород, Большая Московская ул., д. 39, корп. 1; ORCID: 0009-0009-5397-1410; e-mail: sashninai@mail.ru.*

Information about the authors

Shishkin Ilya Aleksandrovich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Fundamental Training and Technological Innovations (Institute of FPTI), St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 67, lit. A Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg, 190000, Russia; ORCID: 0000-0001-9220-1181; SPIN code: 7628–5712; RSCI AuthorID: 964677; e-mail: _ilya@mail.ru.*

Kushnerov Alexander Igorevich, *Senior Lecturer at the Department of Applied Mathematics and Informatics, Head of the Ecological Computer Center, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh St., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN code: 1281–6294, Author ID: 674824, ORCID: 0000-0001-5891-5172; e-mail: kushnerov.a.i@yandex.ru.*

Barkhhuev Khalid Osmanovich, *Engineer of the Environmental Computer Center of SPbGUPTD, Head of the Laboratory, Assistant of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh St., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0000-0001-5415-7108; SPIN code: 7626–1362; RSCI AuthorID: 1141753; e-mail: axado111@gmail.com.*

Sashnina Irina Aleksandrovna, *State Regional Autonomous Institution "Novgorod Quantorium"; 39, bldg. 1 Bolshaya Moskovskaya St., Veliky Novgorod, 173004, Russia; ORCID: 0009-0009-5397-1410; e-mail: sashninai@mail.ru.*

ИНСТИТУТ «КРОНА» И ГОФРОИНДУСТРИЯ

К началу XXI века в России сложилось такое положение, что в системе высшего и среднего специального образования отсутствовали учебные заведения, занимавшиеся подготовкой специалистов для гофроиндустрии. Поэтому гофропредприятия искали выпускников родственных специальностей и самостоятельно доучивали их непосредственно на рабочих местах. Многие предприятия вынуждены были нанимать зарубежных специалистов за очень высокую заработную плату. Чтобы уменьшить остроту дефицита кадров, Институт «КРОНА» разработал в 2006–2010 годах несколько специализированных программ и начал регулярно проводить курсы повышения квалификации для специалистов, работавших на гофропредприятиях.

Учебные программы Института «КРОНА» охватывали весь цикл технологии производства гофроматериалов и различных видов конечной продукции из гофрокартона. Они пользовались и до сих пор пользуются активным спросом среди специалистов гофроиндустрии. И не только в России, но и в ближнем зарубежье: Казахстане, Белоруссии, Узбекистане, Туркмении.

Периодически Институт «КРОНА» проводил научно-практические конференции в области гофропроизводства, в которых участвовали иностранные и российские эксперты. К сожалению, в настоящее время эта традиция приостановлена. При этом потребность в курсах повышения квалификации остаётся на высоком уровне.

В Институте «КРОНА» за два десятилетия сформировался пул российских экспертов высокой квалификации, состоящий как из фрилансеров, так и работников российских компаний, специализирующихся в области оказания услуг гофропредприятиям.

Очередной семинар, который состоялся в Институте «КРОНА» в конце мая в 2026 года, был составлен из 2 блоков. Первый блок состоял из трёх разделов: пароконденсатные системы гофроагрегатов, клеевая кухня и дефекты гофроматериалов. А второй — из двух блоков:









Н. С. Пермяков *Юлия Юха* *Н. С. Нечаев*

дефекты упаковки из гофрокартона и контроль качества продукции из гофроматериалов. Первый блок был ориентирован на производителей, а второй — на покупателей упаковки из гофрокартона.

В качестве лекторов на семинар были приглашены лучшие в России эксперты-фрилансеры в своих областях, которые очень известны и востребованы в качестве консультантов в гофроиндустрии в России и в таких странах ближнего зарубежья, как Белоруссия, Казахстан, Узбекистан, которые были представлены значительным числом участников.

Особый интерес участниками семинара был проявлен к докладам опытнейшего специалиста в области клеевых технологий и дефектов Николая Сергеевича Пермякова он выступал с сообщениями на семинаре в течение полных трёх дней, при этом выполняя их в диалоге со слушателями, отвечая на конкретные уточняющие вопросы во время изложения материалов.

Каждый день по окончании программной части слушатели оставались в «Кроне» и в течении ещё нескольких часов задавали свои индивидуальные специфические вопросы, которые их беспокоят на собственных рабочих местах.

В аналогичном режиме проходили лекции лучшего специалиста России в области паро-конденсатных систем Николая Сергеевича Нечаева.

Основную часть программы второго блока, ориентированного на покупателей гофроупаковки, вела опытнейший специалист в области контроля качества продукции из гофроматериалов Юлия Юха, имеющая огромный опыт работы в этой сфере как в российских, так и в зарубежных компаниях мировых лидеров по производству лабораторных измерительных приборов.

Ещё одной очень важной особенностью этого семинара являлось то, что в нём приняли участие слушатели — представители 33 предприятий-производителей гофроматериалов и гофроупаковки. Им предоставлялась уникальная возможность за короткий период времени пообщаться и обменяться опытом с большим числом коллег с родственных предприятий.

КРОНА

198095, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Ивана Черных, д. 4.
ВШТЭ СПбГУПТД. Институт «КРОНА»
Тел.: 8 (812) 747 29 26,
786 53 09, +7 967 5113365,
e-mail: krona@gturp.spb.ru,
krona.spb1@gmail.com



Слушатели. Окончание семинара









СКБК
Сухонский картонно-бумажный комбинат

В 35 километрах к северу от Вологды и в 500 от Москвы, в городе Сокол, на реке Сухоне в 1917 году начал работать целлюлозный завод фабриканта Н. В. Печаткина. Впоследствии он вырос в крупнейшее целлюлозно-бумажное производство России — Сухонский картонно-бумажный комбинат (СКБК).

Сухонский картонно-бумажный комбинат — это предприятие с богатой историей и безупречной репутацией в бумажной индустрии. Входя в состав Компании «Объединенные бумажные фабрики», комбинат гармонично соединяет вековые традиции производства с передовыми технологиями.

СКБК входит в топ-4 производителей тарного картона в РФ и занимает первое место в рейтинге отечественных производителей тарного картона из макулатурного сырья. Основными потребителями продукции являются компании, занимающиеся изготовлением гофроупаковки, представители пищевой промышленности, мебельные фабрики и строительные организации.

ООО «Сухонский картонно-бумажный комбинат производит тарный картон, твердые древесноволокнистые плиты, а также гофропродукцию.

Структура производства:

- бумажное производство, состоящее из 3-х бумагоделательных машин (БДМ) суммарной мощностью 348,1 тыс. тонн/год, выпускающего тароупаковочные виды бумаги и картона из макулатурного сырья;
- производство древесноволокнистых плит, мощностью 33,7 млн кв. м/год (2 цеха/3 линии);
- производство гофрированного картона и картонной тары, мощностью 68,4 млн кв. м/год;
- теплоэлектростанции, с предельной паропроизводительностью 284 т/ч и максимальной генерирующей мощностью 42,9 МВт, в том числе 30 МВт (паровые турбины), 12,9 МВт (ГПУ).

Благодаря вертикальной интеграции — от собственного сырья до готового картона — СКБК гарантирует высокое качество продукции, что закономерно укрепляет лидерские позиции в российской целлюлозно-бумажной промышленности.

ООО «СУХОНСКИЙ КАРТОННО-БУМАЖНЫЙ КОМБИНАТ» (СКБК)

БЛАГОДАРНОСТЬ ИНСТИТУТУ «КРОНА» ЗА МНОГОЛЕТНЕЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

ООО «Сухонский картонно-бумажный комбинат» выражает признательность Институту «Крона» за плодотворное сотрудничество, продолжающееся уже более четверти века. За эти годы институт стал для нас не просто образовательным учреждением, а стратегическим партнером, чья экспертиза и системный подход вносят весомый вклад в профессиональное развитие нашего коллектива.

Особую ценность представляет профильная направленность программ института, полностью соответствующая специфике целлюлозно-бумажной отрасли. Сотрудники комбината — от руководителей до ведущих специалистов рабочих профессий — ежегодно проходят обучение по широкому спектру дисциплин: технология производства бумаги и гофротары, энергетика, механика, автоматизация, управление персоналом. Практическая ориентированность курсов и высокий уровень преподавания неизменно отмечаются нашими работниками.

Приятно отметить, что институт регулярно привлекает специалистов Сухонского КБК в качестве спикеров по профильным тематикам. Это подчеркивает высокий уровень доверия к нашей экспертизе и взаимную заинтересованность в распространении лучших практик.

Выражаем благодарность коллективу «Кроны» за профессионализм и многолетнее надежное партнерство. Надеемся на дальнейшее сотрудничество и желаем Институту «Крона» новых достижений и устойчивого развития.

С глубоким уважением и благодарностью,
коллектив ООО «Сухонский
картонно-бумажный комбинат»

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Россия, Вологодская область, г. Сокол,
пл. Печаткина, д. 4., оф. 1, тел.: (81733) 3-26-87

E-mail: scbk@suhona.com

Сайт компании: www.ukobf. ru

Генеральный директор ООО «Сухонский КБК»
Блинушов Юрий Александрович









KNAUFPETROBOARD



ОДНО ИЗ КРУПНЕЙШИХ В РОССИИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ КОРОБОЧНОГО КАРТОНА ИЗ МАКУЛАТУРЫ

АО КНАУФ ПЕТРОБОРД

бывший Санкт-Петербургский картонно-полиграфический комбинат

Продукция комбината за годы работы заслужила внимание и высокую оценку на крупнейших российских выставках: «Золотая медаль» на выставке «Лабаз Сибири», почетные дипломы на выставках «РОСУПАК» в Москве, «Тара и упаковка», «ПАЛП ФОР», «Современная упаковка».

Ленинградская картонная фабрика (как она раньше называлась) начала строиться в 1976 году, но датой основания считают 31 января 1982 г., когда был получен первый двухслойный картон.

Вырабатываемый на комбинате мелованный и немелованный картон марок «Ладога» и «Нева» используется для изготовления потребительской тары для упаковки пищевых продуктов, моющих средств, обуви, парфюмерно-косметических изделий, медицинских препаратов, детских игрушек, галантерейных и хозяйственных изделий. Практически каждый житель страны хотя бы раз покупал товары в коробках, изготовленных из нашего картона. Также производимый картон используется для гипсовых строительных плит (ГСП) как для предприятий группы КНАУФ, так и других производителей.

АО КНАУФ ПЕТРОБОРД — градообразующее предприятие (г. Коммунар) со своей ТЭЦ, которая дает тепло всему городу. В состав комбината входят:

- картонное производство со складом макулатуры и целлюлозы;
- теплоэлектроцентраль;
- цех водоснабжения и биологической очистки промышленных стоков.

В качестве сырья комбинат в основном использует макулатуру, объем перерабатываемой макулатуры составляет более 260 тыс. тонн в год.

Сегодня на заводе трудятся 700 человек. Эффективно действуют системы менеджмента качества ISO 9001 и экологического менеджмента ISO 14001. Огромное внимание уделяется политике стабильного качества продукции и предотвращению возможных загрязнений окружающей среды.

Обзорная статья
УДК 662.818, 2.4.6.
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_85–92

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА БИОРАЗЛАГАЕМОЙ УПАКОВКИ В ФОРМИРОВАНИИ СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Владимир Александрович Рыжиков, Павел Владимирович Луканин, Олеся Вячеславовна Федорова, Эдуард Львович Аким

Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Рыжиков В. А., Луканин П. В., Федорова О. В., Аким Э. Л., 2026

Автор-корреспондент: В. А. Рыжиков, e-mail: ryzhikov_vladimir@bk. ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается возможность использования образовавшихся в производственном процессе отходов биоразлагаемой упаковки в качестве компонентов биотопливных брикетов, состоящих из отходов лесопромышленного комплекса и отходов производства ламинированной бумаги с биоразлагаемым полимерным слоем. Актуальность вопроса термической утилизации отходов упаковочного производства заключается в росте производства биоразлагаемой упаковки, призванной решить проблему пластикового загрязнения. Одновременно с этим производство биоразлагаемой упаковки порождает новый класс отходов на стадиях изготовления и брака. Утилизация этих полимерных композитов (на основе полимолочной кислоты (PLA), полибутиленсукцината (PBS), крахмалов) стандартными методами часто экономически неэффективна. Перспективным направлением является их энергетическая переработка совместно с биомассой. Целью исследования является систематизация и анализ известных данных о применении отходов производства биоразлагаемых полимеров в качестве компонента (связующего, наполнителя или энергетической добавки) топливных брикетов, а также выявление технологических ограничений и перспективных областей для дальнейших исследований. Проанализированы рецензируемые научные публикации за последние 5 лет из баз Scopus, Web of Science и РИНЦ по ключевым запросам: «biodegradable packaging waste», «fuel briquettes», «polylactic acid waste», «solid biofuel binders». Методология обзора включает сравнительный анализ физико-механических свойств брикетов с разным содержанием отходов, их теплотворной способности, эмиссии загрязняющих веществ и экономической эффективности. Использование отходов биоразлагаемой упаковки в составе топливных брикетов является технологически реализуемым и экономически оправданным способом их утилизации, однако требуется дальнейшее исследование долговременной стабильности таких брикетов (склонность к биодеградации при хранении), разработка методов контроля выбросов летучих органических соединений и создание технических условий для данной продукции. Обозначены перспективные направления: совместное брикетирование с лигнинсодержащими отходами (лузга, кора) и использование каталитических добавок для снижения температуры спекания полимерной фракции.

Ключевые слова: синтетические полимеры, топливные брикеты, твердое биотопливо, отходы промышленных предприятий, теплотехнические параметры, экология, биоразлагаемая упаковка

Для цитирования: Рыжиков В. А., Луканин П. В., Федорова О. В., Аким Э. Л. Основные тенденции использования отходов производства биоразлагаемой упаковки в формировании сырья для получения тепловой энергии // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 85–92. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_85–92.

KEY TRENDS IN UTILIZING OF BIODEGRADABLE PACKAGING PRODUCTION WASTE AS A FEEDSTOCK FOR HEAT ENERGY

Vladimir Alexandrovich Ryzhikov, Pavel Vladimirovich Lukanin, Olesya Vyacheslavovna Fedorova, Eduard Lvovich Akim

Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: V.A. Ryzhikov, e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru

ABSTRACT

The paper examines the feasibility of utilizing biodegradable packaging waste generated during production as components of biofuel briquettes made from forestry industry waste and waste from the manufacture of laminated paper with a biodegradable polymer layer. The importance of the issue of thermal disposal of packaging production waste is driven by the increasing output of biodegradable packaging, which is intended to address the issue of plastic pollution. At the same time, the production of biodegradable packaging generates a new class of waste at the stages of manufacturing and defects. The utilization of these polymer composites (based on PLA, PBS, starches) by standard methods (composting) is often economically inefficient. Their energy recovery in combination with biomass represents a promising direction. The purpose of this study is to systematize and analyze existing data on the application of biodegradable polymer production waste as a component (binder, filler, or energy additive) of fuel briquettes, and to identify technological constraints and promising avenues for further research. Peer-reviewed scientific publications from the past 5 years were analyzed using the Scopus, Web of Science, and RSCI databases with the following key queries: «biodegradable packaging waste», «fuel briquettes», «polylactic acid waste», «solid biofuel binders». The review methodology comprises a comparative analysis of the physical and mechanical properties of briquettes with varying waste content, along with their calorific value, pollutant emissions, and economic efficiency. Thus, it can be concluded that the use of biodegradable packaging waste in the composition of fuel briquettes is a technologically feasible and economically justified method of their utilization; however, further research is required into the long-term stability of such briquettes (susceptibility to biodegradation during storage), the development of methods for controlling volatile organic compound emissions, and the creation of technical specifications for this product. The following promising directions have been identified: co-briquetting with lignin-containing waste (husk, bark) and the use of catalytic additives to lower the sintering temperature of the polymer fraction.

Keywords: synthetic polymers, fuel briquettes, solid biofuel, industrial enterprise waste, thermal engineering parameters, ecology, biodegradable packaging

For citation: Ryzhykov V. A., Lukanin P. V., Fedorova O. V. and Akim E. L. (2026) 'Main trends in the use of biodegradable packaging production waste in the formation of raw materials for thermal energy generation', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 85–92. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_85–92.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая индустрия упаковки переживает фундаментальную трансформацию, вызванную ужесточением законодательства в области обращения с отходами и ростом экологического сознания потребителей. Объем рынка биоразлагаемой упаковки ежегодно увеличивается на 10–15 %, при этом наиболее распространенными материалами являются полимолочная кислота (PLA), полибутиленадипат-терефталат (PBAT), полибутиленсукцинат (PBS), а также крахмалосодержащие композиты [1, 2]. Однако за фасадом «зеленой» альтернативы скрывается серьезная проблема: на стадиях производства (обрезь, выход брака) и переработки таких материалов образуются значительные количества технологических отходов. По различным оценкам, доля некондиции на заводах по выпуску биоразлагаемой упаковки достигает 8–12 % от общего объема выпуска [3]. Наблюдается противоречие существующих методов утилизации. Традиционные подходы к обращению с отходами биоразлагаемых полимеров имеют существенные ограничения. Промышленное компостирование, хотя и считается предпочтительным методом, требует строгого соблюдения температурного и влажностного режимов (58–65°C, влажность 55–60 %) и длится от 12 до 20 недель, что делает его экономически невыгодным для небольших производств [4]. Пиролиз и газификация в чистом виде сталкиваются с проблемами низкой насыпной плотности отходов (часто <100 кг/м^3) и высокой энергоемкостью предварительного измельчения. С другой стороны, простое захоронение или сжигание без рекуперации энергии противоречат принципам циркулярной экономики.

В рамках стратегического проекта, предложенного ВШТЭ, под названием «Технология биоразлагаемых упаковочных материалов на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП)», который входит в программу «Приоритет-2030», был разработан подпроект с наименованием «Разработка технологии новых видов биотоплива с низким углеродным следом с целью улучшения экологической обстановки», в котором была предложена технология переработки и утилизации отходов производства биоразлагаемой упаковки в качестве компонента комбинированных биотопливных брикетов с целью обеспечения циркулярной биоэкономики и безотходного производства биоразлагаемой упаковки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обеспечения полноты и репрезентативности обзора был выполнен систематический поиск научных публикаций в следующих электронных базах данных:

- Scopus (Elsevier);
- Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics);
- PubMed (National Library of Medicine);
- Google Scholar;
- eLibrary (РИНЦ).

Поиск осуществлялся по публикациям за период 2020–2026 гг. включительно. Поиск проводился на русском и английском языках с использованием следующих ключевых слов и их комбинаций с применением булевых операторов (AND, OR, NOT):

На русском языке:

- отходы биоразлагаемой упаковки OR биоразлагаемые полимеры OR PLA OR полимолочная кислота;
- топливные брикеты OR пеллеты OR твердое биотопливо;
- связующее OR брикетирование OR горячее прессование;
- утилизация отходов OR циркулярная экономика.

На английском языке:

- biodegradable packaging waste OR PLA waste OR PBS waste OR starch-based polymers;
- fuel briquettes OR pellets OR solid biofuel;
- binder OR agglomeration OR hot pressing OR densification;
- waste valorization OR circular economy;
- combustion emissions OR thermal degradation.

Критерии включения публикаций в обзор:

1. Наличие экспериментальных данных о совместном брикетировании отходов биоразлагаемых полимеров и биомассы.
2. Наличие количественных характеристик (прочность, теплота сгорания, водопоглощение, эмиссия).
3. Статьи из рецензируемых журналов (Q1 — Q3 по Scopus/Web of Science), материалы конференций, диссертации.
4. Язык публикации: английский, русский.

Критерии исключения:

1. Работы, посвященные только компостированию или только пиролизу отходов упаковки (без брикетирования).
2. Патенты без экспериментального подтверждения.
3. Препринты, непроверенные данные, дублирующиеся публикации.
4. Исследования по брикетированию с использованием первичных (не отходных) биоразлагаемых полимеров.

В результате первичного поиска было обнаружено 187 публикаций. Для обработки отобранных материалов применялись следующие методы:

Контент-анализ

Публикации были классифицированы по следующим категориям:

- Тип отходов биоупаковки (PLA, PBS, PBAT, крахмалосодержащие смеси, многослойные композиты).
- Тип биомассы (опилки хвойных/лиственных пород, лузга подсолнечника, солома злаков, кора, торф).
- Диапазон добавки отходов (0–10 %; 11–20 %; 21–30 %; >30 %).
- Режим брикетирования (температура, давление, время выдержки).

Сравнительный анализ

Для каждого типа отходов и режима брикетирования были сопоставлены следующие выходные параметры:

- Механическая прочность на сжатие (МПа или Н/мм^2).
- Водопоглощение (% за 2–24 часа).
- Теплота сгорания (МДж/кг).
- Эмиссия CO, SO_2, NO_x, летучих органических соединений (мг/м^3 или г/ГДж).
- Зольность (%).

Графический и табличный синтез

Сводные данные представлены с помощью:

- сравнительных таблиц (типы отходов — достигнутые характеристики);

- гистограмм распределения оптимальных диапазонов добавок;
- диаграмм «причина-следствие» (рыбы Исикавы) для выявления факторов, влияющих на качество брикетов.

Для количественных показателей (прочность, теплота сгорания) из разных источников вычислялись средние арифметические значения, стандартные отклонения и доверительные интервалы (p=0,95). В случаях, когда авторы приводили регрессионные зависимости, выполнялась их верификация путем сравнения с данными из независимых исследований. Ниже представлены сравнительные таблицы 1–2 количественных показателей брикетов из различного сырья.

Таблица 1. Теплота сгорания брикетов из различных типов сырья [5, 6]

Table 1. Calorific value of briquettes produced from different types of raw materials [5, 6]

Тип брикетов (основной компонент)	Высшая теплота сгорания, МДж/кг
Брикеты из биоугля (биоразлагаемые отходы) + крахмальное связующее	21,9–23,0
Брикеты из биоугля+глиняное связующее	20,0–22,52
Брикеты из скорлупы арахиса + биоразлагаемый пластик	до 25,9
Брикеты из скорлупы арахиса + ПП (полипропилен)	25,9
Каменный уголь (Ботсвана)	17,7–23,3

Таблица 2. Механическая прочность брикетов с различными добавками [5–7]

Table 2. Mechanical strength of briquettes containing different additives [5–7]

Тип брикетов	Показатель прочности	Значение
Скорлупа арахиса + биоразлагаемый пластик	Прочность на сжатие	4,45 МПа
Скорлупа арахиса + биоразлагаемый пластик	Модуль упругости	20 МПа
Брикеты из биоугля (крахмальное связующее)	Прочность при падении	>99%
Брикеты из биоугля (глиняное связующее)	Прочность при падении	~95%
Композиты PLA/PBS	Предел прочности при растяжении	До 80 МПа

Исходя из представленных таблиц, можно сделать следующие **выводы**:

1.1. Анализ представленных данных показывает, что комбинированные брикеты с добавлением полимерных компонентов (как традиционных, так и биоразлагаемых) демонстрируют теплоту сгорания (21,9–25,9 МДж/кг), сопоставимую или превышающую показатели каменного угля (17,7–23,3 МДж/кг). Это свидетельствует о принципиальной возможности замещения ископаемого топлива в энергетических целях.

1.2. Брикеты с крахмальным связующим и добавлением полимеров показывают более высокие значения теплоты сгорания (21,9–25,9 МДж/кг) по сравнению с брикетами, где используется глиняное связующее (20,0–22,52 МДж/кг). Это объясняется тем, что глина является инертным балластом, не вносящим энергетического вклада, тогда как полимеры и крахмал сами являются горючими веществами.

1.3. Наибольшая теплота сгорания зафиксирована для брикетов с добавлением полипропилена (ПП) — 25,9 МДж/кг. Для биоразлагаемых пластиков значения несколько ниже (по оценкам, 18–22 МДж/кг для PLA), что связано с наличием кислорода в их структуре и, соответственно, меньшей долей углерода и водорода. Однако даже эти значения превышают показатели чистой древесной биомассы (15,9–20,3 МДж/кг), что делает биоразлагаемые полимеры эффективной энергетической добавкой.

1.4. Брикеты на основе биоугля (продукта пиролиза биоразлагаемых отходов) с органическим связующим показывают значения теплоты сгорания до 23,0 МДж/кг, что сопоставимо с верхней границей угольного диапазона. Это открывает дополнительные возможности для двухступенчатой переработки: сначала пиролиз отходов для получения биоугля, затем брикетирование с добавлением полимерных отходов в качестве связующего.

2.1. Добавление биоразлагаемого пластика в состав брикетов из скорлупы арахиса позволяет достичь прочности на сжатие 4,45 МПа, что является наибольшим значением среди исследованных составов. Это подтверждает гипотезу о том, что термопластичные полимеры при нагреве размягчаются, заполняют межчастичные поры и при охлаждении формируют прочную связующую матрицу.

2.2. Модуль упругости для тех же образцов составляет 20 МПа. Это значение указывает на достаточную жёсткость брикетов для предотвращения разрушения при транспортировке и хранении. Важно отметить, что при слишком высоком содержании полимера (>30%) может наблюдаться снижение прочности из-за агломерации полимера и неравномерного распределения в объёме брикета (этот аспект требует дополнительного изучения).

2.3. Брикеты с крахмальным связующим показывают прочность при падении >99%, тогда как при

использовании глины этот показатель снижается до ~95%. Это объясняется тем, что крахмал, как и полимеры, образует когезионные связи с частицами биомассы, тогда как глина создаёт лишь механическое сцепление, более чувствительное к ударным нагрузкам.

2.4. Несмотря на высокие значения прочности, в литературе отмечена проблема долговременной стабильности: при хранении в условиях повышенной влажности возможна частичная биодеградация связующего (для крахмала и биоразлагаемых полимеров), что может приводить к снижению прочности со временем. Данный аспект недостаточно изучен и требует дополнительных исследований.

Обобщение данных, представленных в таблицах 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, добавление отходов полимеров (включая биоразлагаемые) в состав топливных брикетов обеспечивает повышение теплоты сгорания до уровня, сопоставимого с каменным углём (21,9–25,9 МДж/кг против 17,7–23,3 МДж/кг), и одновременное увеличение прочности на сжатие до 4,45 МПа. Во-вторых, биоразлагаемые полимеры (PLA, PBS) хотя и уступают традиционным пластикам по абсолютной теплоте сгорания, обладают критически важным преимуществом — отсутствием хлора и токсичных добавок, что минимизирует риск образования диоксинов и фуранов при сжигании. В-третьих, оптимальным диапазоном содержания полимерных отходов является 10–30 мас.%, при котором достигается наилучший баланс между энергетической эффективностью, механической прочностью и экологической безопасностью. Полученные данные подтверждают перспективность дальнейших исследований в направлении промышленного масштабирования технологии и разработки нормативной базы для сертификации комбинированных брикетов с биоразлагаемыми полимерами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате сбора и анализа полученной информации было выделено 15 публикаций, посвященных совместному брикетированию биомассы с отходами полимерных материалов (включая биоразлагаемые полимеры). Анализ показал, что интерес к данной тематике значительно возрос после 2018 года, что коррелирует с ужесточением законодательства в области обращения с пластиковыми отходами в ЕС и Китае.

Важно отметить, что лишь часть исследований (порядка 30%) фокусируется именно на биоразлагаемых полимерах (PLA, PBS, PBAT, термопластичный крахмал). Большинство работ рассматривают смеси биомассы с традиционными пластиками (ПЭ, ПП, ПЭТ, ПС) [8, 9]. Однако полученные результаты представляют ценность для понимания поведения биоразлагаемых полимеров в аналогичных процессах, особенно в отношении механизмов связывания и влияния на энергетические характеристики.

Одним из ключевых результатов обзора является подтверждение того, что полимерные отходы (как традиционные, так и биоразлагаемые) эффективно выполняют функцию связующего при горячем прессовании. Механизм заключается в размягчении или частичном оплавлении полимера при нагреве, после чего он заполняет межчастичные поры биомассы и при охлаждении формирует прочную матрицу.

Song и Hall в своем обзоре отмечают, что «отличные текучесть, прочность на разрыв и гидрофобность пластиков позволяют рассматривать их в качестве идеальных связующих для уплотнения биомассы и угля» [10]. Аналогичные выводы представлены в работе российских исследователей Рыжикова В. А. и соавторов, где при использовании 50% отходов ламинированной бумаги (содержащей полимерный слой) достигнута прочность брикетов на сжатие 4,5 Мпа [11–12].

В контексте биоразлагаемых полимеров следует учитывать их более низкие температуры размягчения по сравнению с традиционными пластиками. Например, полимолочная кислота (PLA) имеет температуру стеклования около 55–60°C и температуру плавления 150–170°C, что делает ее пригодной для брикетирования при умеренном нагреве. Это важное преимущество, так как позволяет избежать термической деструкции биомассы (обычно начинающейся выше 200–220°C) [13].

Однако в проанализированной литературе имеются и указания на потенциальные ограничения. Исследователи биоразлагаемых пленок (PLA, PLA/PBS) методом анаэробного сбраживания обнаружили, что эти материалы могут оказывать ингибирующее действие на микробную активность из-за своей устойчивости к разложению [13]. Хотя это исследование касается биогаза, а не брикетирования, оно указывает на важную особенность биоразлагаемых полимеров: их высокая устойчивость к деструкции в определенных условиях может быть как преимуществом (долговременная стабильность брикетов при хранении), так и недостатком (медленная деградация в случае попадания в окружающую среду). Song и Hall особо подчеркивают, что «сжигание смесей биомассы с пластиками, содержащими менее 10% пластика, не оказывает существенного негативного влияния на выбросы загрязнителей по сравнению с биомассой» [10]. Это важный ориентир для практического применения, хотя для биоразлагаемых полимеров эта граница может быть скорректирована в сторону увеличения ввиду их более

«чистого» химического состава (отсутствие хлора, тяжелых металлов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование отходов производства биоразлагаемой упаковки в качестве компонента комбинированных биотопливных брикетов представляет собой реализуемое, экономически перспективное и экологически ответственное решение проблемы утилизации технологических отходов «зелёной» упаковки. Данный подход органично вписывается в концепцию циркулярной экономики, превращая отходы одного производства в сырьё для другого.

При этом наиболее безопасным и эффективным с экологической точки зрения является использование бесхлорных биоразлагаемых полимеров (PLA, PBS, PBAT, термопластичный крахмал), так как их сжигание не сопровождается образованием диоксинов и фуранов — самых опасных загрязнителей, характерных для традиционных пластиков [14–15].

Несмотря на наличие значительных пробелов в современном знании (особенно в отношении реальной эмиссии и долговременной стабильности), совокупность имеющихся данных позволяет рекомендовать данную технологию для дальнейшего изучения и последующего внедрения. Приоритетными направлениями ближайших исследований должны стать долговременные натурные испытания, комплексный эмиссионный анализ и промышленное масштабирование.

Список литературы

1. Adeleke A. A., Nzerem P., Salihu A. et al. A Review on Biomass Briquettes as Alternative and Renewable Fuels // 2022 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS). 2022. Pp. 1–7.
2. Adekunle A. A., Nzerem P., Salihu A. et al. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters // International Journal of Renewable Energy Research. 2021. Vol. 11, No. 4. Pp. 1789–1802.
3. Montegiove N., Petrucci R., Bacci L. et al. Evaluation of Biogas Production from Anaerobic Digestion of Biopolymeric Films and Potential Environmental Implications // Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 22. Article 10146. DOI: 10.3390/su162210146.
4. Nomadolo N., Mtibe A., Ofosu O. et al. The Effect of Mechanical Recycling on the Thermal, Mechanical, and Chemical Properties of Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly (Butylene Succinate) (PBS), Poly (Lactic Acid) (PLA), PBAT-PBS Blend and PBAT-TPS Biocomposite // Journal of Polymers and the Environment. 2024. DOI: 10.1007/s10924-023-03151-y.
5. Parida B. P. et al. (2026). Development of Bio-Briquettes From Biochar Derived From Pyrolysis of Biodegradable Waste for Sustainable Fuel Applications. International Journal of Energy Research, v. 2026, p. 1. DOI:10.1155/er/5537858.
6. International Journal of Engineering (2025). Effect of Adding LDPE, PP and Biodegradable Plastic Waste on Physical Properties, Calorific Value and Proximate Analysis of Peanut Shell Waste Briquettes. IJE, Volume 38, Issue 1, pp. 54–64.
7. KCI Journal Article. Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application.
8. Polymers Editorial Office. Thermal Properties of PLA/PBAT/PBS/nano talc Composites (Table 3) // Polymers. 2021. Vol. 13, No. 5. DOI: 10.3390/polym13050740.
9. Hedman B., Burvall J., Nilsson C., Marklund S. PCDD/F in source-sorted waste fractions and emissions from their co-combustion with reed canary-grass // Waste Management. 2007. Vol. 27, No. 11. Pp. 1580–1592.
10. Song B., Hall P. Densification of Biomass and Waste Plastic Blends as a Solid Fuel: Hazards, Advantages, and Perspectives // Frontiers in Energy Research. 2020. Vol. 8. Article 58. DOI: 10.3389/fenrg. 2020.00058.
11. Рыжиков В. А., Ерохина О. А., Аким Э. Л., Луканин П. В. Исследование физико-химических характеристик комбинированных топливных брикетов из твёрдых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023.
12. Рыжиков В. А. Повышение эффективности использования биотоплива — топливных брикетов, включающих отходы бумаги с полимерным покрытием: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. 2025. 120 с.
13. Friedl A., Padouvas E., Rotter H., Varmuza K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition // Analytica Chimica Acta. 2005. Vol. 544, No. 1–2. P. 191–198.
14. Frankenhaeuser M., Manninen H., Kojo I., Ruuskanen J. Emissions from co-combustion of used packaging with peat and coal // Chemosphere. 1994. Vol. 29, No. 9–11. P. 2277–2289.
15. Tomsej T., Horák J., Tomsejová S. et al. The impact of co-combustion of polyethylene plastics and wood on particulate matter emissions // Fuel Processing Technology. 2018. Vol. 172. Pp. 71–80.

References

1. Adeleke A. A., Nzerem P., Salihu A. et al. (2022) ‘A review on biomass briquettes as alternative and renewable fuels’, in 2022 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS), pp. 1–7.
2. Adekunle A. A., Nzerem P., Salihu A. et al. (2021) ‘A review of biomass briquette binders and quality parameters’, International Journal of Renewable Energy Research, 11 (4), pp. 1789–1802.

3. Montegiove N., Petrucci R., Bacci L. et al. (2024) 'Evaluation of biogas production from anaerobic digestion of biopolymeric films and potential environmental implications', Sustainability, 16 (22), Article 10146. DOI: 10.3390/su162210146.
4. Nomadolo N., Mtibe A., Ofosu O. et al. (2024) 'The effect of mechanical recycling on the thermal, mechanical, and chemical properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly (butylene succinate) (PBS), poly (lactic acid) (PLA), PBAT-PBS blend and PBAT-TPS biocomposite', Journal of Polymers and the Environment. DOI: 10.1007/s10924-023-03151-y.
5. Parida B. P., et al. (2026) 'Development of bio-briquettes from biochar derived from pyrolysis of biodegradable waste for sustainable fuel applications', International Journal of Energy Research, 2026, p. 1. DOI: 10.1155/er/5537858.
6. International Journal of Engineering (2025) 'Effect of adding LDPE, PP and biodegradable plastic waste on physical properties, calorific value and proximate analysis of peanut shell waste briquettes', IJE, 38 (1), pp. 54–64.
7. KCI Journal Article (n. d.) 'Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application'.
8. Polymers Editorial Office (2021) 'Thermal properties of PLA/PBAT/PBS/nano talc composites (Table 3) ', Polymers, 13 (5). DOI: 10.3390/polym13050740.
9. Hedman B., Burvall J., Nilsson C. and Marklund S. (2007) 'PCDD/F in source-sorted waste fractions and emissions from their co-combustion with reed canary-grass', Waste Management, 27 (11), pp. 1580–1592.
10. Song B. and Hall P. (2020) 'Densification of biomass and waste plastic blends as a solid fuel: hazards, advantages, and perspectives', Frontiers in Energy Research, 8, Article 58. DOI: 10.3389/fenrg. 2020.00058.
11. Ryzhikov V. A., Erokhina O. A., Akim E. L. and Lukanin P. V. (2023) 'Study of the physicochemical characteristics of composite fuel briquettes made from solid wood waste and laminated paper production waste', Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Issues.
12. Ryzhikov V. A. (2025) Improving the efficiency of biofuel use — fuel briquettes containing polymer-coated paper waste. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 120 p.
13. Friedl A., Padouvas E., Rotter H. and Varmuza K. (2005) 'Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition', Analytica Chimica Acta, 544 (1–2), pp. 191–198.
14. Frankenhaeuser M., Manninen H., Kojo I. and Ruuskanen J. (1994) 'Emissions from co-combustion of used packaging with peat and coal', Chemosphere, 29 (9–11), pp. 2277–2289.
15. Tomsej T., Horák J., Tomsejová S. et al. (2018) 'The impact of co-combustion of polyethylene plastics and wood on particulate matter emissions', Fuel Processing Technology, 172, pp. 71–80.

Информация об авторах

Рыжиков Владимир Александрович, *кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 8410–7763; e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru.*

Луканин Павел Владимирович, *доктор технических наук, профессор, первый проректор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 191186, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18; SCOPUS Author ID: 8540909300; ORCID: 000-0002-0779-2288; AuthorID (eLibrary) 370804; e-mail: mail@gturp.spb.ru.*

Федорова Олеся Вячеславовна, *кандидат технических наук, проректор по инновационной деятельности, доцент кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 9073–2739; eLibrary SPIN-код: 9073–2739; SCOPUS Author ID: 57190619665; ORCID: 0000-0002-3785-4371; e-mail: fedov@sutd.ru.*

Аким Эдуард Львович, *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозы и композиционных материалов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 4421–7622; SCOPUS Author ID: 6701739751; Researcher ID: B-4128-2018; ORCID: 0000-0002-0098-6565; e-mail: akim-ed@mail.ru.*

Information about the authors

Ryzhikov Vladimir Alexandrovich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Industrial Heat Power Engineering, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 8410–7763; e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru.*

Lukanin Pavel Vladimirovich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 18 Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg, 191186, Russia; SCOPUS Author ID: 8540909300; ORCID: 000-0002-0779-2288; AuthorID (eLibrary) 370804; e-mail: mail@gturp.spb.ru.*

Fedorova Olesya Vyacheslavovna, *Candidate of Technical Sciences, Vice-Rector for Innovation Activities, Associate Professor at the Department of Technology of Cellulose and Composite Materials, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 9073–2739; SCOPUS Author ID: 57190619665; ORCID: 0000-0002-3785-4371; e-mail: fedov@sutd.ru.*

Akim Eduard Lvovich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Cellulose and Composite Materials, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 4421–7622; SCOPUS Author ID: 6701739751; Researcher ID: B-4128-2018; ORCID: 0000-0002-0098-6565; e-mail: akim-ed@mail.ru.*

Теоретическое исследование начинающих ученых
УДК 628.3
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_93–98

МИКРОТУРБИННАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ ПАДАЮЩЕЙ СТОЧНОЙ ВОДЫ В ПЕРЕПАДНЫХ КОЛОДЦАХ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИКИ СЕТИ

Виктория Александровна Фомина, Владислав Витальевич Куделко, Наталья Всеволодовна Пантелей

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

© Фомина В. А., Куделко В. В., Пантелей Н. В., 2026

Автор-корреспондент: В. А. Фомина, e-mail: fominaa.victoriaa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена проблеме утилизации гидравлической энергии сточных вод в самотечных канализационных сетях Республики Беларусь. Отмечается, что значительная часть энергии, затраченной насосными станциями на подъём сточных вод, необратимо рассеивается в перепадных колодцах, количество которых только в Минске превышает 1200 единиц. Традиционные решения — микротурбины в напорных водоводах, малые ГЭС на выпусках очистных сооружений и органический цикл Ренкина — ограничены высокой концентрацией взвешенных веществ, абразивным действием песка, малыми перепадами высот и нормативными запретами на изменение гидравлического режима самотечных коллекторов.

Автором предложена конструктивная схема байпасной микротурбины с ковшовым рабочим колесом и магнитной левитацией, размещаемой на стенке перепадного колодца вне потока. Передача вращения осуществляется через герметичную магнитную муфту, что исключает контакт генератора с агрессивной средой. Приведены расчёты электрической мощности для характерных расходов и высот перепада: при $Q = 800$ м^3/ч и $H = 4{,}5$ м мощность составляет 6,37 кВт, суточная выработка — 168 кВт·ч. Экономия оценивается в 14 400 руб./год, срок окупаемости — около 1,5 года. Рассмотрены риски обледенения и коррозии, предложены способы их снижения. Сделан вывод о перспективности байпасных микротурбин для существующих перепадных колодцев без изменения гидравлики сети.

Ключевые слова: микротурбина, сточные воды, перепадный колодец, энергоэффективность, магнитная левитация, ковшовое колесо

Для цитирования: Фомина В. А., Куделко В. В., Пантелей Н. В. Микротурбинная утилизация энергии падающей сточной воды в перепадных колодцах без изменения гидравлики сети // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 93–98. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_93–98.

MICROTURBINE-BASED ENERGY RECOVERY FROM FALLING WASTEWATER IN DROP WELLS WITHOUT ALTERING NETWORK HYDRAULICS

Victoria Aleksandrovna Fomina, Vladislav Vitalyevich Kudelko, Natalya Vsevolodovna Panteley

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: V. A. Fomina, e-mail: fominaa.victoriaa@gmail.com

ABSTRACT

The paper addresses the problem of recovering hydraulic energy from wastewater in gravity-flow sewer systems of the Republic of Belarus. It is noted that a significant part of the energy spent by pumping stations on lifting wastewater is irreversibly dissipated in drop wells, the number of which exceeds 1200 units in Minsk alone. Traditional approaches, such as microturbines in pressurized conduits, small hydropower units at treatment plant outlets, and the organic Rankine cycle, are limited by several factors: high concentrations of suspended matter, abrasive sand action, small elevation drops, and regulatory restrictions on modifying the hydraulic conditions of gravity collectors.

The author proposes a design of a bypass microturbine with a Pelton-type runner and magnetic levitation, installed on the wall of a drop well outside the flow. Power transmission is accomplished through a hermetic magnetic coupling, thereby preventing contact of the generator with the corrosive environment. The paper presents calculations of electrical power for typical flow rates and heads: at $Q = 800$ m³/h and $H = 4.5$ m, the power output is 6.37 kW, with a daily generation of 168 kWh. The savings are estimated at 14,400 rubles per year, with a payback period of about 1.5 years. The risks of icing and corrosion have been examined, and approaches to their mitigation have been proposed. A conclusion has been formulated concerning the promise of bypass microturbines for existing drop wells without alteration of the network hydraulics.

Keywords: microturbine, wastewater, drop well, energy efficiency, magnetic levitation, bucketwheel

For citation: Fomina V. A., Kudelko V. V., Panteley N. V. (2026) 'Microturbine utilization of the energy of falling wastewater in drop manholes without changing the hydraulics of the network', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 93–98. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_93–98.

ВВЕДЕНИЕ

Задача энергосбережения в системах коммунального хозяйства Республики Беларусь традиционно сводится к снижению потерь при транспортировке воды и тепла, модернизации насосного оборудования и внедрению частотного регулирования [1, с. 4]. Гораздо реже обсуждается возможность не просто уменьшать потребление, но и генерировать электроэнергию непосредственно на существующих объектах водопроводно-канализационного хозяйства. В системах водоотведения населенных пунктов Республики Беларусь значительная часть гидравлической энергии, затраченной насосными станциями на подъём сточных вод, необратимо рассеивается в самотечных коллекторах. На участках с перепадом рельефа устраиваются перепадные колодцы, в которых кинетическая энергия падающей воды гасится о водобойную плиту или специальные элементы, превращаясь в тепло. Согласно опубликованным данным, только в Минске насчитывается более 1200 таких сооружений с высотой сброса от 1,5 до 8 метров, построенных в 1970–1980-х годах без учёта требований энергосбережения.

Традиционные способы утилизации энергии потока (микротурбины в напорных водоводах, малые ГЭС на выпусках очистных установок) неприменимы к самотечным канализационным сетям. Причинами являются высокая концентрация взвешенных веществ, наличие мусора (тряпки, нитки), абразивное действие песка. Установка турбины непосредственно в трубу приводит к её быстрому забиванию и выходу из строя. Кроме того, любое изменение гидравлического режима самотечного коллектора требует пересмотра проекта. Прежде чем предлагать новые варианты, имеет смысл кратко рассмотреть альтернативные способы утилизации гидравлической энергии сточных вод. Первый вариант — это установка микротурбины в напорный трубопровод перед очистными сооружениями. Такие решения пользуются спросом в США (Lucid Energy), Нидерландах. Однако напорный режим есть далеко не на всех объектах, и сточная вода в напорных коллекторах не менее агрессивна, чем в самотечных. Проблема засорения и износа остаётся. Вторым вариантом является использование энергии сбросного канала после очистных сооружений. Вода на этом этапе значительно чище, что снижает риск засорения. Но возникает новая трудность: перепад высот на выпуске невелик (0,5–2 м), поэтому энергетический потенциал невысок. Третьим вариантом предлагается органический цикл Ренкина для утилизации низкопотенциального тепла сточных вод. Технология рабочая, но сложна, дорога и имеет низкий КПД при малых мощностях.

В данной работе рассмотрим технологию отбора энергии не из потока внутри трубы, а из свободно падающей струи в перепадном колодце с использованием байпасной микротурбины, монтируемой на стенке колодца и не контактирующей с агрессивной средой.

Таблица 1. Сравнение альтернативных способов утилизации гидравлической энергии сточных вод
Table 1. Comparison of alternative methods for utilizing the hydraulic energy of wastewater

Критерий	Микротурбина в напорном водоводе	Микротурбина после очистных сооружений	Органический цикл Ренкина	Байпасная микротурбина
Необходимая инфраструктура	Напорный коллектор (есть не везде)	Выпускной канал (требует строительства)	Любой источник тепла (сложное оборудование)	Существующий перепадный колодец
Изменение гидравлики сети	Да (врезка в трубу)	Нет (открытый канал)	Нет	Нет (установка на стенке)
Риск засорения сточными водами	Высокий (волокна, песок)	Низкий (вода очищена)	Не применим	Низкий (открытое ковшовое колесо)
Необходимость установки водоотведения	Да	Да (строительные работы)	Нет	Нет
Эксплуатационная сложность	Средняя	Низкая	Высокая	Низкая

Сравнить альтернативные способы утилизации гидравлической энергии можем по основным критериям (таблица 1).

Как следует из таблицы, предлагаемая байпасная микротурбина не требует остановки водоотведения, имеет низкий риск засорения и может быть установлена на существующих перепадных колодцах.

Рассмотрим выгоду с экономической точки зрения. Средний расход сточных вод через типовой перепадный колодец в дневное время составляет 300–1000 м³/ч, ночью снижается до 50–150 м³/ч. Теоретическую мощность потока определим зависимостью [2, с. 112]:

$$P_{пот} = \rho g Q H \,, \qquad (1)$$

где $\rho = 1000$ кг/м³ — плотность воды;
$g = 9{,}81$ м/с²;
Q — расход в м³/с;
H — высота перепада в метрах.

С учётом КПД турбины и генератора ($\eta \approx 0{,}65$) электрическая мощность составит:

$$P_э = \eta P_{пот} \,. \qquad (2)$$

В качестве примера рассмотрим перепадный колодец на коллекторе в районе ул. Толстого г. Минска. Для расчёта принимаем характерный для городских сетей расход 800 м³/ч (0,222 м³/с), перепад — 4,5 м [3, с. 98]. Найдём теоретическую и электрическую мощность потока:

$$P_{пот} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}222 \cdot 4{,}5 = 9800 \text{ Вт} \approx 9{,}8 \text{ кВт} \,.$$

$$P_э = 9{,}8 \cdot 0{,}65 = 6{,}37 \text{ кВт}.$$

В часы максимального водоотведения (утром и вечером) расход возрастает до 1400 м³/ч, что дает $P_э = 11{,}16$ кВт. В ночной период при расходе 100 м³/ч мощность падает до 0,9 кВт. При этом потери можно рассчитать по следующей формуле:

$$W_{потерь} = P_{пот} \cdot (1-\eta) \cdot 24 = \\ = 9{,}8 \cdot (1-0{,}65) \cdot 24 \approx 82 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \,. \qquad (3)$$

Получаем суточную потерю энергии около 82 кВт·ч. Генерация при этом осуществляется на очистных сооружениях, насосных станциях, трансформаторных подстанциях.

Для оценки влияния различных параметров на энергетический потенциал представлены результаты расчёта для нескольких характерных сочетаний высоты перепада и расхода, типичных для канализационных сетей городов (таблица 2).

Таблица 2. Зависимость энергетического потенциала от высоты перепада и расхода (расчётные параметры)
Table 2. Dependence of energy potential on head and flow rate (design parameters)

H, м	Q, м³/ч	$P_{пот}$, кВт	$P_э$, кВт	$E_{год}$, тыс. кВт·ч
3	500	4,1	2,7	12–15
4,5	800	9,8	6,4	28–35
6	1000	16,4	10,7	47–58

Как видно из таблицы, увеличение перепада с 3 до 6 м при росте расхода с 500 до 1000 м³/ч приводит к увеличению электрической мощности более чем в четыре раза. Это указывает на целесообразность оснащения микротурбинами наиболее высоких и полноводных перепадных колодцев.

Расчёты свидетельствуют об огромном потенциале. Казалось бы, достаточно установить в колодец серийную

микротурбину — и проблема решена. Однако существуют препятствия для использования стандартных пропеллерных или центробежных микротурбин в сточных водах. Отсутствие широкого внедрения данных технологий в практике водоотведения объясняется тем, что сточные воды содержат взвешенные вещества и волокнистые включения. Это приводит к быстрому забиванию и абразивному износу проточных частей гидротурбин. Также большинство микротурбин рассчитано на стабильный гидравлический режим. При резком снижении расхода возможно прекращение вращения или переход в насосный режим с обратным током воды, что требует сложных систем управления и обратных клапанов.

Важную роль в выборе конструктивного решения играют и нормативные ограничения. Согласно СН 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения» запрещено любое изменение гидравлического режима самотечных коллекторов без переутверждения проекта [4]. Установка турбины внутри трубы квалифицируется как такое изменение. Монтаж оборудования, не затрагивающий геометрию потока, формально не подпадает под запрет, однако до настоящего времени подобные решения отсутствовали.

Учитывая эти ограничения, перейдём к рассмотрению конструктивной схемы байпасной микротурбины с магнитной левитацией. Установка размещается снаружи перепадного колодца на его стенке. Внутри колодца на пути свободно падающей струи устанавливается ковшовое рабочее колесо (аналог турбины Пелтона), которое приводится во вращение за счёт кинетической энергии воды. Колесо не контактирует с дном и стенками, его ковши выполнены с закруглёнными кромками для предотвращения захвата волокон. Передача вращения от колеса, находящегося в агрессивной среде, к генератору, расположенному снаружи, осуществляется через магнитную муфту. На оси колеса закреплён постоянный магнит (самарий-кобальтовый сплав), снаружи стенки колодца — ответный магнит, связанный с валом генератора. Между ними имеется герметичная титановая или нержавеющая перегородка толщиной 2 мм. Механический контакт отсутствует, что исключает протечки. Чтобы снизить трение в опорах колеса, кольцевые магниты создают подъёмную силу, удерживающую ротор с зазором 1–2 мм. Подшипники (керамические ZrO_2) используются только для центрирования и несут минимальную нагрузку. Колесо изготавливается из износостойкого полиуретана или высокохромистого чугуна.

Согласно учебному пособию О. Ф. Никитина, для малых ковшовых турбин рекомендуется принимать КПД в диапазоне 0,7–0,75 [5, с. 300–320]. Принимая для расчёта КПД ковшового колеса 0,71, магнитной муфты 0,97 и генератора 0,94, общий электрический КПД установки может достигать 0,65. Интегрирование мощности по реальному суточному графику водоотведения дало суточную выработку 168 кВт·ч, что соответствует 5000 кВт·ч в месяц. При тарифе для промышленных потребителей Беларуси на 2026 год (0,24 руб./кВт·ч без НДС) экономия составляет 1200 руб./мес. или 14400 руб./год, что в переводе в российские рубли составит 32105 рублей в месяц, либо 385263 рублей в год.

Капитальные затраты на изготовление одного комплекта (ковшовое колесо, система магнитной левитации, герметичная муфта, генератор и контроллер) по предварительным оценкам составят 15000–20000 руб. без учёта НДС. Эксплуатационные расходы включают периодическую очистку ковшей (около 200 руб./год) и замену подшипников раз в три года (около 100 руб./год). Примем итоговую сумму 300 руб./год и рассчитаем срок окупаемости при экономии 14400 руб./год:

$$T_{ок} = \frac{20000}{14400 - 300} \approx 1{,}5 \text{ года}. \qquad (4)$$

Хотя срок окупаемости достаточно низок, существуют технологические риски. Например, коррозионная агрессивность. Сточные воды Беларуси имеют pH=6,5–8,5 и содержат сульфиды, хлориды. Ковши рекомендуется изготавливать из полированной стали 12Х18Н10Т с полировкой, ось — из оксида алюминия, а применяемые магниты, устойчивые к окислению, сохраняют свои свойства до 300 °C. Также в отличие от проточных турбин, ковшовое колесо не имеет узких каналов. Крупные предметы при попадании на ковши под действием центробежных сил отбрасываются в водобойный колодец, не вызывая заклинивания. Кратковременное попадание посторонних предметов может привести к снижению КПД на 10–15% с последующим самовосстановлением после их удаления потоком. Климат Республики Беларусь характеризуется умеренно континентальными условиями с продолжительной зимой. Средняя температура января варьируется от -4 °C на юго-западе и до -8 °C на северо-востоке, а абсолютные минимумы могут достигать -30 °C. Эти особенности требуется учитывать при проектировании любого оборудования, размещаемого на открытом воздухе или в неотапливаемом помещении, поскольку перепадные колодцы не имеют систем обогрева. Температура воздуха внутри них в зимний период чуть выше уличной за счёт тепла сточных вод (обычно +5-10 °C). Однако брызги воды, образующиеся при падении струи на ковшовое колесо, могут намерзать на лопатки, особенно в ночные часы, когда расход воды минимален, а мороз максимален. Это приводит к дисбалансу ротора, снижению КПД, а в дальнейшем и останове турбины.

Для решения проблемы обледенения возможно изготовить ковши из материала с низкой теплопроводностью и антиобледенительным покрытием (полиуретан с гидрофобными добавками). Ещё одним вариантом может быть включение в конструкцию электрического подогрева корпуса магнитов или ковшового колеса. Оценочная мощность подогрева составит 50–100 Вт, что незначительно снижает полезную выработку электроэнергии (на 0,5–1%). Питание подогревателя возможно от самого генератора турбины и не требует внешнего источника. Также уместным будет применение автоматики в виде установки датчика температуры и вибрации, который при нарастании льда подаст сигнал на кратковременное увеличение нагрузки генератора (режим «растопки»). При этом колесо начинает вращаться быстрее, центробежная сила сбрасывает лёд. Такой вариант применяют на турбинах, работающих на открытом воздухе.

Подведя итог, можно сказать, что даже один типовой колодец может обеспечить 40–60 тыс. кВт·ч в год. В масштабах страны 200–300 установок дадут выработку, сравнимую с небольшой солнечной электростанцией, но без зависимости от погоды и с более предсказуемым суточным графиком. Реальные значения КПД, надёжность магнитной муфты в агрессивной среде, поведение ковшового колеса при засорении и работа в зимних условиях могут быть установлены только экспериментально. Конструкция байпасной микротурбины с ковшовым колесом и магнитной передачей вращения позволяет обойти ограничения, делающие невозможным применение традиционных гидроагрегатов в сточной среде. Именно поэтому установка на стенке колодца, вне потока, и передача момента через герметичную магнитную муфту — перспективное на сегодняшний день решение.

Список литературы

1. Закон Республики Беларусь от 08.01.2015 № 239-З «Об энергосбережении» (в ред. Закона от 31.12.2025 № 128-З) // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 09.01.2026, 2/3056.
2. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учебник для вузов / Д. В. Штеренлихт. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: КолосС, 2008. 656 с.
3. Яковлев С. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов / С. В. Яковлев, Ю. М. Ласков. Москва: Стройиздат, 1987. 336 с.
4. СН 4.01.02–2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения». 01.01.2020. Минск: Минстройархитектуры, 2019. 81 с.
5. Никитин О. Ф. Гидравлика и гидропневмопривод: учебное пособие для вузов / О. Ф. Никитин. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 432 с.

References

1. Law of the Republic of Belarus (2015) On Energy Saving, No. 239-Z of 8 January 2015 (as amended by Law No. 128-Z of 31 December 2025). National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus, 9 January 2026, 2/3056.
2. Shterenlikht D. V. (2008) Hydraulics: A Textbook for Universities. 4th ed., revised and enlarged. Moscow: KolosS. (In Russian).
3. Yakovlev S. V. and Laskov Yu. M. (1987) Wastewater Disposal and Treatment: A Textbook for Universities. Moscow: Stroyizdat. (In Russian).
4. SN 4.01.02–2019 (2019) Sewerage. External Networks and Structures. Introduced 1 January 2020. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. (In Russian).
5. Nikitin O. F. (2012) Hydraulics and Hydropneumatic Drive: A Textbook for Universities. 2nd ed., corrected and enlarged. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House. (In Russian).

Информация об авторах

Фомина Виктория Александровна, *студентка Энергетического факультета, Белорусский национальный технический университет; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65/2; SPIN-код: 3349–5503; Author ID (РИНЦ): 1349016; ORCID: 0009-0006-1753-5134; e-mail: fominaa.victoriaa@gmail.com.*

Куделко Владислав Витальевич, *студент Энергетического факультета, Белорусский национальный технический университет; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65/2; SPIN-код: 6446–3448; Author ID (РИНЦ): 1348727; ORCID: 0009-0001-1342-3948; e-mail: vkudelko0@gmail.com.*

Пантелей Наталья Всеволодовна, *старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций, Энергетический факультет, Белорусский национальный технический университет; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65/2; SPIN-код: 1302–1575; Author ID (РИНЦ): 972801; ORCID: 0009-0004-8706-8741; e-mail: nvpaneley8@gmail.com.*

Information about the authors

Fomina Victoria Aleksandrovna, *student of the Faculty of Power Engineering, Belarusian National Technical University; 65/2 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Republic of Belarus; SPIN-code: 3349–5503; Author ID (RSCI): 1349016; ORCID: 0009-0006-1753-5134; e-mail: fominaa.victoriaa@gmail.com.*

Kudelko Vladislav Vitalyevich, *student of the Faculty of Power Engineering, Belarusian National Technical University; 65/2 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Republic of Belarus; SPIN-code: 6446–3448; Author ID (RSCI): 1348727; ORCID: 0009-0001-1342-3948; e-mail: vkudelko0@gmail.com.*

Panteley Natalya Vsevolodovna, *Senior Lecturer of the Department of Thermal Power Plants, Faculty of Power Engineering, Belarusian National Technical University; 65/2 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Republic of Belarus; SPIN-code: 1302–1575; Author ID (RSCI): 972801; ORCID: 0009-0004-8706-8741; e-mail: nvpaneley8@gmail.com.*

Обзорная статья
УДК 620.93:662.769.21
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_99–104

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Саида Эриковна Гатиятова, Александр Сергеевич Черкасов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

© Гатиятова С. Э., Черкасов А. С., 2026

Автор-корреспондент: С. Э. Гатиятова, e-mail: saida17122004@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В представленной статье проведено комплексное научное исследование перспектив внедрения водородных технологий в современные энергетические системы и генерирующие установки. Проанализированы ключевые физико-химические методы производства водорода, включая традиционную паровую конверсию углеводородов, электролиз воды на базе возобновляемых источников энергии и инновационные термохимические циклы атомно-водородной энергетики. Детально рассмотрены технико-экономические характеристики способов аккумулирования и транспортировки водородного топлива, такие как высоконапорное компримирование, криогенное сжижение, использование твердотельных металлогидридов и жидких органических носителей. Особое внимание уделено интеграции водорода в когенерационные и тригенерационные энергетические установки на базе топливных элементов различных типов, где оценена эффективность концепции «Power-to-Gas-to-Power» в парадигме балансировки стохастической генерации. Выявлены фундаментальные материаловедческие, инфраструктурные и нормативно-правовые барьеры, лимитирующие полномасштабную коммерциализацию отрасли. Обобщен передовой международный и отечественный опыт реализации водородных стратегий, подтверждающий необходимость системной государственной поддержки для достижения целевых показателей стоимости. Сделан обоснованный вывод о необратимости водородного энергоперехода как важнейшего инструмента достижения глобальной глубокой декарбонизации.

Ключевые слова: водородная энергетика, топливные элементы, электролиз воды, хранение водорода, энергетические установки, декарбонизация, энергопереход

Для цитирования: Гатиятова С. Э., Черкасов А. С. Перспективы использования водородных технологий в энергетических установках // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 99–104. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_99–104.

HYDROGEN TECHNOLOGIES IN POWER PLANTS: PROSPECTS AND APPLICATIONS

Saida Erikovna Gatiyatova, Alexander Sergeyevich Cherkasov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Corresponding author: S. E. Gatiyatova, e-mail: saida17122004@mail.ru

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive scientific study of the prospects for deploying hydrogen technologies in modern energy systems and generating facilities. The key physicochemical methods of hydrogen production were analyzed, including traditional steam reforming of hydrocarbons, water electrolysis powered by renewable energy sources, and innovative thermochemical cycles of nuclear-hydrogen power engineering. The study provides a detailed review of the technical and economic characteristics of hydrogen fuel storage and transportation methods, such as high-pressure compression, cryogenic liquefaction, solid-state metal hydrides, and liquid organic carriers. Special attention is given to integrating hydrogen into cogeneration and trigeneration energy systems based on various types of fuel cells, assessing the effectiveness of the "Power-to-Gas-to-Power" concept within the paradigm of balancing stochastic generation. The study identifies fundamental materials science, infrastructure, and regulatory-legal barriers that constrain the full-scale commercialization of the sector. Best practices in implementing hydrogen strategies both internationally and domestically have been summarized, confirming the need for systemic government support to achieve cost targets.

The study draws a substantiated conclusion that the hydrogen energy transition is irreversible and represents a key tool for achieving global deep decarbonization.

Keywords: hydrogen energy, fuel cells, water electrolysis, hydrogen storage, power plants, decarbonization, energy transition

For citation: Gatiyatova S. E., Cherkasov A. S. (2026) 'Prospects for the use of hydrogen technologies in power plants', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 99–104. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_99–104.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная трансформация мирового энергетического сектора, продиктованная беспрецедентным истощением легкоизвлекаемых запасов ископаемого топлива и необходимостью радикального снижения антропогенной эмиссии парниковых газов, требует внедрения принципиально новых, высокоэффективных и экологически чистых энергоносителей. В условиях стремительного наращивания доли возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая генерация, инженерно-научное сообщество сталкивается с острой проблемой их стохастичности и пространственно-временной неравномерности. Водород в данном контексте выделяется как наиболее перспективный вторичный энергоноситель: теплота его сгорания достигает 142 МДж/кг, что почти в три раза превосходит аналогичный показатель природного газа (около 50 МДж/кг), при этом продуктом его окисления является исключительно чистая вода [1, с. 71]. Интеграция водородного цикла в структуру современных энергетических установок позволяет создать гибкую систему долгосрочного аккумулирования энергии, способную демпфировать пиковые нагрузки и объединить секторы электроэнергетики, теплоснабжения и тяжелой промышленности. Развитие технологий генерации, безопасного хранения и конверсии водорода обратно в электрическую энергию формирует научно-технологический базис для перехода к устойчивой низкоуглеродной экономике.

Глубокий анализ перспектив использования водородных технологий в энергетических установках требует последовательного рассмотрения всей цепочки создания стоимости: от методов первичного синтеза водорода до способов его аккумулирования и конечного электрохимического преобразования. На сегодняшний день мировой спрос на водород оценивается приблизительно в 72 миллиона тонн в год, из которых на долю Российской Федерации приходится около 5 миллионов тонн, потребляемых преимущественно в процессах нефтепереработки и производства аммиака [1, с. 73]. Однако, согласно сценарию «Net Zero by 2050» Международного энергетического агентства (МЭА), для достижения углеродной нейтральности глобальное потребление водорода должно возрасти до 530 миллионов тонн к середине текущего столетия [2, с. 697], а по некоторым оптимистичным прогнозам макроэкономических моделей — вплоть до 1370 миллионов тонн [3, с. 629]. Доминирующими технологиями в настоящее время выступают паровая конверсия метана (SMR) и газификация угля, обеспечивающие низкую себестоимость (в диапазоне 1,20–2,50 долларов США за килограмм), но сопровождающиеся колоссальным углеродным следом, достигающим 10–12 кг CO2 на каждый килограмм произведенного газа [2, с. 708]. Переход к экологически чистой парадигме диктует необходимость масштабного внедрения методов электролиза воды на базе безуглеродной энергии.

Современные электролизные технологии для энергетических установок подразделяются на три основных класса, каждый из которых обладает специфическими эксплуатационными характеристиками. Наиболее коммерчески зрелыми являются щелочные электролизеры (AEL), использующие водные растворы гидроксида калия или натрия, обеспечивающие электрический КПД на уровне 60–70 % [4, с. 7]. Их ключевым недостатком выступает высокая инерционность, ограничивающая возможность эффективной работы в условиях резких перепадов мощности, характерных для ветровых и солнечных электростанций. Установки на основе протонообменных мембран (PEM), работающие в кислой среде с твердым полимерным электролитом, демонстрируют более высокую эффективность (70–85 %) и способны изменять нагрузку за доли секунды, что делает их идеальными для интеграции с возобновляемой генерацией [4, с. 7]. Тем не менее широкое внедрение технологии PEM лимитируется применением дорогостоящих катализаторов платиновой группы (иридия, рутения, платины), что требует фундаментальных материаловедческих прорывов для снижения удельного содержания благородных металлов [3, с. 631]. Третьим решением, наиболее термодинамически эффективным, является твердооксидный электролиз (SOEC), протекающий при температурах 700–1000 °C. За счет подвода части необходимой энергии в виде высокопотенциального тепла, эффективность таких систем достигает 85–90 % [4, с. 7].

Таблица. Технико-эксплуатационные характеристики топливных элементов
Table. Technical and operational characteristics of fuel cells

Тип топливного элемента	Рабочая температура	Электрический КПД	Особенности и применение
Протонообменные (PEMFC)	80–100 °C	50–60%	Высокая динамика: быстрый отклик и компактность. Подходят для резервного питания и микросетей. Требуют водород высокой чистоты.
Твердооксидные (SOFC)	800–1000 °C	60–80%	Максимальный КПД: работа на синтез-газе и аммиаке. Оптимальны для крупных ТЭЦ и промышленного пара.
Расплав-карбонатные (MCFC)	650–700 °C	60–80%	Устойчивость: не боятся примесей CO. Используются в мегаваттных установках для базовой генерации. Долгий запуск.
Фосфорнокислые (PAFC)	150–200 °C	40–50% (до 85% в режиме когенерации)	Надежность: ресурс >40 000 часов. Стандарт для коммерческого сектора (ЖКХ, офисы) при совместной генерации тепла и тока.

Именно твердооксидные технологии открывают колоссальные перспективы для развития атомно-водородной энергетики. Использование высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с гелиевым теплоносителем позволяет напрямую передавать тепловую энергию реактора с температурой до 1000 °C в химико-технологическую часть установки. Российские разработки в этой области, координируемые ГК «Росатом», предполагают создание модульных ВТГР тепловой мощностью около 600 МВт, способных обеспечить крупномасштабное производство экологически чистого водорода (так называемого «желтого» или «розового» водорода) методами высокотемпературного электролиза или термохимических циклов, независимых от климатических условий [5, с. 492].

Решение задачи эффективного хранения и транспортировки синтезированного газа является критическим условием для надежного функционирования водородных энергетических установок. Водород обладает феноменальной гравиметрической плотностью энергии, однако его крайне низкая плотность в нормальных условиях (0,089 кг/м³) требует значительных энергозатрат на компактизацию. Традиционным методом является компримирование газа до давлений 350–700 бар с использованием композитных баллонов IV типа. Однако при таких давлениях возникает риск водородного охрупчивания: атомарный водород диффундирует в структуру металлической арматуры и сварных швов, снижая пределы прочности материалов и провоцируя зарождение микротрещин [7, с. 25]. Альтернативный метод криогенного хранения жидкого водорода реализуется при экстремально низкой температуре минус 253 °C, что обеспечивает плотность хранения около 71 кг/м³ [6, с. 11]. Главным барьером здесь выступают колоссальные затраты энергии на сжижение, поглощающие до 30% энергоемкости самого топлива, а также неизбежные потери на испарение (boil-off) в процессе хранения [7, с. 29]. В качестве прорывных альтернатив для стационарной энергетики научным сообществом активно исследуются системы твердотельного хранения на основе металлогидридов (например, гидридов магния, способных связывать до 7,6 масс. % водорода при умеренных давлениях), а также химические носители, такие как аммиак и жидкие органические водородные носители (LOHC) [7, с. 43]. Технология LOHC позволяет осуществлять обратимое гидрирование органических молекул (например, толуола или дибензилтолуола) и транспортировать водород в жидком виде при нормальных условиях, задействуя существующую инфраструктуру распределения нефтепродуктов.

Преобразование аккумулированного водорода обратно в электрическую и тепловую энергию осуществляется посредством топливных элементов, выступающих ядром современных водородных энергетических установок. В отличие от двигателей внутреннего сгорания, где эффективность ограничена циклом Карно, топливные элементы осуществляют прямое электрохимическое преобразование. Для систематизации данных о применяемых в стационарной энергетике технологиях целесообразно рассмотреть сравнительную таблицу основных типов топливных элементов (таблица).

В современных концепциях интеграции топливных элементов в энергосети (smart grids) особое место отводится системам тригенерации (CCHP — Combined Cooling, Heat and Power) (рисунок).

При использовании высокотемпературных топливных элементов сбросное тепло направляется не только на нужды отопления, но и в абсорбционные бромисто-литиевые холодильные машины для выработки холода. Подобная синергия позволяет довести общий коэффициент использования первичного топлива до 85–95%, радикально снижая энергоемкость зданий и промышленных объектов [8, с. 11]. Системы концепции «Power-to-Hydrogen-to-Power» (P2H2P)

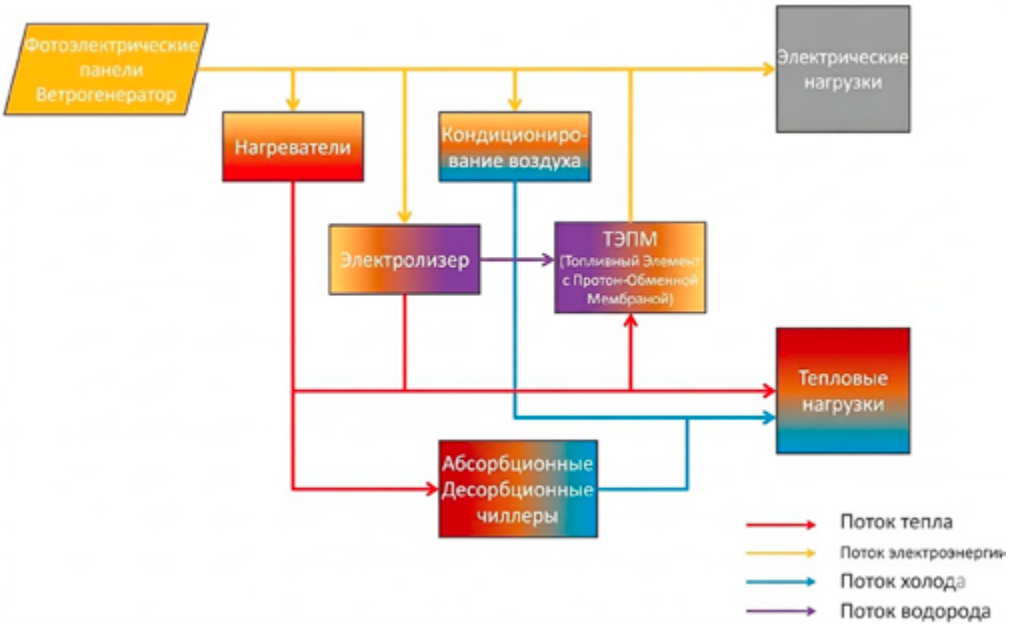


Рисунок. Демонстрация принципа работы системы тригенерации
Figure. Demonstration of the operational principle of a trigeneration system

рассматриваются сегодня как критически важный инструмент пространственно-временного арбитража энергии. Избыточная генерация ВИЭ конвертируется в водород, который при наступлении пиковых нагрузок или в периоды безветрия возвращается в сеть в виде электричества. И хотя круговой КПД таких систем пока ограничен физическими пределами термодинамики на уровне 35–50 %, именно водород обеспечивает уникальную возможность межсезонного запасания тераватт-часов энергии в подземных соляных кавернах, чего принципиально невозможно достичь с помощью классических электрохимических батарей [2, с. 722].

Переход водородных энергетических установок из статуса лабораторных и демонстрационных образцов в стадию коммерческой экспансии детерминирован государственным регулированием и инвестиционной активностью крупного бизнеса. На сегодняшний день более 40 государств утвердили национальные водородные стратегии, рассматривая данный ресурс не только как экологический императив, но и как фактор геополитической энергонезависимости [9, с. 355]. Катализатором глобального рынка выступают масштабные субсидии; так, в рамках Закона о снижении инфляции (IRA) в США введен беспрецедентный налоговый вычет (до 3 долларов за килограмм), что в перспективе до 2030 года способно обрушить приведенную стоимость (LCOH) зеленого водорода до уровня менее 1 доллара за килограмм, сделав его абсолютным конкурентом ископаемому топливу [2, с. 724]. В Российской Федерации, согласно утвержденной Концепции развития водородной энергетики, реализуется стратегия создания крупных территориальных кластеров. Ярким примером служит проект Госкорпорации «Росатом» по созданию водородного комплекса на базе мощностей Кольской АЭС (с резервом до 200 МВт) с плановой производительностью около 25 тысяч тонн водорода в год, а также масштабные проекты ПАО «Газпром» по мембранному выделению водорода из газотранспортных магистралей и производству бирюзового водорода методом пиролиза метана [10, с. 431]. Консолидация усилий государства, научного сектора и промышленных конгломератов формирует устойчивый вектор на полномасштабное внедрение водородных решений в энергетический ландшафт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Водородные технологии перестали быть исключительно футурологическим концептом, трансформировавшись в практически реализуемый инструмент для обеспечения макроэкономической стабильности и достижения глобальной углеродной нейтральности. Использование водорода в качестве вторичного энергоносителя в стационарных энергетических установках — от высокоманевренных электролизеров, интегрированных с ВИЭ, до мощных когенерационных систем на базе твердооксидных топливных элементов — открывает беспрецедентные возможности для долгосрочного аккумулирования энергии и глубокой декарбонизации

смежных отраслей. Безусловно, на пути к формированию полноценной водородной экономики стоят серьезные вызовы: необходимость снижения капитальных затрат на электролизное оборудование, поиск инновационных материалов, устойчивых к водородному охрупчиванию, а также создание рентабельных крупнотоннажных систем криогенного и твердотельного хранения. Однако экспоненциальный рост патентной активности, мультимиллиардные государственные дотации и реализация мегапроектов транснациональными корпорациями свидетельствуют о том, что этап концептуального становления пройден. В перспективе ближайших десятилетий именно водородные энергетические установки станут становым хребтом новой, экологически устойчивой, надежной и высокоэффективной архитектуры мировой энергетики.

Список литературы

1. Яруллин Р. С., Салихов И. З., Черезов Д. С., Нурисламова А. Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 70–83.
2. Boukhchina R., Hamdi M., El Alimi S. Power-to-hydrogen: A review of applications, market development, and policy landscape // AIMS Energy. 2025. Vol. 13 (3). P. 696–731.
3. Филиппов С. П., Ярославцев А. Б. Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // Успехи химии. 2021. Т. 90 (6). С. 627–643.
4. Barba J., Cañas-Carretón M., Carrión M., Hernández-Labrado G. R., Merino C., Muñoz J. I., Zárate-Miñano R. Integrating Hydrogen into Power Systems: A Comprehensive Review // Sustainability. 2025. Vol. 17. Article 6117.
5. Пономарёв-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91, № 5. С. 484–498.
6. Youssef M. M. M., Maghraby A., Abdel-Akher M., Hamdan I. Recent advances in hydrogen production technologies: environmental and economic perspectives // Journal of Engineering and Applied Science. 2026. Vol. 73:8.
7. Pan X., Zhou H., Baimbetov D., Syrlybekkyzy S., Akhmetov B. B., Abbas Q. Development Status and Future Prospects of Hydrogen Energy Technology: Production, Storage, and Cost Analysis // Advanced Energy and Sustainability Research. 2025. Vol. 6, 2400451.
8. Yue M., Lambert H., Pahon E., Roche R., Jemei S., Hissel D. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 146, 111180.
9. Марчук Н. П., Туровец Ю. В. Перспективы развития рынка водородных технологий: приоритеты государства и бизнеса // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2024. Т. 40. Вып. 3. С. 355–386.
10. Саитова А. А., Ильинский А. А., Джемилёв Э. Р. Перспективы развития водородной энергетики Российской Федерации // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». 2023. Т. 18. № 4. С. 423–444.

References

1. Yarullin R. S., Salikhov I. Z., Cherezov D. S. and Nurislamova A. R. (2021) 'Prospects of hydrogen technologies in the energy sector and chemical industry', Proceedings of Higher Educational Institutions. ENERGY PROBLEMS, 23(2), pp. 70–83.
2. Boukhchina R., Hamdi M. and El Alimi S. (2025) 'Power-to-hydrogen: A review of applications, market development, and policy landscape', AIMS Energy, 13 (3), pp. 696–731.
3. Filippov S. P. and Yaroslavtsev A. B. (2021) 'Hydrogen energy: development prospects and materials', *Russian Chemical Reviews*, 90 (6), pp. 627–643.
4. Barba J., Cañas-Carretón M., Carrión M., Hernández-Labrado G. R., Merino C., Muñoz J. I. and Zárate-Miñano R. (2025) 'Integrating hydrogen into power systems: A comprehensive review', *Sustainability*, 17, Article 6117.
5. Ponomarev-Stepnoy N. N. (2021) 'Nuclear-hydrogen energy', *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 91 (5), pp. 484–498.
6. Youssef M. M. M., Maghraby A., Abdel-Akher M. and Hamdan I. (2026) 'Recent advances in hydrogen production technologies: environmental and economic perspectives', *Journal of Engineering and Applied Science*, 73:8.
7. Pan X., Zhou H., Baimbetov D., Syrlybekkyzy S., Akhmetov B. B. and Abbas, Q. (2025) 'Development status and future prospects of hydrogen energy technology: production, storage, and cost analysis', *Advanced Energy and Sustainability Research*, 6, 2400451.
8. Yue M., Lambert H., Pahon E., Roche R., Jemei S. and Hissel D. (2021) 'Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180.
9. Marchuk N. P. and Turovets Yu. V. (2024) 'Prospects for the development of the hydrogen technology market: priorities of the state and business', *Vestnik of Saint Petersburg University. Economics*, 40 (3), pp. 355–386.
10. Saitova A. A., Ilinsky A. A. and Dzhemilev E. R. (2023) 'Prospects for the development of hydrogen energy in the Russian Federation', *Bulletin of Perm University. Series «Economics»*, 18 (4), pp. 423–444.

Информация об авторах

Гатиятова Саида Эриковна, *студентка, Институт тепловой и атомной энергетики Казанского государственного энергетического университетаж 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51; e-mail: saida17122004@mail.ru.*

Черкасов Александр Сергеевич, *ассистент кафедры атомных и тепловых электрических станций, Институт тепловой и атомной энергетики Казанского государственного энергетического университета; 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51; e-mail: sanekpuer@mail.ru.*

Information about the authors

Gatiyatova Saida Erikovna, *student, Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering, Kazan State Power Engineering University; 51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia; e-mail: saida17122004@mail.ru.*

Cherkasov Alexander Sergeevich, *Assistant at the Department of Nuclear and Thermal Power Plants, Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering, Kazan State Power Engineering University; 51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia; e-mail: sanekpuer@mail.ru.*

Исследование начинающих ученых
УДК 51–74
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_105–110

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАССИВНЫХ СГЛАЖИВАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QUCS-S ДЛЯ БЛОКОВ ПИТАНИЯ

Алексей Иванович Рожков, Дмитрий Константинович Никифоров

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Калужский филиал), г. Калуга, Россия

© Рожков А. И., Никифоров Д. К., 2026

Автор-корреспондент: Д. К. Никифоров, e-mail: dm_nikif@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

В статье выполнен сравнительный анализ трёх типов пассивных сглаживающих фильтров (ёмкостного, индуктивного и индуктивно-ёмкостного) для выпрямителей блоков питания с выходным напряжением 5 В. Моделирование проведено в среде Qucs-S при нагрузке 10 Ом и частоте пульсаций 100 Гц. Подобраны параметры элементов, обеспечивающие амплитуду пульсаций не более 0,1 В. Показано, что LC-фильтр является оптимальным по габаритам и стоимости.

Ключевые слова: пассивные сглаживающие фильтры, Qucs-S, моделирование, пульсации напряжения, индуктивный фильтр, ёмкостный фильтр, LC-фильтр, выпрямитель

Для цитирования: Рожков А. И., Никифоров Д. К. Сравнительный анализ пассивных сглаживающих электрических фильтров и их моделирование с использованием Qucs-S для блоков питания // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 105–110. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_105–110.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PASSIVE SMOOTHING FILTERS AND THEIR SIMULATION USING QUCS-S FOR POWER SUPPLIES

Aleksey Ivanovich Rozhkov, Dmitry Konstantinovich Nikiforov

Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russia

Corresponding author: D. K. Nikiforov, e-mail: dm_nikif@rambler.ru

ABSTRACT

The paper presents a comparative analysis of three types of passive smoothing filters (capacitive, inductive, and LC) for power supply rectifiers with a 5 V output voltage Modeling was conducted in the Qucs-S environment at a load of 10 Ω and a ripple frequency of 100 Hz. The parameters of the elements have been selected to ensure a ripple amplitude of no more than 0.1 V. It is shown that the LC filter is optimal in terms of dimensions and cost.

Keywords: passive smoothing filters, Qucs-S, simulation, voltage ripple, inductive filter, capacitive filter, LC filter, rectifier

For citation: Rozhkov A. I., Nikiforov D. K. (2026) 'Comparative analysis of passive smoothing electrical filters and their modeling using Qucs-S for power supplies', Technology and Energy, 2026, no. 3(3), pp. 105–110. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_105–110.

ВВЕДЕНИЕ

Электрический фильтр — это цепь, предназначенная для выделения колебаний в определенном диапазоне частот. Диапазон частот, пропускаемых фильтром, называется полосой пропускания, или полосой прозрачности. Диапазон частот, подавляемых фильтром, называется полосой задерживания, или полосой непрозрачности [1, с. 61].

Классификация фильтров в соответствии с диапазоном пропускаемых частот:

- фильтр нижних частот (ФНЧ) — это фильтр, полоса пропускания которого лежит в пределах от 0 до некоторой граничной частоты f_c, называемой частотой среза;
- фильтр верхних частот (ФВЧ) — это фильтр, полоса пропускания которого лежит в пределах от частоты f_c до ∞;
- полосовой фильтр (ПФ) — это фильтр, полоса пропускания которого лежит в пределах между нижней f_{c1} и верхней f_{c2} частотами среза;
- режекторный фильтр (РФ), также называемый заграждающим фильтром (ЗФ) — это фильтр, полоса задерживания которого лежит в пределах от f_{c1} до f_{c2}.

Включаемый в цепь выхода выпрямителя фильтр для сглаживания пульсаций, по существу, является фильтром нижних частот, так как он должен пропускать только ток нулевой частоты, т. е. постоянную составляющую выпрямленного тока, и задерживать все его переменные составляющие [2, с. 117].

Сглаживающий фильтр с конденсаторным входом даёт при прочих равных условиях выход постоянного тока с более высоким напряжением, чем фильтр с индуктивным входом, но он требует, чтобы выпрямитель мог безопасно пропускать большие пики тока, необходимые для зарядки конденсатора [2, с. 120].

Упрощенный расчет сглаживающих фильтров можно производить следующим образом. Прежде всего определяют необходимую емкость конденсатора на входе фильтра. Эта емкость может быть определена по формуле

$$C \approx \frac{0.25}{f \cdot R_э \cdot a},$$

где a — коэффициент пульсации, равный $\frac{U_1}{U_0}$,

где, в свою очередь, U_1 — амплитуда переменной составляющей выпрямленного пульсирующего напряжения;
U_0 — постоянная составляющая выпрямленного напряжения;
f — частота пульсаций;
$R_э$ — сопротивление эффективной нагрузки выпрямителя.

Все эти величины зависят от мощности выпрямительной установки и в каждом отдельном случае могут быть подсчитаны. Коэффициент пульсаций a берут от 0,05 до 0,2 в зависимости от величины сопротивления $R_э$; чем больше сопротивление $R_э$, тем меньше коэффициент пульсаций [2, с. 121].

RC-фильтры обычно используют в ситуациях, когда требования к степени подавления пульсаций не столь жёсткие, как для других типов фильтров, а также когда в цепи фильтра проходит не только переменная, но и постоянная составляющая тока, а на сопротивление необходимо выделить падение напряжения постоянной составляющей. Эффективность сглаживания такого фильтра повышается с ростом сопротивления R и ёмкости конденсатора C. Однако увеличение сопротивления приводит к значительным потерям напряжения на нём за счёт постоянного тока, что снижает уровень постоянного напряжения на нагрузке. Данный тип фильтра допустимо применять лишь при малом значении постоянной составляющей выпрямленного тока.

Выпрямительными называются устройства преобразования электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока. Выпрямительное устройство в большинстве случаев состоит из трех основных элементов: трансформатора, преобразующего переменное напряжение питающей сети в более высокое или низкое напряжение; группы полупроводниковых диодов, осуществляющих выпрямление переменного напряжения, и сглаживающего фильтра, уменьшающего пульсацию выпрямленного напряжения [3, с. 88].

Выпрямители характеризуются рядом показателей, основными из которых являются [4]:

- коэффициент пульсаций: $K_{(k)} = \frac{U_{m(k)}}{U_0}$ — отношение амплитуды k-й гармоники пульсаций к средневыпрямленному значению напряжения (постоянной составляющей);
- коэффициент выпрямления по напряжению: $K_{ои} = \frac{U_0}{U_2}$ — отношение средневыпрямленного значения напряжения к действующему значению напряжения во вторичной цепи трансформатора;
- пульсность (число фаз выпрямления): $p = \frac{f_n}{f} = \frac{T}{T_n} = k \cdot q$ — отношение частоты пульсации к частоте питающего напряжения, k — число вторичных обмоток, q — число полупериодов выпрямления — число импульсов тока через одну обмотку за период сети (1 или 2);
- коэффициент полезного действия (КПД): $\eta_B = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}$ — отношение активной (полезной) мощности в нагрузке к потребляемой мощности.

Критерием качества сглаживающих свойств фильтров является коэффициент сглаживания равный отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра:

$$q = \frac{K_{\text{Пвх}}}{K_{\text{Пвых}}} = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \cdot \frac{U_{02}}{U_{01}},$$

где U_{m1} — амплитуда пульсации на входе;
U_{m2} — амплитуда пульсации на выходе;
U_{01} — среднее значение напряжения на входе;
U_{02} — среднее значение напряжения на выходе.

К фильтрам предъявляется еще ряд требований: минимальные габаритные размеры, масса и стоимость; отсутствие искажений, вносимых в работу нагрузки; отсутствие недопустимых перенапряжений и бросков тока при переходных процессах и устойчивость системы с фильтром; высокая надежность [3].

Индуктивный (L) сглаживающий фильтр представляет собой катушку с ферромагнитным сердечником (дроссель), включаемую последовательно с нагрузкой. Индуктивный фильтр является «габаритным» устройством, поэтому для уменьшения его размеров стараются повысить частоту пульсаций в звене выпрямителя. Данный фильтр используется в цепях с повышенными токами нагрузки. При возрастании тока нагрузки (уменьшении $R_н$) происходит увеличение энергии, накапливаемой в дросселе, увеличивается ЭДС самоиндукции, что препятствует прохождению в нагрузку переменной составляющей тока и улучшаются сглаживающие свойства фильтра [4, с. 85].

Емкостный (С) сглаживающий фильтр представляет собой конденсатор, включаемый параллельно нагрузке. Емкостный фильтр используются при малых токах нагрузки, так как с ростом тока уменьшается постоянная цепи разряда, что увеличивает пульсацию напряжения (из-за глубокого разряда конденсатора). К достоинствам фильтра можно отнести: отсутствие колебаний напряжения при переходных процессах, простота, небольшие габаритные размеры. Недостатком фильтра является: воздействие на выпрямитель (угол отсечки тока меньше 180 градусов), поэтому при использовании такого фильтра с большой величиной емкости необходимо вводить в звено выпрямителя защиту по току [4, с. 85].

Индуктивно-емкостный (LC) сглаживающий фильтр. При соблюдении условия $X_{др} > X_c$ реакция фильтра будет индуктивного характера. Дроссель и конденсатор, используемые совместно, более эффективно выполняют функции сглаживания, чем при их раздельном включении, если выполняются неравенства: $X_{др} >> R_н$ и $X_c << R_н$ [4, с. 85].

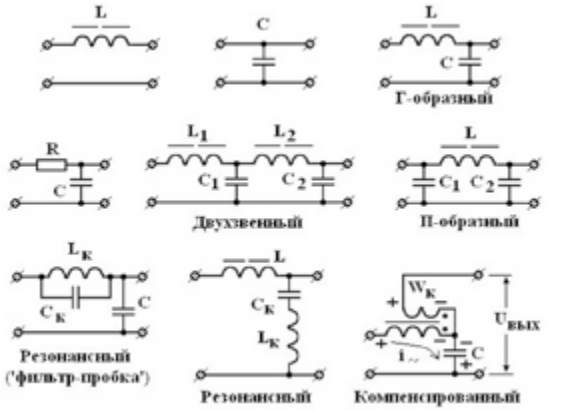


Рисунок 1. Схемы пассивных сглаживающих фильтров [4]
Figure 1. Passive smoothing filter circuits [4]

Данный тип фильтра применяют при высоких мощностях нагрузки. Среди его преимуществ: компактность, а также малая зависимость коэффициента сглаживания от изменений тока нагрузки. Однако имеются и недостатки: могут возникать резонансные переходные процессы; дроссели отличаются значительными массой и габаритами, к тому же их индуктивность изменяется при изменении тока нагрузки. При коммутации сети (включении/отключении) или при скачкообразном изменении тока нагрузки возникают переходные процессы, способные вызвать перенапряжения и броски тока в элементах фильтра и выпрямителя. Даже при малой длительности такие процессы могут вывести из строя вентили выпрямителя, а также привести к пробою конденсаторов или повреждению изоляции дросселей и силового трансформатора.

Если требуется обеспечить коэффициент сглаживания выше 50, применяют многозвенные конструкции фильтров. На практике чаще всего используют двухзвенные схемы: они отличаются стабильностью коэффициента сглаживания при изменениях тока нагрузки, а также хорошими массогабаритными и энергетическими характеристиками. Применение трёх и более звеньев нежелательно, так как это сужает зону устойчивой работы и понижается КПД устройства.

В качестве программного обеспечения будем использовать Qucs-S.

Qucs предназначен для моделирования цифровых и аналоговых схем во временной и частотной областях от постоянного тока до СВЧ-частот [5].

В схемах генератор переменного тока будет имитировать вторичную обмотку трансформатора, далее электрический ток выпрямляется диодным мостом

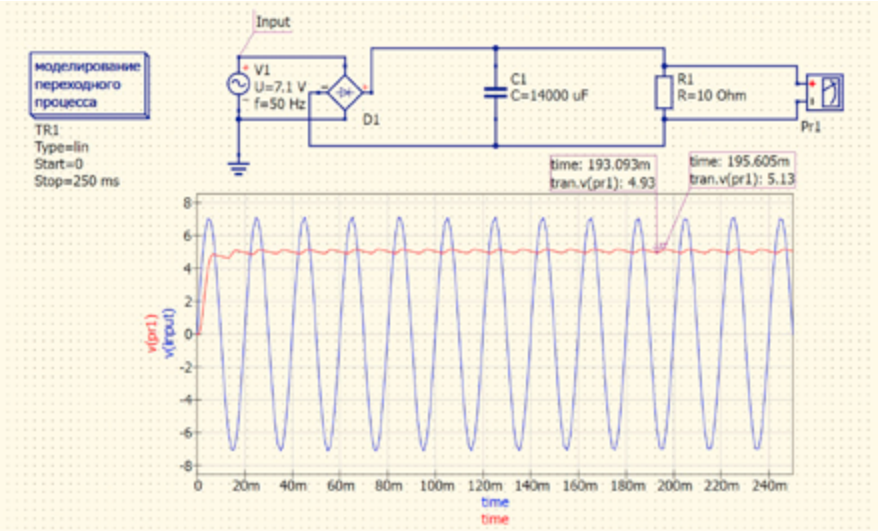


Рисунок 2. Моделирование емкостного сглаживающего фильтра
Figure 2. Simulation of a capacitive smoothing filter

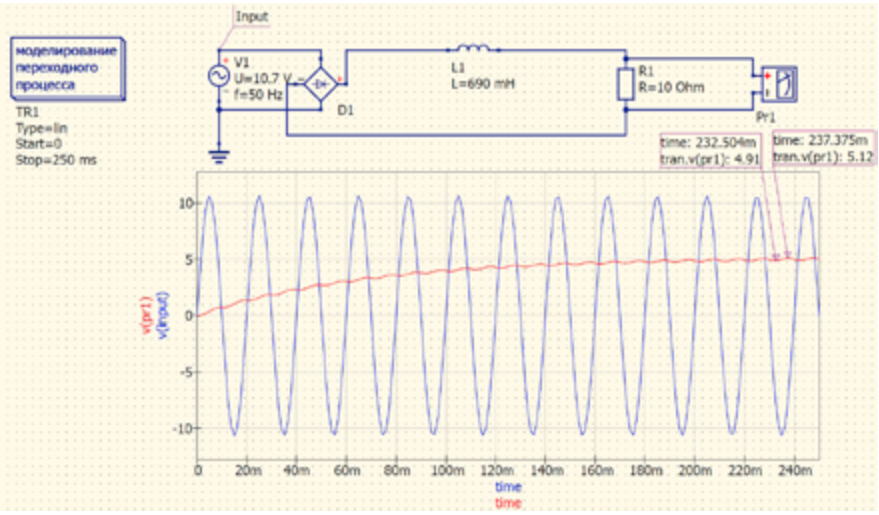


Рисунок 3. Моделирование индуктивного сглаживающего фильтра
Figure 3. Simulation of an inductive smoothing filter

KBPC1005, взятым из библиотеки элементов. После двухполупериодного выпрямителя частота пульсаций равняется удвоенной частоте сети, т. е. 100 Гц. Данный диодный мост выдерживает ток 3 А и напряжение 50 В. Нагрузка 10 Ом будет имитировать электронное устройство, которое мы будем питать напряжением 5 В, например, мобильный телефон.

Целью моделирования было получение амплитуды пульсаций не больше 0,1 В. Напряжение в среднем на нагрузке колебалось от 4,9 В до 5,1 В. Емкостной сглаживающий фильтр, состоящий из одного конденсатора, требует наименьшее напряжение из остальных фильтров для питания нагрузки. Оно равняется 7,1 В. Индуктивный фильтр подключён к напряжению 10,7 В, а комбинированный LC-фильтр — к 8,65 В. Следовательно на фильтрующей катушке индуктивности падает приличное напряжение. Фильтры, использующие дроссель, сильнее снижают напряжение источника, чем фильтр, состоящий из одного конденсатора.

В первом случае для достижения требуемой амплитуды пульсаций напряжения не более 0,1 В необходимо использовать конденсатор ёмкостью не менее 14 000 мкФ. Во втором случае — дроссель с индуктивностью не менее 690 мГн. Такие радиоэлементы обладают приличными размерами, а также имеют высокую стоимость. Комбинированный фильтр позволил ограничиться

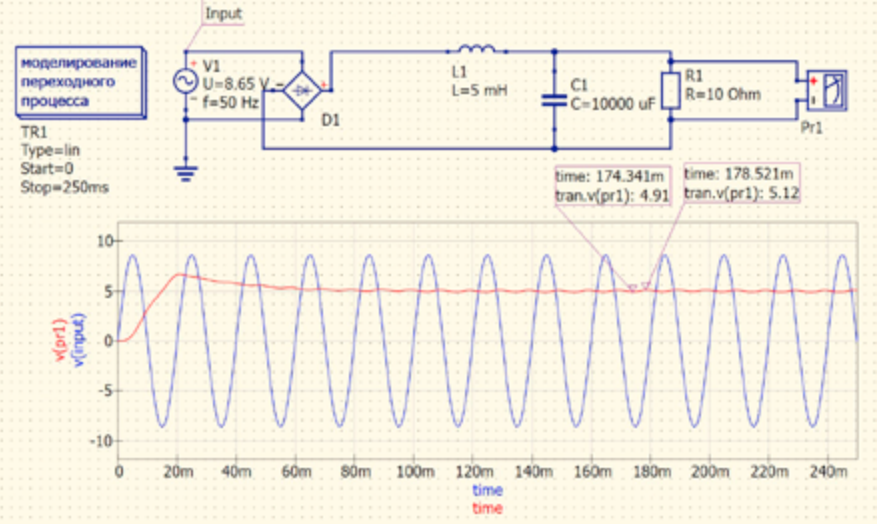


Рисунок 4. Моделирование индуктивно-ёмкостного сглаживающего фильтра
Figure 4. Simulation of an LC smoothing filter

дросселем с индуктивностью 5 мГн и конденсатором ёмкостью 10 000 мкФ. Элементы с такими параметрами стоят вместе дешевле и обладают небольшими размерами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы был проведён сравнительный анализ трёх типов пассивных сглаживающих фильтров (ёмкостного, индуктивного и индуктивно-ёмкостного), предназначенных для использования в выпрямителях блоков питания с выходным напряжением 5 В. Моделирование электрических схем выполнялось в среде Qucs-S с использованием мостового выпрямителя и активной нагрузки 10 Ом, имитирующей потребление тока около 0,5 А.

Таким образом, на основе проведённого моделирования можно рекомендовать LC-фильтр в качестве оптимального для построения малогабаритных блоков питания на 5 В с допустимыми пульсациями.

Список литературы

1. Пилипенко А. М. Основы теории четырехполюсников и электрических фильтров: учебное пособие / А. М. Пилипенко. Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. 97 с.
2. Частотные электрические фильтры: научно-популярное издание / Д. А. Конашинский. Москва, Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1959. 128 с.
3. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет: учебное пособие / Е. Н. Гейтенко. Москва: СОЛОН-Пресс, 2021. 447 с.
4. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Сборник примеров и задач: учебное пособие / Сажнев А. М., Рогулина Л. Г. Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2012.
5. Кузнецов В. Симулятор электронных схем с открытым исходным кодом Qucs: основные возможности и основы моделирования / В. Кузнецов // Компоненты и технологии. 2015. № 3 (164). С. 114–120.

References

1. Pilipenko A. M. (2019) Fundamentals of the theory of four-terminal networks and electrical filters: textbook. Rostov-on-Don, Taganrog: Southern Federal University Publishing House. 97 p.
2. Konashinsky D. A. (1959) Frequency electrical filters: popular science edition. Moscow, Leningrad: State Energy Publishing House. 128 p.
3. Geitenko E. N. (2021) Secondary power sources. Circuit design and calculation: textbook. Moscow: SOLON-Press. 447 p.
4. Sazhnev A. M. and Rogulina L. G. (2012) Power supply of telecommunication devices and systems. Collection of examples and problems: textbook. Siberian State University of Telecommunications and Information Science.
5. Kuznetsov V. (2015) Open-source electronic circuit simulator Qucs: main features and basics of modeling, *Components and Technologies*, vol. 164, no. 3, pp. 114–120.

Информация об авторах

Рожков Алексей Иванович, *студент, Калужский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»; 248000, Россия, г. Калуга, ул. Университетский Городок, зд. 1/2; SPIN-код: 1712–0374; Author ID (РИНЦ): 1329340; e-mail: nauka-rozhkov@yandex.ru.*

Никифоров Дмитрий Константинович, *кандидат физико-математических наук, доцент кафедры проектирования и технологии производства электронных приборов, Калужский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»; 248000, Россия, г. Калуга, ул. Университетский Городок, зд. 1/2; SPIN-код: 4248–8600; Author ID (RSCI): 161204; e-mail: dm_nikif@rambler.ru.*

Information about the authors

Rozhkov Alexey Ivanovich, *student, Kaluga Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University)"; 1/2 Universitetsky Gorodok, Kaluga, 248000, Russia; SPIN-code: 1712–0374; Author ID (RSCI): 1329340; e-mail: nauka-rozhkov@yandex.ru.*

Nikiforov Dmitry Konstantinovich, *PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Design and Technology of Production of Electronic Devices, Kaluga Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University)"; 1/2 Universitetsky Gorodok, Kaluga, 248000, Russia; SPIN-code: 4248–8600; Author ID (RSCI): 161204; e-mail: dm_nikif@rambler.ru.*

Теоретическое исследование начинающих ученых
УДК 622.278
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_111–116

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТОПЛИВА, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

Ралина Ниязовна Газизова, Альфия Шарифовна Низамова

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

© Газизова Р. Н., Низамова А. Ш., 2026

Автор-корреспондент: Р. Н. Газизова, e-mail: gazizova. ralina777@mail. ru

АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются современные методы анализа продуктов подземной газификации угля. Описана специфика отбора проб газа из подземного газогенератора, обусловленная высокой температурой и наличием примесей. Детально проанализированы хроматографические методы как основной инструмент определения компонентного состава газа, а также методы расчета его теплотехнических характеристик. Исследованы подходы к анализу жидких и твердых продуктов процесса. Показано, что комплексный аналитический контроль является неотъемлемой частью эффективной и безопасной реализации технологии ПГУ.

Ключевые слова: подземная газификация угля, генераторный газ, газовая хроматография, анализ топлива, топливные газы, жидкие углеводороды, твердые остатки, отбор проб

Для цитирования: Газизова Р. Н., Низамова А. Ш. Методы анализа топлива, полученного при подземной газификации угля // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 111–116. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_111–116.

METHODS FOR ANALYSIS OF FUEL PRODUCED BY UNDERGROUND COAL GASIFICATION

Ralina Niyazovna Gazizova, Alfiya Sharifovna Nizamova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Corresponding author: R. N. Gazizova, e-mail: gazizova. ralina777@mail. ru

ABSTRACT

The paper reviews modern methods for the analysis of products from underground coal gasification. The paper describes the specifics of gas sampling from an underground gasifier, driven by high temperatures and the presence of impurities. Chromatographic methods as the primary means of determining the component composition of gas and methods for calculating its thermal engineering characteristics are analyzed in detail. Approaches to the analysis of liquid and solid products of the process have been studied. It has been shown that comprehensive analytical control is an indispensable element in the effective and safe realization of UCG technology.

Keywords: underground coal gasification, producer gas, gas chromatography, fuel analysis, fuel gases, liquid hydrocarbons, solid residues, sampling

For citation: Gazizova R. N., Nizamova A. Sh. (2026) 'Methods of analysis of fuel obtained from underground coal gasification', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 111–116. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_111–116.

ВВЕДЕНИЕ

Подземная газификация угля (ПГУ) представляет собой сложный термохимический процесс целенаправленного превращения угольного пласта в горючий газ непосредственно в недрах земли, показанный на рисунке 1. Как отмечается в современных исследованиях, в последние годы интерес к технологии подземной газификации угля резко возрос, что обусловлено истощением в ближайшем будущем мировых запасов нефти и газа, наличием значительного количества угольных месторождений в различных странах мира, а также растущим спросом на энергоресурсы [1, с. 164–178]. Практическая реализация этой идеи потребовала глубокого

понимания физико-химических механизмов, протекающих в угольном пласте под воздействием высоких температур и окислительных агентов. Сам процесс подземной газификации угля позволяет перерабатывать уголь непосредственно в месте его залегания, превращая его в горючий газ, пригодный для энергетических целей, таких как сжигание в котлах и газовых турбинах, или химического синтеза, например, производство метанола, жидких углеводородов. Однако эффективность и безопасность процесса напрямую зависят от состава получаемого топлива, который подвержен значительным колебаниям из-за изменчивости горно-геологических условий, притока подземных вод и нестационарности процессов в подземном газогенераторе [2, с. 14]. В связи с этим анализ продуктов газификации становится критически важным инструментом для оперативного контроля и управления процессом, а также для определения оптимальных направлений использования продукта.

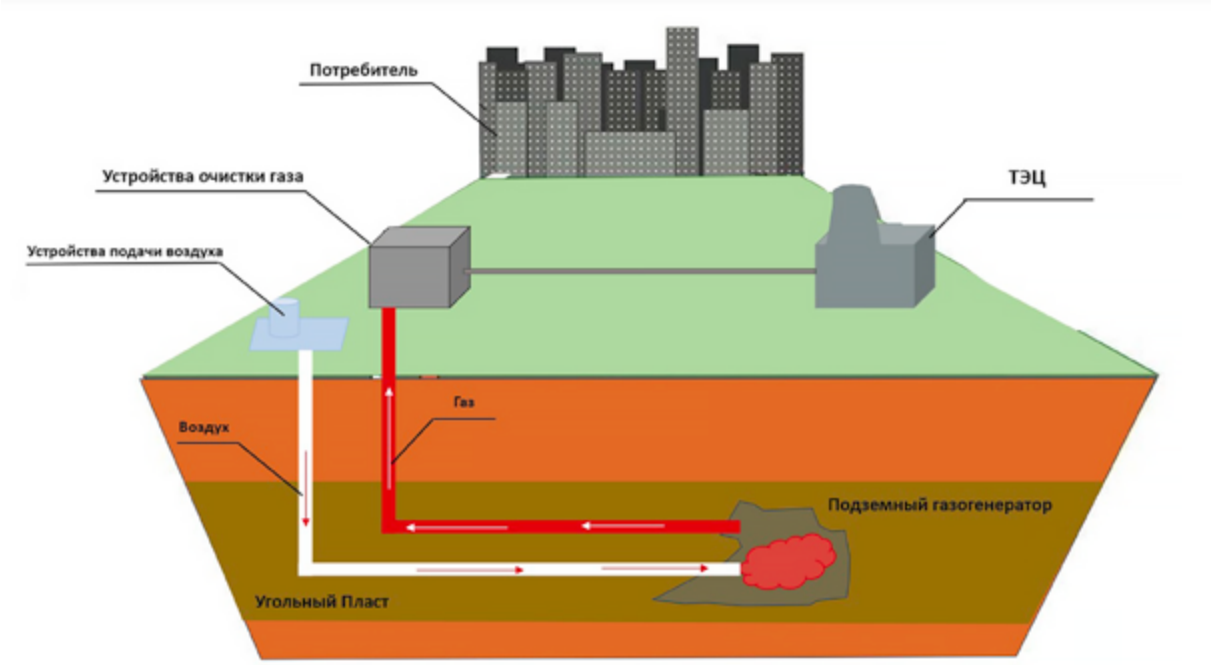


Рисунок 1. Процесс подземной газификации угля
Figure 1. The underground coal gasification process

Физико-химические основы ПГУ аналогичны наземной газификации, но протекают в специфических условиях ограниченного пространства угольного пласта, окружённого вмещающими породами. В подземном газогенераторе формируются характерные температурные зоны: окисления, восстановления и сухой перегонки. В зоне окисления, куда через нагнетательные скважины подаётся дутьевая смесь, состоящая из воздуха, кислорода, водяного пара или их комбинации, происходит экзотермическое взаимодействие углерода с кислородом с образованием углекислого газа (CO_2) и угарного газа (CO). Образующийся диоксид углерода и раскалённый углерод, перемещаясь в зону восстановления, вступают в эндотермическую реакцию Будуара:

$$CO_2 + C = 2CO\,. \qquad (1)$$

А при наличии водяного пара протекают реакции водяного газа:

$$C + H_2O = CO + H_2\,, \qquad (2)$$

$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2\,. \qquad (3)$$

В зоне пиролиза из угля выделяются смолы, влага и летучие углеводороды, включая метан [1, с. 374–376]. Состав образующегося генераторного газа зависит от многих факторов: марки угля (выход летучих веществ, реакционная способность), состава дутьевой смеси (воздушное, кислородное, парокислородное дутьё), гидрогеологических условий (приток воды охлаждает зону и увеличивает содержание водяного пара и CO_2), а также от газопроницаемости угольного массива, определяющей равномерность фильтрации реагентов [2, с. 114–115]. Так, при воздушном дутье получается низкокалорийный газ с высоким содержанием азота до 50 %, тогда как использование парокислородного дутья позволяет достичь содержания водорода до 40 %, что делает газ пригодным для химического синтеза [3, с. 34–35].

Достоверность результатов анализа газообразных продуктов ПГУ в решающей степени зависит от правильности отбора проб. Газ на устье газоотводящей скважины имеет высокую температуру, содержит пары смол, влагу и твёрдые частицы угольной пыли. Стандартные методы отбора проб, предназначенные для очищенного природного газа, здесь неприменимы. Для получения представительной пробы необходимо использовать специализированные пробоотборные комплексы, конструкция которых должна обеспечить охлаждение газа, очистку от механических примесей и конденсирующихся компонентов, а также предотвращение протекания вторичных химических реакций.

В мировой и отечественной практике для этих целей применяются методы, аналогичные описанным в стандартах для определения концентраций органических соединений в газовых выбросах. Обобщенная схема такого пробоотборного устройства представлена на рисунке 2. Ключевым элементом системы является охлаждаемый пробоотборный зонд, пример конструкции которого приведен на рисунке 3. Такой зонд, изготавливаемый из химически стойких материалов (титан, кварц, стекло), имеет внутренний диаметр от 5 до 16 мм и оснащен рубашкой для циркуляции охлаждающей жидкости. Это позволяет резко снизить температуру отбираемого газа непосредственно в точке отбора, «замораживая» его состав и предотвращая догорание или пиролиз компонентов.

После зонда газ поступает в систему подготовки пробы. Схема на рисунке 2 показывает типовую конфигурацию такого комплекса. Горячий газ проходит через охлаждаемую пробоотборную трубку (4), где конденсируется основная масса паров воды и смол, стекающих в колбу для сбора конденсата (6). Далее поток последовательно очищается: сначала на фильтре из кварцевого волокна (7) для улавливания твердых частиц, а затем в картридже с твердым сорбентом (8), например, с пористым полимером XAD-2 или пенополиуретаном (PUF), которые предназначены для глубокого улавливания смолистых веществ и полициклических ароматических углеводородов [4, с. 15–20].

Важно отметить, что подготовка сорбентов является критическим этапом, обеспечивающим чистоту анализа. Так, стандарты предписывают многоступенчатую очистку XAD-2 путем последовательной экстракции водой, метанолом, метиленхлоридом и последующей обработки в экстракторе Сокслета толуолом в течение не менее 48 часов. Аналогичные процедуры очистки с использованием метанола, метиленхлорида, толуола и ацетона предусмотрены и для пенополиуретановых вставок. После прохождения сорбционных картриджей газ осушается в осушительной колонне с силикагелем

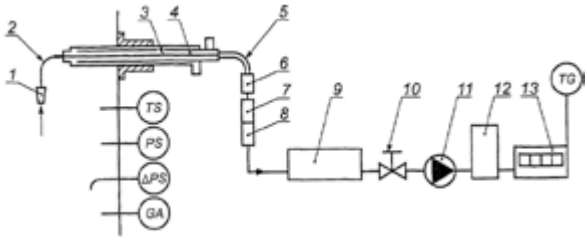


Рисунок 2. Обобщенная схема такого пробоотборного устройства, применяемого для отбора проб в сложных условиях

Figure 2. Generalized diagram of the sampling device applied for sampling in difficult conditions

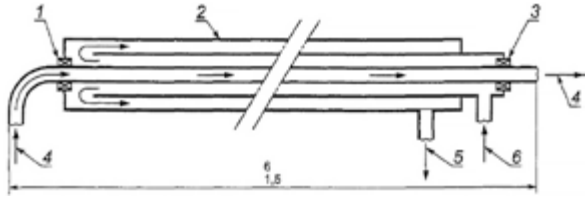


Рисунок 3. Схема охлаждаемого зонда: 1 — прокладка; 2 — титановый корпус; 3 — прокладка; 4 — отбираемый газ; 5 — линия выпуска охлаждающей жидкости; 6 — линия ввода охлаждающей жидкости

Figure 3. Diagram of the cooled probe: 1 — seal; 2 — titanium body; 3 — seal; 4 — sampled gas; 5 — cooling fluid outlet line; 6 — cooling fluid inlet line

(12) и поступает в побудитель расхода, который включает насос (11), регулирующий клапан (10) для поддержания изокинетических условий отбора и газовый счетчик (13) с манометром и термометром для точного измерения объема отобранной пробы, приведенного к стандартным условиям. Только такая многоступенчатая система обеспечивает представительность пробы для последующего анализа [4, с. 15–20].

Основным методом определения компонентного состава газов ПГУ является газовая хроматография, типовая схема которого представлена на рисунке 4 [5, с. 20–38]. Её высокая разделяющая способность, чувствительность и экспрессность сделали этот метод незаменимым для оперативного контроля. Принцип метода основан на разделении сложной многокомпонентной смеси при движении потока газа-носителя через слой неподвижной фазы в колонке с последующей регистрацией сигнала детектором. Для анализа основных компонентов, таких как H_2, O_2, N_2, CO, CO_2, CH_4, традиционно используют насадочные колонки длиной 2–4 м, заполненные пористыми полимерными сорбентами или молекулярными ситами. Для разделения CO и CO_2 часто применяют две колонны с переключением потоков, чтобы избежать необратимой адсорбции диоксида углерода на молекулярных ситах [6, с. 455–489]. В качестве детекторов используют детектор

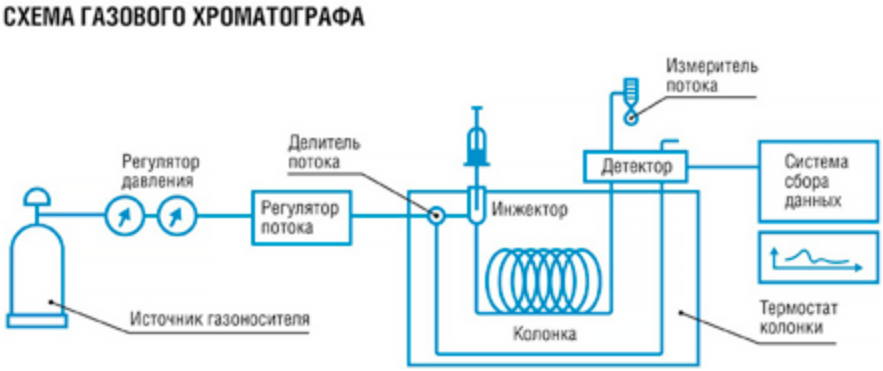


Рисунок 4. Схема газового хроматографа
Figure 4. Schematic of a gas chromatograph

по теплопроводности, который является универсальным и особенно чувствителен к водороду, что важно для контроля процесса ПГУ, и пламенно-ионизационный детектор (ПИД), обладающий высокой чувствительностью к органическим соединениям и применяемый для определения микропримесей углеводородов C_2 — C_5, а также ароматических соединений (бензол, толуол, ксилолы). В сложных аналитических комплексах детекторы могут соединяться последовательно или параллельно. Методологические принципы количественного хроматографического анализа природного газа и аналогичных ему газовых смесей детально регламентированы межгосударственным стандартом ГОСТ 31371.1–2020 [5, с. 20–38]. Данный стандарт устанавливает требования к аппаратуре, процедуре градуировки, проведению анализа и обработке результатов. Особое внимание уделяется контролю стабильности градуировочных характеристик, что обеспечивает достоверность результатов в условиях длительной эксплуатации хроматографов на промышленных объектах. Хотя стандарт разработан для природного газа, его положения применимы к анализу генераторных газов ПГУ при соответствующей адаптации градуировочных характеристик с учетом специфических компонентов.

На основе данных хроматографического анализа о молярных долях компонентов в соответствии с ГОСТ 31369–2021 с высокой точностью рассчитываются теплотехнические характеристики газа [7, с. 36–42]. Сущность метода заключается в применении правила аддитивности: теплота сгорания газовой смеси вычисляется как сумма произведений молярных долей компонентов на их стандартные теплоты сгорания; аналогично рассчитывается плотность. Стандарт содержит подробные таблицы стандартных значений физико-химических характеристик индивидуальных компонентов, а также процедуры пересчёта к стандартным условиям, например, при температуре 20 °C или 25 °C и давлении 101,325 кПа. Это позволяет отказаться от трудоёмких прямых калориметрических измерений в рутинной практике.

Помимо основных горючих компонентов, газ ПГУ содержит микрокомпоненты, которые могут оказывать негативное влияние на дальнейшее использование: вызывать коррозию оборудования, отравление катализаторов или создавать экологическую опасность. К числу наиболее значимых примесей относятся сероводород (H_2S), аммиак (NH_3), цианистый водород (HCN), а также смолы и пыль. Определение сероводорода может выполняться химическими методами, например, йодометрическое титрование, или физико-химическими методами, например, спектрофотометрия, электрохимические сенсоры.

Аммиак и цианиды, хорошо растворимые в воде, улавливаются при охлаждении газа в пироконденсате и анализируются фотометрическими или потенциометрическими методами. Содержание смол и пыли определяют гравиметрическим методом, пропуская пробу газа через фильтр и абсорбер с органическим растворителем.

Жидкие продукты подземной газификации угля — смолы и пироконденсат — представляют собой сложные многокомпонентные смеси, состав которых варьируется в зависимости от типа угля и температурного режима. Смолы содержат ценные химические соединения: фенолы, нафталин, бензольные углеводороды, пиридиновые основания, однако их присутствие в газе осложняет транспорт и вызывает забивание скважин. Анализ жидких продуктов начинается с определения физико-химических показателей. Содержание воды определяют по методу, основанном на азеотропной перегонке пробы с нерастворимым растворителем (толуолом или ксилолом) и измерении объёма сконденсировавшейся воды в градуированной ловушке [8,

с. 22–29]. Определение фракционного состава проводят по ГОСТ 2177–99, который устанавливает два метода перегонки; для тёмных нефтепродуктов, к которым относятся смолы ПГУ, применяют метод Б [8, с. 25–29]. Перегонку ведут в стандартных условиях, фиксируя температуры выкипания определённых объёмов. Для смол ПГУ характерно широкое распределение фракций: легкое масло, фенольная фракция и тяжёлая смола [9, с. 18–20]. Данные фракционного состава позволяют оценить потенциальные направления переработки смолы.

Для детального компонентного состава смол подземной газификации угля применяется хромато-масс-спектрометрия (ХМС), сочетающая высокую разделяющую способность газовой хроматографии с идентификационной мощью масс-спектрометрии [6, с. 602–610]. Этот метод позволяет надёжно идентифицировать индивидуальные соединения в сложных смесях, определять количественное содержание фенолов, нафталина, антрацена и других ароматических соединений. Данные ХМС-анализа необходимы для обоснованной оценки возможности использования смол в качестве сырья для производства фенолформальдегидных смол, нафталина и других продуктов органического синтеза.

Твёрдый остаток, остающийся в подземном газогенераторе после завершения процесса, представлен золой и полукоксом — углистым остатком, не полностью прореагировавшим с окислителем. Его анализ важен для оценки полноты выгазовывания угля, прогнозирования поведения массива и экологической оценки нарушенных земель. Первым этапом является технический анализ: определение зольности влажности. Высокое содержание углерода в золе (недожог) свидетельствует о неполноте процесса газификации и позволяет оценить его эффективность. Особое значение имеет исследование газопроницаемости твёрдого остатка, так как этот параметр определяет фильтрационные характеристики подземного газогенератора — равномерность распределения дутья и отвода продуктов газификации. Лабораторные методы определения газопроницаемости включают пропускание воздуха или инертного газа через слой дробленого материала при заданном перепаде давления и расчёт коэффициента проницаемости по закону Дарси. Данные о газопроницаемости учитываются при математическом моделировании процесса ПГУ, которое является необходимым инструментом для прогнозирования динамики распределения температуры и состава продуктов газификации, а также для оптимизации режимных параметров [10, с. 70–76].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное исследование продуктов ПГУ, сочетающее методы газовой хроматографии, стандартные методы анализа жидких и твёрдых топлив, а также современные физико-химические методы (хромато-масс-спектрометрия), является ключевым инструментом для решения широкого круга задач: оперативного контроля и управления процессом газификации путём своевременной корректировки состава дутьевой смеси и режимных параметров; оценки технико-экономической эффективности переработки угольного сырья на основе данных о полноте выгазовывания и потерях углерода с твёрдым остатком; определения оптимальных направлений использования получаемого газа — для энергетических целей или в качестве сырья для химического синтеза; оценки потенциала извлечения ценных компонентов из жидких продуктов и решения экологических задач, связанных с утилизацией пироконденсата и рекультивацией земель после завершения процесса ПГУ. Применение стандартизированных методик, регламентированных ГОСТом, обеспечивает достоверность и сопоставимость результатов анализов, что является основой для принятия обоснованных технологических решений и гарантирует безопасность и экономическую целесообразность применения технологии подземной газификации угля.

Список литературы

1. Крейнин Е. В. Подземная газификация углей основы теории и практики, инновации / Е. В. Крейнин. Москва: Корина-офсет, 2010. 396 с.
2. Антамошкин О. А., Цыганко Е. Н., Астанакулов К. Д., Ахмадалиев Ш. Ш., Муратов А. Х. Перспективы подземной газификации для доработки угольных запасов шахт // Уголь. 2025. № 6. С. 114–118.
3. Тюрина Э. А., Медников А. С., Елсуков П. Ю., Жарков П. В., Зубова Е. В. Использование газа подземной газификации угля для совместного производства электроэнергии и синтетического жидкого топлива // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2022. № 1. 22–37 с.
4. ГОСТ Р ИСО 11338-1-2008. Национальный стандарт Российской Федерации. Выбросы стационарных источников. Определение содержания полициклических ароматических углеводородов в газообразном состоянии и в виде твердых взвешенных частиц. Часть 1. Отбор проб: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 ноября 2008 г. № 306-ст: дата введения 2010-01-01. Москва: Стандартинформ, 2009. 20 с.
5. ГОСТ 31371.1–2020. Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 1. Руководство по проведению анализа. Москва: Стандартинформ, 2020. 40 с.
6. Столяров Б. В., Савинов И. М., Витенберг А. Г., Карцова Л. А., Зенкевич И. Г., Калмановский В. И.,

Каламбет Ю. А. Практическая газовая и жидкостная хроматография: учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2002. 616 с.
7. ГОСТ 31369–2021. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. Москва: Стандартинформ, 2021. 44 с.
8. ГОСТ 2177–99 (ИСО 3405–88). Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 29 с.
9. Белов А. В., Зоря А. Ю., Крейнин Е. В. Перспективы химической переработки газа подземной газификации угля с получением синтетического жидкого топлива // Газохимия. 2009. С. 18–20.
10. Ермагамбет Б. Т., Мартемьянов С. М., Касенова Ж. М., Бухаркин А. А. Физическое моделирование внутрипластового нагрева угольного пласта // Проблемы современной науки и образования. 2019. 70–76 с.

References

1. Kreynin E. V. (2010) Underground Coal Gasification: Fundamentals of Theory and Practice, Innovations. Moscow: Korina-ofset. 396 pp. ISBN 978-5-904188-11-5.
2. Antamoshkin O. A., Tsyganko E. N., Astanakulov K. D., Akhmadaliev Sh. Sh. and Muratov A. Kh. (2025) 'Prospects of underground coal gasification for additional development of mine coal reserves', Coal, (6), pp. 114–118.
3. Tyurina E. A., Mednikov A. S., Elsukov P. Yu., Zharkov P. V. and Zubova E. V. (2022) 'Use of underground coal gasification gas for combined production of electricity and synthetic liquid fuel', Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University, (1), pp. 22–37.
4. GOST R ISO 11338-1-2008 (2009) National Standard of the Russian Federation. Stationary Source Emissions. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Gaseous and Solid Particulate Phases. Part 1: Sampling. Moscow: Standartinform. 20 pp.
5. GOST 31371.1–2020 (2020) Natural Gas. Determination of Composition by Gas Chromatography with Uncertainty Evaluation. Part 1: Guidelines for Analysis. Moscow: Standartinform. 40 pp.
6. Stolyarov B. V., Savinov I. M., Vitenberg A. G., Kartsova L. A., Zenkevich I. G., Kalmanovskii V. I. and Kalambet Yu. A. (2002) Practical Gas and Liquid Chromatography: A Textbook. Saint Petersburg: Saint Petersburg University Press. 616 pp.
7. GOST 31369–2021 (2021) Natural Gas. Calculation of Calorific Value, Density, Relative Density and Wobbe Index from Composition. Moscow: Standartinform. 44 pp.
8. GOST 2177–99 (ISO 3405–88) (2021) Petroleum Products. Methods for Determination of Distillation Characteristics. Moscow: Russian Institute of Standardization. 29 pp.
9. Belov A. V., Zorya A. Yu. and Kreynin E. V. (2009) 'Prospects for chemical processing of underground coal gasification gas to produce synthetic liquid fuel', Gas Chemistry, pp. 18–20.
10. Ermagambet B. T., Martemyanov S. M., Kasenova Zh. M. and Bukharkin A. A. (2019) 'Physical modeling of in-situ heating of a coal seam', Problems of Modern Science and Education, pp. 70–76.

Информация об авторах

Газизова Ралина Ниязовна, *магистрант, Институт теплоэнергетики, кафедра тепловых электрических станций, Казанский государственный энергетический университет; 420066, Россия, г. Казань, Красносельская ул., д. 51; e-mail: gazizova.ralina777@mail.ru.*

Низамова Альфия Шарифовна, *кандидат технических наук, доцент кафедры атомных и тепловых электрических станций, Казанский государственный энергетический университет; 420066, Россия, г. Казань, Красносельская ул., д. 51; e-mail: nizamova_tes@mail.ru.*

Information about the authors

Gazizova Ralina Niyazovna, *Master's Student, Institute of Thermal Power Engineering, Department of Thermal Power Plants, Kazan State Power Engineering University; 51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia; e-mail: gazizova.ralina777@mail.ru.*

Nizamova Alfiya Sharifovna, *PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Nuclear and Thermal Power Plants, Kazan State Power Engineering University; 51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia; e-mail: nizamova_tes@mail.ru.*

Обзорная статья начинающих ученых
УДК 625.7:620.9
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_117–122

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ СБОРА ЭНЕРГИИ С ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Семён Александрович Петров, Кирилл Константинович Ершов

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Петров С. А., Ершов К. К., 2026

Автор-корреспондент: С. А. Петров, e-mail: urta.1732@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В данной статье приведен обзор технологий для преобразования кинетической энергии транспортных средств в электрическую. Рассмотрены пьезоэлектрические, термоэлектрические, электромагнитные, трибоэлектрические генераторы электрической энергии. Сделаны выводы о необходимых для эффективной работы условиях каждого варианта, из них выбраны наиболее перспективные и жизнеспособные.
Проанализированы преимущества и ограничения каждого метода. Показано, что пьезоэлектрические преобразователи обладают наибольшей плотностью энергии и перспективны для интеграции в дорожное полотно. Термоэлектрические генераторы эффективны в жарком климате, но имеют низкий КПД. Электромагнитные системы требуют интенсивного трафика, а трибоэлектрические пока неконкурентоспособны. Сделан вывод о приоритете развития пьезоэлектрических систем на магистралях с высокой нагрузкой. Также отмечены проблемы масштабирования и необходимость дальнейших исследований.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, дорожные покрытия, преобразователи энергии, энергия дорожного полотна, термоэлектрические генераторы, электромагнитные генераторы, трибоэлектрические генераторы, автономные сенсорные сети, энергоэффективность

Для цитирования: Петров С. А., Ершов К. К. Обзор технологий сбора энергии с дорожных покрытий // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 117–122. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_117–122.

A REVIEW OF TECHNOLOGIES FOR HARVESTING ENERGY FROM ROAD PAVEMENTS

Semyon Alexandrovich Petrov, Kirill Konstantinovich Ershov

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: S. A. Petrov, e-mail: urta. 1732@mail. ru

ABSTRACT

The present paper reviews technologies for converting vehicle kinetic energy into electricity. Piezoelectric, thermoelectric, electromagnetic, and triboelectric electrical energy generators are considered. The study draws conclusions about the conditions necessary for the effective operation of each variant, selecting the most promising and viable among them. The paper analyzes the advantages and limitations of each method. Piezoelectric transducers are shown to have the highest energy density and to be promising for road pavement integration. Thermoelectric generators are effective in hot climates but have low efficiency. Electromagnetic systems require high traffic intensity, whereas triboelectric systems are not yet competitive. It is concluded that the development of piezoelectric systems on high-traffic highways is a priority. Scaling problems and the need for further research are also noted.

Keywords: renewable energy sources, road pavements, energy converters, road pavement energy, thermoelectric generators, electromagnetic generators, triboelectric generators, autonomous sensor networks, energy efficiency

For citation: Petrov S. A., Ershov K. K. (2026) 'A review of technologies for harvesting energy from road pavements'. Technology and Energy, no. 3 (3), pp. 117–122. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_117–122.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из задач, которые ставит перед собой человечество, является поиск возобновляемых источников энергии. Это обусловлено множеством причин: исчерпаемость ископаемых видов топлива, экологические проблемы, стремление к обеспечению энергетической независимости своей страны. Именно поэтому люди стараются развивать технологии, способные вырабатывать энергию из возобновляемых источников. Примером такого рода источника энергии может послужить дорожное полотно, которое постоянно претерпевает разнообразные воздействия, таких как солнечный свет и движение транспортных средств.

В данной статье рассмотрены технологии сбора энергии с дорожного покрытия с помощью пьезоэлектрических, термоэлектрических, электромагнитных и трибоэлектрических преобразователей. На рисунке 1 представлена схема сбора механической и тепловой энергии с дорожного полотна.

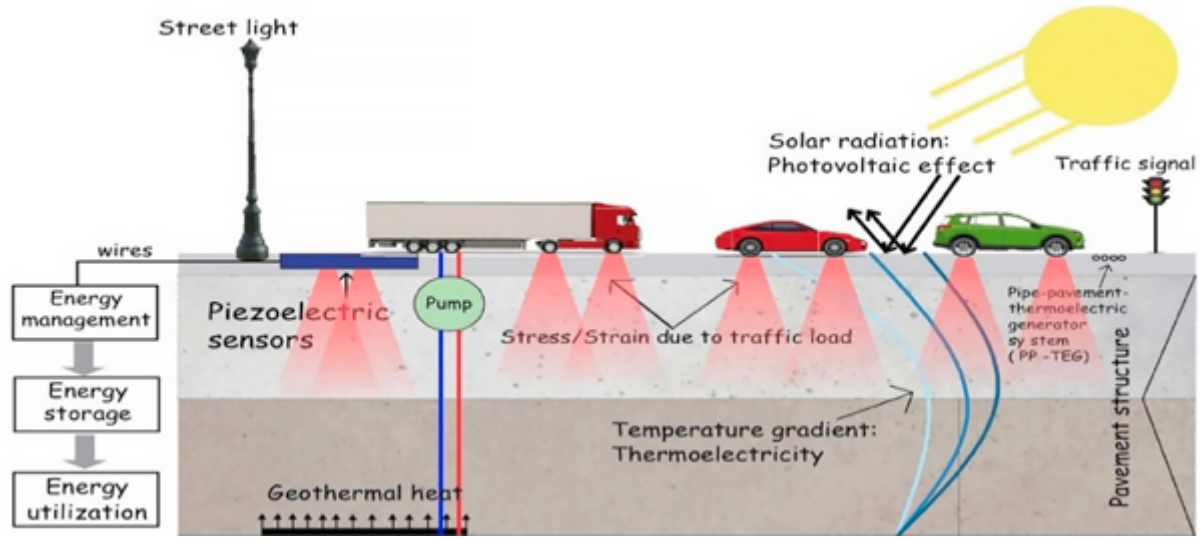


Рисунок 1. Схема сбора механической и тепловой энергии с дорожного покрытия

Figure 1. Schematic representation of mechanical and thermal energy harvesting from road pavement

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Пьезоэлектрические преобразователи являются одной из наиболее развивающихся технологий для сбора энергии с дорожного покрытия. Их принцип действия основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте — явлении, при котором деформация пьезоэлемента приводит к возникновению связанных зарядов на поверхностях деформированного твёрдого тела. Благодаря этому явлению механическая энергия транспортных средств может быть преобразована в электрическую независимо от погодных условий [1]. Ввиду увеличения грузоперевозок и интенсивности движения транспорта, особенно большегрузного, пьезоэлектрические генераторы становятся все более перспективной технологией для сбора энергии от вибраций дорожного полотна [1].

Пьезоэлектрические преобразователи, интегрированные в дорожное покрытие, генерируют электроэнергию посредством деформаций, вызванных транспортными средствами, преобразуя кинетическую энергию и механические напряжения в электричество. На рисунке 2 представлена схема одного из способов реализации пьезоэлектрического генератора. Полученная энергия может использоваться для питания беспроводных сенсорных сетей и мониторинга состояния дорожной инфраструктуры [2]. Характеристики таких систем зависят от конструкции преобразователей и условий движения. Например, система Waynergy (создана португальской компанией Waydip при сотрудничестве лаборатории механики дорожного покрытия Университета Коимбры) в часы пик генерирует 525 Дж/ч (0,15 Вт·ч), а устройство размером 150×150 мм при интенсивном движении (0,7 МПа, 15 Гц) вырабатывает 50,41 мВт при оптимальной нагрузке 4 кОм [2]. Лабораторные испытания показывают, что плотность энергии у таких систем одна из самых высоких, она уступает только фотоэлектрическим преобразователям [2].

Эффективность пьезоэлектрических устройств зависит от различных факторов, включая режим

механического-электрического преобразования. Наиболее часто используются режимы сжатия перпендикулярно направлению поляризации пьезоэлемента и сжатие вдоль направления поляризации. Второй режим обладает более высоким пьезоэлектрическим коэффициентом и больше соответствует условиям дорожного движения, обеспечивая большее энергопроизводство [5]. Мощность системы зависит от характеристик пьезоэлементов, схемы их соединения (последовательная или параллельная), частоты, сопротивления и прикладываемой нагрузки [5]. Моделирование показывает, что оптимизация материалов и параметров цепи значительно повышает эффективность выходной мощности в различных дорожных и нагрузочных сценариях [2].

При использовании пьезоэлектрических преобразователей на дорогах, где они могут подвергаться миллионам циклов напряжений, одним из важнейших вопросов становится их долговечность. Для защиты от механических напряжений и увеличения срока службы применяются методы инкапсуляции в бетонные блоки, а также в слои строительного раствора [2]. Испытания показывают, что новые конструкции генераторов сохраняют 97,4 % своего напряжения после 500 000 циклов напряжений, подтверждая их устойчивость к длительным нагрузкам [2]. Оптимизированные конструкции демонстрируют превосходство в мощности и стабильности напряжения после сотен тысяч циклов, не повреждая при этом дорожное покрытие [2].

Изначально пьезоэлектрические преобразователи на основе цирконата-титаната свинца (PZT) не были предназначены для асфальтобетонных покрытий. Регулярные нагрузки в совокупности с конструкцией, не рассчитанной на работу в таких условиях, быстро выводили их из строя [3]. Поэтому некоторые компании, например Innowattech (Израиль) и Genziko (США), представили коммерческие продукты для сбора энергии, но данные по энергогенерации (5,76 Дж и 40 Дж на модуль за проход автомобиля соответственно) требуют валидации в реальных условиях [3]. Современные исследования направлены на разработку гибких, лёгких и биосовместимых полимерных наногенераторов, а также экологически безопасных бессвинцовых материалов [1].

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) представляют собой перспективную технологию для сбора тепловой энергии, аккумулированной дорожными покрытиями, с последующим преобразованием её в электричество. Их принцип работы основан на эффекте Зеебека — явлении возникновения электродвижущей силы (термоэдс) в замкнутой цепи из последовательно

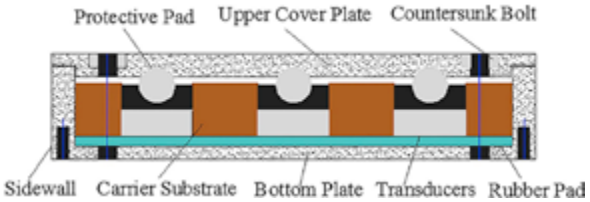


Рисунок 2. Схема пьезоэлектрического преобразователя
Figure 2. Schematic of a piezoelectric transducer

соединенных разнородных металлов, контакты между которых поддерживаются при разных температурах [1, 3]. На рисунке 3 изображен один из вариантов реализации термоэлектрического генератора. Для эффективного преобразования тепла от дорожного покрытия в электричество требуются материалы, сочетающие в себе высокий коэффициент Зеебека, высокую электропроводность и низкую теплопроводность [1]. Основными термоэлектрическими материалами являются полупроводники на основе теллурида висмута (Bi_2Te_3), теллурида свинца (PbTe) и кремний-германия (SiGe) [2, 5]. ТЭГ представляют собой твердотельные устройства, не имеющие движущихся частей, что обеспечивает их долговечность, низкие эксплуатационные расходы и высокую надёжность [2].

Дорожное полотно нагревается под воздействием солнечной радиации и интенсивного потока транспорта до более чем 60 °C, из-за чего возникает температурный градиент между поверхностью и более холодными нижними слоями грунта [2]. Конструктивно системы термоэлектрического сбора энергии включают несколько ключевых элементов: теплосборник, размещённый в дорожном полотне, сам ТЭГ и систему охлаждения для холодной стороны.

Существует множество конструктивных решений теплосборников. К ним относятся:

- Системы с теплообменниками в виде труб, где в качестве теплоносителя используется вода, нагретая солнцем [3, 4].
- Конструкции со стержневыми (алюминиевый стержень) или пластинчатыми (Z-образная медная пластина, H-образная алюминиевая пластина) теплосборниками, которые непосредственно контактируют с асфальтом для забора тепла [4].
- Многослойные алюминиевые пластины, которые частично заглублены в асфальт, а частично — в грунт, что позволяет увеличить площадь установки ТЭГ без увеличения занимаемой площади и обеспечивает эффективный теплосъем [4].

Для отвода тепла с холодной стороны применяются пассивные методы (алюминиевые радиаторы-рёбра) или

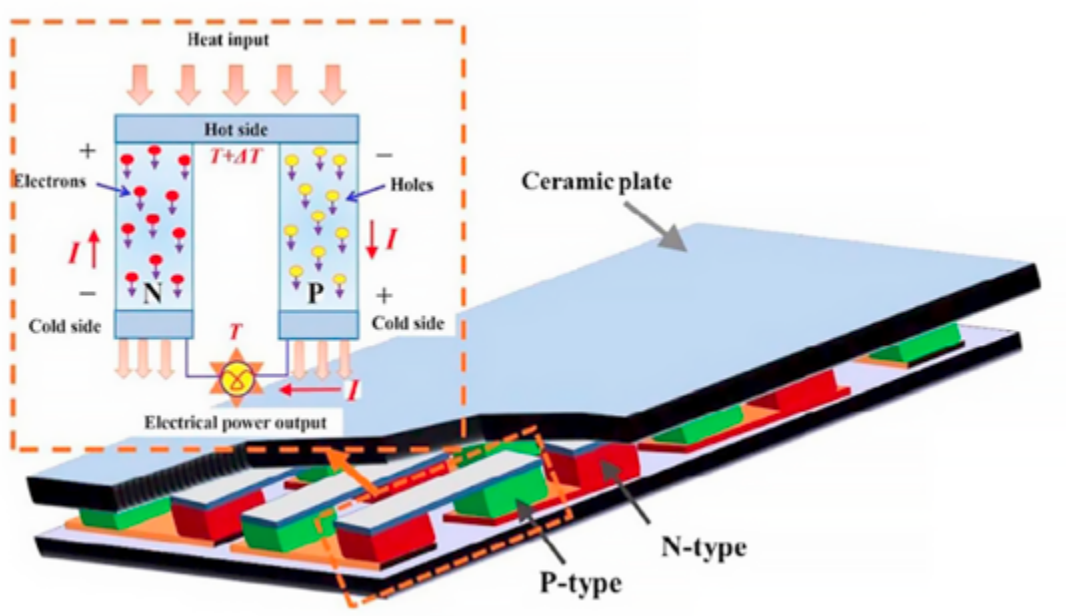


Рисунок 3. Схема термоэлектрического преобразователя
Figure 3. Schematic of a thermoelectric converter

активные системы, использующие воду из близлежащих водоёмов, резервуары с водой или фазопереходные материалы — вещества, способные накапливать и высвобождать тепловую энергии при изменении агрегатного состояния [3, 4].

Одним из преимуществ ТЭГ является их способность смягчать эффект городского теплового острова за счёт преобразования тепловой энергии, которая может быть избыточна в больших населённых пунктах [5]. Технология экологически безопасна, не производит углекислый газ и подходит для питания автономных устройств, вроде датчиков мониторинга состояния дорог, систем связи и уличных фонарей [2, 5]. Полевые испытания показывают следующее: система способна генерировать напряжение 0.4–0.7 В, заряжать суперконденсаторы для питания светильников [2, 5].

Главным ограничением технологии остаётся низкий коэффициент полезного действия (КПД) преобразования тепла в электричество, который в различных исследованиях составляет от 1.6 % до 4 % [3]. Выходная мощность напрямую зависит от величины температурного градиента: лабораторные прототипы показывают мощность от десятков микроватт до нескольких ватт, при этом увеличение температурного градиента значительно повышает выходную мощность [2, 3]. Другими проблемами являются: сложность и стоимость некоторых конструкций, необходимость технического обслуживания (например, риск протечек в гидравлических системах), а также риск нарушения целостности дорожного полотна [4]. Несмотря на наличие коммерческих ТЭГ, готовых решений для масштабного внедрения в дорожные покрытия на рынке пока нет [3].

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромагнитные генераторы работают на основе закона Фарадея, согласно которому при движении проводника в магнитном поле возникает ЭДС электромагнитной индукции. Обычно такие генераторы использовались на крупных электростанциях, но за последние годы разработаны компактные модели, способные преобразовывать энергию механических вибраций в электрическую. Эти системы могут функционировать двумя способами: путём колебания магнита внутри корпуса с катушкой или перемещения магнитного источника относительно катушки. Второй метод считается более стабильным и эффективным, так как в нем меньше изнашивающихся деталей и проще обеспечить надёжное соединение [1].

Ключевой особенностью электромагнитных генераторов является то, что наиболее часто они активируются не самой механической энергией транспортных средств. Для этого используются различные приспособления, такие как гидравлические, пневматические, электромеханические системы или MEMS (микроэлектромеханические системы) [3]. На практике такие устройства часто устанавливаются за лежачими полицейскими, как

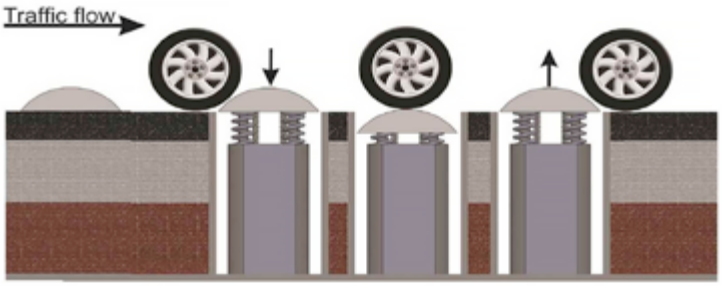


Рисунок 4. Схема работы электромагнитного преобразователя, располагаемого за лежачим полицейским
Figure 4. Schematic of an electromagnetic converter positioned behind a speed bump

это показано на рисунке 4, где нагрузка на дорожное полотно активирует механизм, перемещающий магнит внутри поля катушки [1].

Электромагнитные генераторы обычно размещаются в зонах с интенсивным движением, таких как пункты взимания платы или искусственные неровностей. Генерируемая энергия может использоваться для питания локальной инфраструктуры или накапливаться. Эта технология проста и не требует внешнего питания, однако её эффективность зависит от плотности транспортного потока, что ограничивает её применение в районах с низкой загруженностью [5].

Электромагнитные генераторы, в сравнении с другими преобразователями, не могут конкурировать в размерах и сложности установки рабочей системы. Тем не менее они остаются актуальным благодаря своей надёжности, простоте и эффективности в условиях стабильного и интенсивного трафика.

ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Трибоэлектрические генераторы (TBG) работают на основе явления возникновения электрического заряда при трении двух разнородных материалов, которые приобретают в ходе процесса положительный или отрицательный заряд. Знак заряда зависит от свойств материала и положения в трибоэлектрическом ряду (положительный заряд приобретают материалы с большей диэлектрической проницаемостью по правилу Коэна). Когда поверхности контактируют и разделяются, создаётся разность потенциалов, которая приводит к движению электронов и возникновению ЭДС.

В контексте дорожных покрытий идея заключается в интеграции TBG в структуру асфальта или специальных секций, которые взаимодействуют с колёсами транспорта. При движении транспорта трение между шинами и покрытием генерирует электрический заряд, который можно преобразовать в полезную энергию.

В трибоэлектрических преобразователях могут использоваться широко распространённые материалы, вроде воды и кремния. Они имеют несложную конструкцию и относительную дешевизну, а также подходят для интеграции в уже существующие инфраструктуры. Но существует множество трудностей, связанных с вопросами долговечности и износа, низкой эффективности в сравнении с другими технологиями. К тому же возникают сложности с масштабированием, из-за чего реализация подобных проектов задерживается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После обзора и сравнения рассмотренных технологий можно сделать вывод о том, что наиболее перспективными и жизнеспособными для внедрения в дорожные покрытия являются пьезоэлектрические преобразователи, благодаря высокой плотности генерируемой энергии, прогрессу в процессе повышения долговечности и возможности прямой интеграции в полотно для питания автономной инфраструктуры. Термоэлектрические генераторы имеют перспективы в жарком климате, но ограничены низким КПД, а электромагнитные системы эффективны лишь в точках с гарантированной высокой нагрузкой. Трибоэлектрические технологии пока неконкурентоспособны из-за проблем с износом и масштабированием. Таким образом, приоритет в развитии следует отдать пьезоэлектрическим системам, особенно на магистралях с интенсивным движением.

Список литературы / References

1. Duarte F. and Ferreira A. (2016) 'Energy harvesting on road pavements: state of the art', *Energy*, 169 (EN2), pp. 79–90.
2. Warsi M. H. and Kumar T. N. (2024) 'Advances in energy harnessing techniques for smart highways: a review', *Electrical Engineering*, article 10663896408. DOI: 10.1007/s00202-024-02379-8.

3. Zabihi N. and Saafi M. (2020) 'Recent developments in the energy harvesting systems from road infrastructures', *Sustainability*, 12 (16), article 6738. DOI: 10.3390/su12176738.
4. Wang C. H., Zhao J. X., Li Q. and Li Y. W. (2018) 'Optimization design and experimental investigation of piezoelectric energy harvesting devices for pavement', *Applied Energy*, 229, pp. 18–30. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2018.07.036.
5. Chen S., Wei L., Huang C. and Qin Y. (2025) 'A review on the technologies and efficiency of harvesting energy from pavements', *Energies*, 18 (15), article 3959. DOI: 10.3390/en18153959.

Информация об авторах

Петров Семён Александрович, *студент, кафедра автоматизированного электропривода и электротехники, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: urta. 1732@mail.ru*

Ершов Кирилл Константинович, *старший преподаватель, кафедра автоматизированного электропривода и электротехники Высшей школы технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 1149–6092; e-mail: volt. 96@yandex.ru.*

Information about the authors

Petrov Semyon Aleksandrovich, *student, Department of Automated Electric Drives and Electrical Engineering, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, 198095, Russia; e-mail: urta. 1732@mail.ru.*

Ershov Kirill Konstantinovich, *Senior Lecturer, Department of Automated Electric Drives and Electrical Engineering, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 1149–6092; e-mail: volt. 96@yandex.ru.*